

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

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE RECONSTITUIÇÃO DE
AMOSTRAS DO TIPO MOIST TAMPING NO
COMPORTAMENTO MECANICO DOS REJEITOS DE
MINÉRIO DE FERRO DISPOSTOS EM PILHAS DE
REJEITOS FILTRADOS**

MATHEUS NAVARRA SATUF MUNIZ

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc.

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM-410/2024**

BRASÍLIA – DF, 21 DE JUNHO DE 2024.

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

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS DO TIPO
MOIST TAMPING NO COMPORTAMENTO MECANICO DOS REJEITOS DE
MINÉRIO DE FERRO DISPOSTOS EM PILHAS DE REJEITOS FILTRADOS**

MATHEUS NAVARRA SATUF MUNIZ

**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. ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**GUSTAVO MARÇAL DE SOUZA D.Sc. (VALE)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 DE JUNHO DE 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

MUNIZ, MATHEUS NAVARRA SATUF

Avaliação do Método de Reconstituição de Amostras do Tipo Moist Tamping no Comportamento Mecânico dos Rejeitos de Minério de Ferro Dispostos em Pilhas de Rejeitos Filtrados, 2024, 124p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2024).

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

- | | |
|--|----------------------|
| 1. Rejeito filtrado de flotação | 2. Moist Tamping |
| 3. Comportamento mecânico | 4. Fabric do rejeito |
| 5. Reconstituição de amostras em laboratório | 6. Minério de ferro |
| I. ENC/FT/UnB | Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MUNIZ, M. N. S. (2024). **Avaliação do Método de Reconstituição de Amostras do Tipo Moist Tamping no Comportamento Mecânico dos Rejeitos de Minério de Ferro Dispostos em Pilhas de Rejeitos Filtrados**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-410/2024, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 124p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Navarra Satuf Muniz.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO **Avaliação do Método de Reconstituição de Amostras do Tipo *Moist Tamping* no Comportamento Mecânico dos Rejeitos de Minério de Ferro Dispostos em Pilhas de Rejeitos Filtrados**.

GRAU/ANO: Mestre/2024

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.

Matheus Navarra Satuf Muniz
Rua Monte Alegre, 372, apt 201
30320240 – Belo Horizonte / MG – Brasil
navarrasatuf@gmail.com

DEDICATÓRIA

*“Para ser grande, sê inteiro: nada teu
exagera ou exclui. Sê todo em cada coisa.
Põe quanto és no mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda brilha,
porque alta vive”. Fernando Pessoa.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Ricardo Leão e Maria Cristina, que estiveram junto comigo nesta árdua jornada, longa, desafiadora e enriquecedora. Ao meu pai, pela confiança de um exímio geotécnico que incentivou e transmitiu a certeza da execução de um bom trabalho e pesquisa, por mais impossível que se pareceu ao longo dos últimos dois anos e meio. Aos meus avós, Walmy e Ildea, pelo carinho e acolhimento por toda essa caminhada.

À Deus, por acolher minhas orações e me trilhar no caminho certo para a conclusão desta etapa.

Agradeço à minha orientadora Michéle, por todos os ensinamentos e companheirismo ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Ao Roberto, pela paciência, trocas imprescindíveis de conhecimento e condução da execução desta dissertação. Sem vocês, este trabalho não teria sido executado com a mesma regência e rigor a qual foi submetido.

Aos profissionais da mais alta qualidade do Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale, presentes no Laboratório de Geotecnia, em especial ao João Paulo e a Rosiane, peças fundamentais para a execução, cadência e conclusão da etapa experimental desta pesquisa.

Ao Gustavo Marçal, a quem tenho o prazer de chamar de colega de Vale, um verdadeiro padrinho e maior incentivador da academia dentro da nossa empresa. Sem o seu apoio e condução técnica pelos trabalhos dentro da Vale, este mestrado não se concretizaria.

A minha eterna gerente Fabiana Cruz, pelo incentivo e apoio incondicional ao longo de todo o mestrado. Ao meu gerente Paulo Gomide, por acreditar na conclusão desta pesquisa e na importância da mesma para as operações de rejeito na Vale.

Aos meus grandes amigos da Vale, em especial ao Lucio, Marquinhos, Vanessa, Marília, Victor, Beatriz, Mariana, Juliana Moura, Juliana Sales, Miguel, Aldy, Andrea, Fernanda, e a todos os demais que me acompanharam na realização desta pesquisa, sendo apoio fundamentais para os momentos de dificuldade na rotina do trabalho, e, com certeza, fora dele também.

Às minhas queridas amigas Mariana, Lissa, Monique, Amanda, Leticia, que estiveram comigo durante todas as etapas do mestrado e da vida, sendo pilar e fonte de força para chegar onde cheguei. Vocês são incríveis!

Aos amigos que fiz ao longo da trajetória dentro da UnB, em especial à Daniela e a Beatriz, que estiveram comigo ao longo de todo esse caminho.

Obrigado!

RESUMO

Avaliação do método de reconstituição de amostras do tipo moist tamping no comportamento mecânico dos rejeitos de minério de ferro dispostos em pilhas de rejeitos filtrados.

Nos últimos 10 anos, a população brasileira vivenciou dois significativos acidentes em barragens para contenção de rejeito de mineração. Com o objetivo de evitar que novos acidentes ocorram, as barragens construídas pelo método de alteamento a montante estão em processo de descaracterização e descomissionamento. Dessa forma, surge a necessidade de estudar e projetar métodos alternativos de disposição dos rejeitos. Dentre os métodos existentes, destaca-se o empilhamento de rejeitos filtrados, o qual é acompanhado de um rígido controle tecnológico para sua construção, por meio de ensaios em laboratório. A moldagem de corpos de prova em laboratório do rejeito torna-se de extrema importância para a realização destes ensaios. Dentre os métodos de moldagem existentes, foi escolhida a técnica “*moist tamping*” para o desenvolvimento desta pesquisa, visando a reconstituição de amostras de rejeitos coletadas em campo, uma vez que para este método, apesar de bastante difundido, existe uma lacuna de estudos e análises que avaliam a qualidade e eficácia do mesmo em reproduzir de forma fidedigna o comportamento das amostras de rejeito indeformadas já compactadas no campo. Foram realizados ensaios oedométricos e de cisalhamento simples estático, Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) e a Porosimetria por adsorção de nitrogênio (*BET test*) em amostras reconstituídas em laboratório e em amostras indeformadas coletadas em campo, avaliando o comportamento mecânico dos rejeitos e a *fabric* do mesmo. Os resultados obtidos entre os dois tipos de amostras apresentam similaridade no que tange o comportamento mecânico monotônico, analisando os resultados dos ensaios de cisalhamento direto simples estático. Nota-se uma diferença para os resultados de compressibilidade, onde as amostras reconstituídas em laboratório se apresentaram menos compressíveis quando comparadas com as amostras indeformadas, levando a necessidade de uma análise mais detalhada do histórico de tensões aplicada ao corpo de prova. Para os resultados de *fabric*, no que tange os ensaios de MEV e Porosimetria, as amostras obtiveram resultados semelhantes, mostrando que as amostras reconstituídas apresentaram estruturas semelhantes se comparadas às amostras indeformadas.

Palavras-chave: Minério de ferro, rejeito filtrado de flotação, reconstituição de amostras em laboratório, moist tamping, comportamento mecânico. *fabric* do rejeito, ensaios.

ABSTRACT

Evaluation of moist tamping sample reconstitution method on mechanical behavior of iron ore tailings disposed in filtered tailings dry stack piles.

Over the last 10 years, the Brazilian population has experienced two significant accidents concerning tailings dams. In order to prevent new accidents and failures from occurring, dams that was previously built using the upstream raising method are in the process of being decommissioned and decharacterization. Therefore, there is a currently need to study and design alternative methods of tailings disposal. Among the existing methods, the filtered tailings dry stack pile stands out, which is accompanied by a strict technological control for its construction, through laboratory tests. The molding of laboratory test tailings specimens becomes extremely important for the performance of these tests. Among the existing molding methods, the “moist tamping” technique was chosen for the development of this research, aiming at the reconstitution of tailings samples collected in the field, since for this method, despite being widely disseminated, there is a gap in studies and analyzes that evaluate the quality and effectiveness of it in faithfully reproducing the behavior of the undisturbed tailings samples already compacted in the field. Oedometer tests and Direct Simple Shear tests, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Nitrogen Adsorption Porosimetry (BET test) were performed on samples reconstituted in the laboratory and on undisturbed samples collected in the field, evaluating the mechanical behavior of the tailings and its fabric. The results obtained between the two types of samples present similarity in terms of monotonic mechanical behavior, analyzing the results of the Direct Simple Shear tests. There is a difference for the compressibility results, whereas the samples reconstituted in the laboratory were less compressible when compared to the undisturbed samples, leading to the need for a more detailed analysis of the stress history applied to the test specimen. For the fabric results, in terms of SEM and Porosimetry tests, the samples obtained similar results, showing that the reconstituted samples presented similar structures when compared to the undisturbed samples.

Key words: Iron ore, flotation filtered tailings, laboratory sample reconstitution, moist tamping, mechanical behavior, tailings’s fabric, tests.

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.....	3
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. MINERAÇÃO DE FERRO NO BRASIL	5
2.2. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FILTRADOS.....	6
2.3. REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRA INDEFORMADA COMO CONDIÇÃO DE CAMPO	10
2.4. MÉTODOS DE MODELAGEM PARA RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS EM LABORATÓRIO	12
2.4.1. MÉTODO DE COMPACTAÇÃO COM SOQUETE, <i>MOIST TAMPING</i> (MT) 14	
2.4.2. MÉTODO DE PLUVIAÇÃO AO AR (AP)	15
2.4.3. MÉTODO DE PLUVIAÇÃO NA ÁGUA	16
2.5. COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS E AMOSTRAS INDEFORMADAS.....	17
2.6. PROCESSOS PARA AVALIAÇÃO DA <i>FABRIC</i> NO ESPECTRO DE COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS	22
2.7. EFEITO DA <i>FABRIC</i> NOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO SIMPLES E CÍCLICO (DSS E CDSS).....	26
3. METODOLOGIA	31
3.1. MATERIAIS.....	31
3.1.1. REJEITO FILTRADO ARENOSO DE MINÉRIO DE FERRO.....	31
3.2. MÉTODOS	35
3.2.1. EXECUÇÃO DE PISTA TESTE E AMOSTRAGEM.....	36
3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO FILTRADO ARENOSO DE MINÉRIO DE FERRO	43
3.2.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL	43
3.2.4. MÉTODO DE <i>MOIST TAMPING</i> PARA RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS DEFORMADAS COMPACTADAS EM LABORATÓRIO	43
3.2.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO CONFINADA.....	45
3.2.6. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA	46
3.2.6.1. ENSAIO DE CISLHAMENTO DIRETO SIMPLES (DSS)	46
3.2.7. AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DA “ <i>FABRIC</i> ”	49
3.2.7.1. POROSIMETRIA POR ADSORÇÃO DE NITROGÊNIO (BET)	49

3.2.7.2. MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA	53
4. RESULTADOS.....	57
4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO COMPLETA	57
4.1.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR SEDIMENTAÇÃO, PENEIRAMENTO	57
4.1.2. ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER	58
4.1.3. ENSAIOS DE LIMITES DE ATTERBERG	59
4.1.4. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECIFICA DOS GRÃOS .	60
4.1.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – PROCTOR NORMAL	61
4.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA	64
4.2.1. ENSAIO DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO 1D - UNIAXIAL	64
4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA.....	68
4.3.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO SIMPLES ESTÁTICO (DSS).....	68
4.4. ENSAIOS PARA ANÁLISE DA FABRIC.....	86
4.4.1. MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)	86
4.4.2. POROSIMETRIA POR ADSORÇÃO DE NITROGÊNIO (BET)	103
5. CONCLUSÕES	109
6. REFERÊNCIAS	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Resumo das amostras coletadas e ensaiadas	41
Tabela 4-1 – Resultados dos ensaios de Limite de Atterberg	59
Tabela 4-2 – Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra AIMC	75
Tabela 4-3 – Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra AIMC.....	77
Tabela 4-4 - Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra ADRMC.....	77
Tabela 4-5 - Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra ADRMC	78
Tabela 4-6 - Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra AIC.....	83
Tabela 4-7 - Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra AIC	84
Tabela 4-8.....	84
Tabela 4-9 - Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra ADRC	84
Tabela 4-10 - Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra ADRC	85
Tabela 4-11 – Tabela resumo com os resultados de ângulo de atrito de pico mobilizado para as amostras ensaiadas no ensaio DSS.....	85
Tabela 4-12 – Distribuição em massa dos minerais nas amostras ensaiadas	102
Tabela 4-13 – Resultado do ensaio de Porosimetria por Adsorção de Nitrogênio, em amostras reconstituídas e indeformadas coletadas na pista teste compactada	104
Tabela 4-14 - Resultado do ensaio de Porosimetria por Adsorção de Nitrogênio, em amostras reconstituídas e indeformadas coletadas na pista teste medianamente compactado	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Empilhamento de rejeito. Fonte: (Santos, 2022).....	8
Figura 2-2 – Relação feita entre média de precipitação por taxa de produção, para o projeto da mina Pagino, comparando com outros projetos existentes. Fonte: (Alves, 2020)	9
Figura 2-3 – Esquema representativo do filtro a disco. Fonte : (Alves, 2020)	10
Figura 2-4 – Comparação do gráfico de tensão cisalhante versus deformação entre amostras de 75 e 54 mm de diâmetro versus amostra de bloco, com 20 cm de diâmetro, da argila de Onsøy, mostrando a qualidade superior do resultado da amostra coletada em bloco indeformado. Fonte: (Lade, 2016)	12
Figura 2-5 – Ilustração de preparação de amostra por meio do método de moist tamping , mostrando a compactação realizada nas camadas inferiores do corpo de prova. Fonte : Adaptado de (Jefferies & Been, 2016).....	15
Figura 2-6 – Esquema simples para um pluviador de areia tradicional. Fonte : (Milonas, 2006)	16
Figura 2-7 – Croqui do aparelho usando para determinação de umidades e densidades. Fonte: (Milonas, 2006)	17
Figura 2-8 – Curvas de compressibilidade isotrópica para três tipos de rejeitos, amostras reconstituídas por <i>Moist Tamping</i> . Fonte: (da Fonseca, et al., 2022)	19
Figura 2-9 – Resultados de ensaios triaxiais drenados gráficos de tensão desviadora e deformação volumétrica por deformação axial, com amostras preparadas pelos métodos de pluviação a água (WP), pluviação a ar (DP), Moist Tamping (MT) e Dry Tamping (DT). Fonte : (Raghunandan et. al, 2012)	21
Figura 2-10 – Curvas de índice de vazios por tensão vertical efetiva, para a amostra indeformada de areia siltosa (ECAS_I-1 e ECAS_I-2) e amostra remoldada ECAS_R-1. Fonte : (Montemezzo, 2005)	22
Figura 2-11 - Curvas de índice de vazios por tensão vertical efetiva, para a amostra indeformada de argila siltosa (ECARG_I-1 e ECARG_I-2) e amostra remoldada ECARG_R-1. Fonte : (Montemezzo, 2005)	22
Figura 2-12 – Amostra de rejeito seco PA MFT apresentando vazios (coloração falsa) em regiões selecionadas, em uma ensaio de tomografia computadorizada baseada em sincrotron. Fonte: (Boxil, 2016)	24
Figura 2-13 - Representação das curvas de tensão deformação para areais siltosas em estado fofo, para os métodos de pluviação de água (WP) e compactação por soquete (MT). Fonte: (Vaid, Sivathayalan, & Stedman, 1999) (modificado).....	25

Figura 2-14 – Comportamento de duas amostras de areias durante o ensaio de CDSS, realizado com um CSR de 0,25 – Fonte : (Wei & Wang, 2016)).....	27
Figura 2-15 -: Gráfico para classificação de partículas, de acordo com critérios de “arredondamento” e “esfericidade”. Fonte : (Cappellaro, 2019)	29
Figura 3-1 –Localização do quadrilátero ferrífero no âmbito do território nacional. Fonte : (Ruchkys & Machado, 2012)	31
Figura 3-2 - Curva granulométrica rejeito filtrado arenoso. Ensaio executado em Agosto de 2023. Fonte : o autor	32
Figura 3-3 – Curva granulométrica para o rejeito de deslamagem. Ensaio executado em maio de 2023. Fonte : o autor.....	33
Figura 3-4 – Curva de compactação típica do rejeito de flotação filtrado arenoso, Ensaio executado em maio de 2023. Fonte : o autor.....	34
Figura 3-5 – Fluxograma mostrando a produção do rejeito de flotação, e o seu caminho até a usina de filtragem. Fonte : o autor.....	35
Figura 3-6 Equipamentos de espalhamento do rejeito (trator Bulldozer) e caminhão rodoviário para transporte do material. Fonte : o autor	37
Figura 3-7 – Croqui pista teste construída na pilha de rejeitos Cianita. Fonte : o autor	38
Figura 3-8 Equipamentos para transporte (caminhão fora de estrada), espalhamento (trator Bulldozer), compactação (rolo compactador) para as atividades relacionadas a disposição do rejeito filtrado. Fonte: o autor	38
Figura 3-9 – Amostra indeformada coletada em campo na pista teste do rejeito filtrado de flotação. Fonte: o autor.....	39
Figura 3-10 – Fluxograma para ensaios realizados com as amostras coletadas na Pista teste A – Medianamente Compactada	40
Figura 3-11 - Fluxograma para ensaios realizados com as amostras coletadas na Pista teste B – Compactada.....	41
Figura 3-12 – Etapa de preparação do corpo de prova para ensaios de DSS e adensamento, mostrando o arrasamento da amostra na quarta camada. Fonte: o autor.....	44
Figura 3-13 – Amostra reconstituída pelo método de <i>Moist Taimping</i> , para utilização nos ensaios de MEV e Porosimetria por Intrusão de Nitrogênio. Fonte: o autor.	45
Figura 3-14 – Imagem mostrando a aplicação de força vertical atuante sobre um corpo de prova com base fixada. Fonte : (Cappellaro, 2019)	47
Figura 3-15 – Aparelho para execução dos ensaios DSS, Laboratório de Geotecnia, Vale, CDM .– Fonte : o autor	48

Figura 3-16 – Esquema ilustrativo para o ensaio cisalhamento direto simples estático, mostrando a posição das placas e aplicação da tensão normal , para carregamento. Fonte : (Neves, 2016)	49
Figura 3-17 – Retirada de pequena “lasca” de um dos corpos de prova a serem ensaiados, indicada pelo circulo vermelho, para posicionamento no porta-amostras. Fonte : o autor.....	51
Figura 3-18 – Pesagem da amostra de rejeito de flotação. Fonte: o autor	51
Figura 3-19 – Porosímetro por adsorção de nitrogênio. Fonte: o autor	52
Figura 3-20 - Evolução de cada estágio do teste de porosimetria. Fonte:Adaptado (Kerce, 2024).	52
Figura 3-21 – Processo de carbonização da amostra para execução do ensaio MEV por meio da evaporadora de carbono. Fonte: o autor	54
Figura 3-22 – Posicionamento das seções polidas para identificação e organização, etapa anterior ao posicionamento das amostras no MEV. Fonte : o autor.	54
Figura 3-23 – Seções polidas após aplicação de resina, posicionadas no equipamento para ensaio MEV. Fonte : o autor	55
Figura 3-24 - MEV FEI Inspect F50 – Laboratório de mineralogia Vale – Fonte: o autor	55
Figura 4-1 - Curva de distribuição granulométrica – granulometria por sedimentação, peneiramento	58
Figura 4-2- Curva de distribuição granulométrica – granulometria a Laser	59
Figura 4-3 – Resultados de ensaio para determinação da massa específica dos grãos	61
Figura 4-4 – Curva de compactação para amostra deformada, coletada no trecho compactado	62
Figura 4-5 - Curva de compactação para amostra deformada, coletada no trecho medianamente compactado.....	63
Figura 4-6 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho compactado..	65
Figura 4-7 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho compactado- Índice de vazios normalizado	65
Figura 4-8 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho medianamente compactado.....	67
Figura 4-9 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho medianamente compactado- Índice de vazios normalizado	67
Figura 4-10 – Ilustração dos diferentes comportamentos mecânicos associados a um solo, destacando ocomportamento “ <i>Quasi-Steady State</i> ”, identificado como “QSS”, em ambos os	

gráficos de tensão cisalhante versus deformação, à esquerda, e o gráfico de trajetória de tensões, à direita. Fonte : modificado por (Sarkar et al., 2019)	70
Figura 4-11 – Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste medianamente compactada (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 50, 100 e 200 kPa.....	72
Figura 4-12 - Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste medianamente compactado (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 400 e 800 kPa.....	72
Figura 4-13 – Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho medianamente compactado (deformada reconstituída e indeformada).....	74
Figura 4-14 - Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho medianamente compactado (deformada reconstituída e indeformada), em função da tensão vertical normalizada	75
Figura 4-15 - Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste compactada (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 50, 100 e 200 kPa.	79
Figura 4-16 - Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste compactada (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 400 e 800 kPa.	80
Figura 4-17 - Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho compactado (deformada reconstituída e indeformada)	81
Figura 4-18 - Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho compactado (deformada reconstituída e indeformada), em função da tensão vertical normalizada	82
Figura 4-19 – Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIC	87
Figura 4-20 – Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIC	89
Figura 4-21 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRC.....	90
Figura 4-22 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRC.....	91
Figura 4-23 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIMC	92
Figura 4-24 – Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIMC.....	93
Figura 4-25 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRMC	94
Figura 4-26- Comparativo entre as imagens geradas para a amostra ADRC, à esquerda, e amostra ADRMC, à direita,.....	94
Figura 4-27 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRMC	95

Figura 4-28 – Comparativo entre imagem de amostra deformada reconstituída (à esquerda) e indeformada (à direita), pista teste medianamente compactada.....	96
Figura 4-29 Comparativo entre imagem de amostra deformada reconstituída (à esquerda) e indeformada (à direita), pista teste compactada	97
Figura 4-30 – Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIC	98
Figura 4-31 – Detalhe- Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIC	98
Figura 4-32 – Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIMC	99
Figura 4-33 Detalhe - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIMC	99
Figura 4-34 – Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRC	100
Figura 4-35 Detalhe - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRC....	100
Figura 4-36 - Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRMC	101
Figura 4-37 - Detalhe - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRMC	101
Figura 4-38 Distribuição da massa, em porcentagem, dos minerais nas amostras ensaiadas	103
Figura 4-39 – Curva de volume acumulado e fração de volume para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, relativas ao trecho compactado (amostras AIC e ADRC)....	105
Figura 4-40 - Curva de volume acumulado e fração de volume para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, relativas ao trecho medianamente compactado (amostras AIMC e ADRMC)	105
Figura 4-41 – Frequência relativa ao volume acumulado dos poros – Rejeito filtrado arenoso	106
Figura 4-42 - Frequência relativa ao diâmetro determinado para os poros – Rejeito filtrado arenoso	107
Figura 4-43 – Isoterma de adsorção / dessorção de Nitrogênio	108

LISTA DE ABREVIACÕES

Abreviação	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BET	Brunauer, Emmett e Teller
BJH	Barrett, Joyner e Halenda
DP	<i>Dry Pluviation</i>
Fe	Ferro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MT	<i>Moist Tamping</i>
WP	<i>Water Pluviation</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
AIC	Amostra Indeformada Compactada
ADRC	Amostra Deformada Reconstituída Compactada
ADPMC	Amostra Deformada Reconstituída Medianamente Compactada
AIMC	Amostra Indeformada Medianamente Compactada

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
d	Diâmetro
e	Índice de vazios
e_{min}	Índice de vazios Mínimo
$e_{máx}$	Índice de vazios Máximo
G_s	Densidade real dos grãos
g	Aceleração da gravidade
V_t	Volume total
ρ_d	Massa específica seca do solo
ρ_s	Massa específica dos grãos de solo

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A crescente demanda nacional e internacional pelo minério de ferro, matéria prima fundamental para inúmeras indústrias de produção de bens de consumo, fez elevar substancialmente a produção do mesmo no Brasil, conseqüentemente aumentando de forma exponencial a geração de rejeitos, oriundos do processo de beneficiamento mineral a úmido do minério de ferro. É importante ressaltar que o processo de beneficiamento a seco não gera rejeitos, porém, no Brasil, a maioria das operações envolvem o processo de beneficiamento a úmido.

O estado de Minas Gerais foi palco, desde a década de 1970, de construções de um grande número de barragens para contenção de rejeitos (Marçal, 2020). Tais estruturas se concentram na região do Quadrilátero Ferrífero, a qual possui uma expressiva importância na economia estadual, sendo protagonista na produção de minério de ferro no Brasil, ao lado das operações do estado do Pará.

Dado os dois últimos acidentes de barragens ocorridos no Brasil, o primeiro em 2015, na barragem de Fundão, pertencente à mineradora Samarco, em Minas Gerais, quando aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram depositados no meio ambiente, contaminando cursos d'água à jusante da estrutura e atingindo em torno de 1.5 hectares de vegetação (Lopes, 2021). O segundo acidente veio a ocorrer em 2019, na barragem B1, pertencente à mineradora Vale, também em Minas Gerais, onde tivemos, após a ruptura da estrutura, o lançamento de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito ao meio ambiente, ocasionando a morte de mais de 200 pessoas que estavam a jusante do maciço (Lopes, 2021).

Dessa forma, faz-se necessário a pesquisa por métodos mais seguros de disposição de rejeitos. Dentre as metodologias aplicadas pela indústria da mineração, o empilhamento de rejeitos filtrados vem se mostrando bastante seguro, por não apresentar um reservatório e ter um rigoroso controle tecnológico por trás de sua construção. Apesar disso, rupturas nos taludes de face da pilha ainda podem ocorrer, como ocorreu em janeiro de 2022 na Mina de Pau branco, Minas Gerais, onde a face de estéril de uma pilha de disposição de estéril e rejeitos da mineradora e siderúrgica francesa Vallourec rompeu após elevados índices pluviométricos serem registrados na região em 24 horas.

A mecânica dos solos nos estados críticos atualmente é a abordagem que vem sendo estudada para aprimorar o conhecimento geotécnico acerca deste método de disposição de rejeitos, objetivando analisar o comportamento mecânico dessas estruturas de disposição. Visando alcançar os parâmetros de modelos que fazem uso dessa abordagem, que serão utilizados no desenvolvimento de projetos destas estruturas e do monitoramento da operação da mesma, torna-se necessário a realização de ensaios de laboratório com, preferencialmente, amostras indeformadas do rejeito. Uma vez que a atividade de coleta de uma amostra indeformada de materiais arenosos no campo pode se tornar complexa e de difícil execução, e a consequente incerteza da qualidade da amostra extraída, é necessária a coleta de amostras deformadas e a posterior a moldagem de corpos de prova em laboratório. Diante desta necessidade, existem diferentes métodos de moldagem de amostras em laboratório, tais como o método de “*Moist Tamping*” ou compactação por soquete, “*Water Pluviation*”, ou pluviação a água, “*Air Pluviation*”, ou pluviação a ar e “*slurry deposition*”, ou deposição em polpa, os quais possuem grande influência nos resultados desses ensaios, como explorado por alguns autores ((Corrêa M. , 2018), (Ladd, 1978), (Vaid, Sivathayalan, & Stedman, 1999)).

Dentre os diversos métodos de modelagem, a técnica “*moist tamping*”, ou compactação com soquete, embora seja uma das mais usadas na moldagem de corpos de prova de rejeitos provenientes da mineração, encontram-se poucos estudos que avaliam a efetividade desse método em reproduzir de maneira confiável e auditável o comportamento mecânico de amostras de rejeito previamente compactadas em campo.

Assim, esta pesquisa traz uma relevância importante para os estudos do comportamento de rejeitos filtrados em empilhamentos de rejeitos, avaliando de maneira detalhada o método de modelagem de corpos de prova “*moist tamping*” em laboratório e associando o mesmo às amostras indeformadas de campo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo desse estudo inclui a avaliação do método de reconstituição de corpo de prova denominado “*Moist Tamping*” em amostras deformadas coletadas em campo, com a intenção de analisar se este fornece resultados de ensaios especiais similares àqueles performados com

amostras indeformadas coletadas em pistas testes de um empilhamento de rejeito filtrado de minério de ferro.

Com base no objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar curvas tensão deformação em ensaios de cisalhamento cíclico direto (DSS) de amostras compactadas em laboratório pela técnica “*Moist Tamping*” com as curvas obtidas a partir de amostras indeformadas coletadas na pilha teste, verificando e comparando as propriedades físico-mecânicas do rejeito nos resultados obtidos;
- Avaliar e comparar a compressibilidade do rejeito ensaiado por meio de ambas as amostras deformadas e indeformadas, a partir de ensaios de adensamento;
- Comparar e avaliar os resultados de ensaios que determinam a *fabric* do rejeito de minério de ferro, como a Microscopia Eletrônica de Varredura e a Porosimetria por Adsorção de Nitrogênio.
- Avaliar e comparar os resultados de amostras coletadas em pistas teste construídas com diferentes equipamentos de terraplenagem (uma pista somente com uso do trator de esteira e uma segunda pista aplicando também a energia vibratória de um rolo compactador liso), e avaliar os resultados obtidos para ambas as pistas testes.
- Avaliar os principais fatores que podem vir a distorcer os resultados apresentados pelo método de moldagem “*Moist Tamping*”.

1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida ao longo de 5 capítulos, descritos de forma resumida neste item 1.3.

Para o capítulo 1 foi apresentado a relevância e justificativa da pesquisa, além do objetivo geral e específicos a serem alcançados com o trabalho.

Ao longo do capítulo 2, foi desenvolvida a revisão bibliográfica, contemplando temas relevantes para o correto desenvolvimento desta pesquisa, trazendo uma ótica importante sobre os rejeitos no âmbito da mineração, a produção de rejeitos filtrados no contexto da disposição

de rejeitos, os distintos métodos de reconstituição de amostras deformadas em laboratório e o efeito da *fabric* para comparação dos corpos de prova moldados por meio dos distintos métodos de reconstituição, além da análise do efeito da *fabric* em resultados de ensaios de cisalhamentos direto simples cíclicos.

Para o capítulo 3, foi mostrado em detalhes o programa de ensaios proposto para esta pesquisa, além de contemplar e trazer informações importantes sobre o material utilizado para a execução dos ensaios. Todos os aspectos relativos a preparação dos corpos de prova, coleta de amostras indeformadas, informações de equipamentos e procedimentos foram discutidos nesta seção.

Ao longo do capítulo 4, tem-se todos os resultados oriundos dos ensaios programados para esta pesquisa, contemplando a análise da *fabric* do rejeito filtrado de minério de ferro e definição de parâmetros mecânicos do referente material. São também apresentados os gráficos referentes aos resultados dos ensaios mecânicos.

Por fim, o capítulo 5 discorre sobre as conclusões alcançadas por meio da interpretação dos resultados dos ensaios e análise teórica. É também definida quais são as recomendações para o contínuo desenvolvimento de pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o capítulo de revisão bibliográfica, será mostrado e pontuado a fundamentação teórica para o progresso do desenvolvimento do tema, por meio de literatura publicada nacionalmente e internacionalmente, devidamente referenciadas. Primeiramente, são definidos tópicos gerais sobre a mineração de ferro no Brasil, e na sequência, é contextualizada a produção de rejeito filtrado no âmbito global. Por fim, é discutida a análise da *fabric* no contexto dos diferentes métodos de reconstituição de amostras deformadas em laboratório, e também o efeito da *fabric* no resultado de ensaios de cisalhamento direto simples cíclico.

2.1. MINERAÇÃO DE FERRO NO BRASIL

Segundo o Plano Nacional de Mineração 2050(PNM 2050), o setor mineral contribui, para a economia do país, com R\$ 339 bilhões de faturamento e e 29 % das exportações oriundas do Brasil (Energia, 2021), sendo protagonista de entorno de 90% de matérias primas minerais exportados, em valor. O Brasil possui a China como uma de seus principais parceiros econômicos na balança de exportação destes bens e importação de demais produtos fabricados no país.

O minério de ferro, para que alcance seu formato final de venda (um exemplo seria o *pellet feed*), deverá vencer uma série de etapas dentro de uma usina de tratamento de minério, as quais comumente chamamos de processo de beneficiamento mineral. Primeiramente, tem-se as etapas de cominuição do ROM (*Run of Mine*) para redução do diâmetro dos grãos: britagem e moagem. Posteriormente, o minério passa pelas fases de peneiramento, onde ocorre a separação por tamanhos de partículas, e classificação (ciclonação ou classificação em espiral).

Em uma próxima etapa, ocorrem os processos de concentração, que podem ser de forma gravimétrica, magnética, eletrostática ou de flotação). Após a finalização da concentração, o minério irá passar por espessadores, realizando em seguida a filtragem do produto, e a secagem do material. O rejeito é então gerado ao final do processo de beneficiamento do minério.

Os processos citados neste documento relativos ao beneficiamento mineral possuem como objetivo alterar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais ou a forma, podendo até sofrer até alterações granuloquímicas, que podem ser ocasionadas da

decomposição térmica ou de reações típicas geradas pela presença do calor nos processos de gravimetria, separação magnética, dentre outros (Luz et. al., 2010).

Segundo Carneiro (2020) a geração e produção de rejeitos, que tem sofrido forte aumento em larga escala, devido à crescente demanda por produção de minério (matéria prima) em escala global, demanda a construção de barragens para armazenamento deste material. Porém, caso erguida de maneira não condizente com as regras de segurança e projeto, essas estruturas podem apresentar um forte risco para a sociedade, economia e meio ambiente.

No ano de 2015 ocorreu um grave acidente envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, localizada em Mariana, no Estado de Minas Gerais, responsável pelo armazenamento de 55 bilhões de litros de rejeitos. A ruptura do maciço levou ao lançamento de rejeitos de minério de ferro ao meio ambiente, contaminando a biota, interrupção do abastecimento de água na região e deixando um total de 19 mortos e um desaparecido. Devido às significativas proporções do desastre, o acidente teve influência na promulgação e divulgação da portaria do Departamento Nacional de Produção Mineral, hoje Agência Nacional de Mineração (ANM), nº 70.389, tornando as atividades de exploração mineral no Brasil mais rígidas (Brandão, 2019).

Já em 2019 teve-se o maior acidente com barragens de rejeito se tratando em número de mortes no Brasil. Tratava-se da barragem B1, localizada da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, também em Minas Gerais, a qual a sua ruptura causou o lançamento de rejeitos, ao meio ambiente, e atingindo em poucos minutos o refeitório do complexo, deixando um total de 246 mortos e ainda 5 desaparecidos (Brandão, 2019).

Tomando como exemplo os últimos acidentes ocorridos no Brasil, como apresentado neste documento, faz-se extremamente necessário a pesquisa por métodos mais seguros de disposição e armazenamento de rejeitos. Dentre as metodologias aplicadas pela indústria da mineração, o empilhamento de rejeitos filtrados vem se mostrando bastante seguro, por não apresentar um lago represado e ter um rigoroso controle tecnológico por trás de sua construção.

2.2. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FILTRADOS

A tecnologia da filtragem de rejeitos no Brasil vem sendo empregada com uma frequência cada vez mais elevada, para a construção de empilhamentos de rejeitos, uma vez que vem se

demonstrando ser uma tecnologia bastante segura e eficaz, desde que sejam utilizados corretamente os métodos construtivos e aplicado um rigoroso controle de qualidade para assegurar que os parâmetros geotécnicos de construção estão atingindo valores adequados e dentro de especificação técnica (mais comumente o grau de compactação referente a energia especificada de Proctor e o valor de desvio de umidade).

De acordo com (de Souza et al., 2023), o método empregado na filtragem dos rejeitos consiste no desaguamento dos mesmos, reduzindo o teor de água e formando uma “torta” do material. Desta maneira, reduz-se o risco de contaminação do solo e da água, o que contribui para a preservação do meio ambiente, além de ocupar uma área significativamente menor se comparado a um reservatório de barragens de armazenamento de rejeitos convencionais.

Segundo (de Souza et al., 2023), alguns elementos influenciam na performance da filtragem do rejeito, que ocorre por meio da utilização de filtros responsáveis pelo desaguamento do material. Dentre estes elementos, cita-se: a caracterização geotécnica deste material, o tipo de equipamento utilizado e a composição mineralógica do rejeito. Dessa maneira, é importante destacar que, além do alto custo associado ao processo de filtragem, cada tipo de rejeito irá performar de uma forma distinta durante o processo de filtragem, o que torna mais difícil a elaboração de um modelo mais amplo para esta metodologia.

De acordo com (Santos, 2022), a utilização da metodologia de rejeitos filtrados é uma prática já difundida nas operações de minas na região do deserto do Atacama, uma vez que o clima árido permite a disposição do rejeito filtrado em uma umidade acima da umidade ótima, o que aumenta a eficiência do processo de filtragem (maiores valores de umidade da torta são aceitos). Ainda segundo a autora, em regiões de clima tropical, como Minas Gerais, as precipitações recorrentes podem dificultar o processo de espalhamento e compactação do rejeito, já que poderá ocorrer o aumento da umidade do material no momento da disposição na pilha de rejeitos.

Ainda segundo (Santos, 2022), algumas das principais vantagens para a utilização do método da filtragem em comparação com a disposição convencional de rejeitos em barragens consiste na possibilidade do reuso da água resultante do processo de desaguamento da filtragem, para a usina de beneficiamento, e redução da área destinada para disposição. Como desvantagem, destaca-se o elevado orçamento para construção da planta de filtragem e custos relacionados ao

transporte e disposição. Apesar deste custo elevado, a autora observa que os mesmos são amortizados na etapa de desativação, uma vez que a recuperação da área se torna simples, sendo realizada de forma progressiva, por meio da implantação de coberturas temporárias, além da vegetação implantada na superfície da pilha de rejeitos, o que dificulta o processo de erosão por intemperismo. A Figura 2-1 mostra a formação de uma pilha de rejeitos, onde é possível verificar o basculamento do rejeito pelo caminhão rodoviário.



Figura 2-1 – Empilhamento de rejeito. Fonte: (Santos, 2022)

Segundo (Alves, 2020), para algumas operações de mina localizadas no Chile, devido a necessidade de conservação da água em ambientes áridos para a utilização no processo de beneficiamento, e a necessidade de encontrar tecnologias de disposição que garantisse uma estabilidade sísmica aprimorada, devido ao alta frequência de eventos sísmicos na região, tornou-se de muita importância o desenvolvimento de tecnologias que pudessem desaguar o rejeito, visando o reaproveitamento da água, e que imprimisse uma melhor estabilidade sísmica. Assim, a tecnologia de filtragem de rejeitos começou a se difundir de forma mais expressiva nesta região.

Ainda segundo (Alves, 2020), é relevante ressaltar a influência do clima na aplicação do método de disposição de rejeitos filtrados. Conforme indicado pela Figura 2-2, a qual apresenta uma comparação de média anual de precipitação e taxa de produção, realizada entre operações de empilhamento de rejeitos filtrados existentes, indicados pela cor azul, e a operação estudada da mina de ouro de Magino, localizada em Ontario, no Canadá, indicada pela cor marrom, é possível observar que, levando em consideração a taxa de produção de rejeitos desta mina, a

média de precipitação anual da região é superior ao limite já executado pelas demais minas que possuem estruturas utilizando o método de disposição de rejeito filtrado. Dessa forma, chegou-se a conclusão que este método, para a mina de Magino, seria viável.

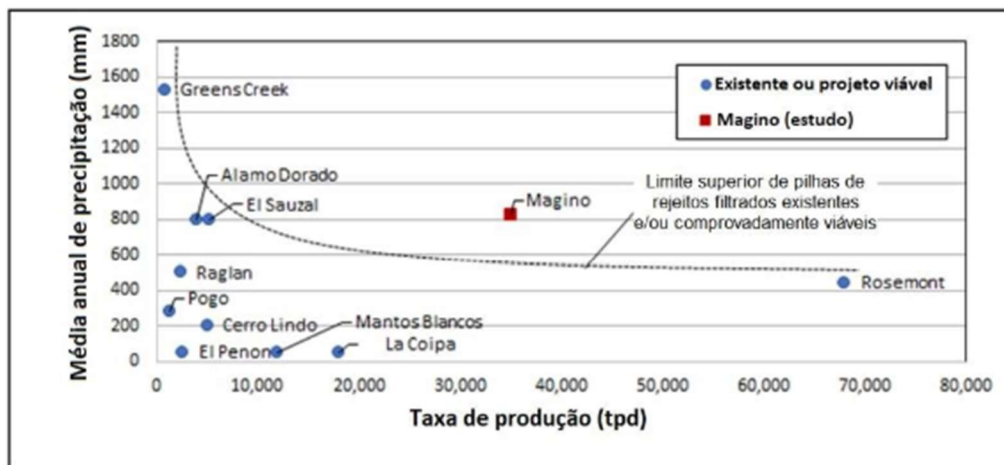


Figura 2-2 – Relação feita entre média de precipitação por taxa de produção, para o projeto da mina Pagino, comparando com outros projetos existentes. Fonte: (Alves, 2020)

Assim, é importante ressaltar a influência do aumento da umidade do rejeito filtrado nas etapas de espalhamento e compactação do material, uma vez que condensa a trafegabilidade das vias. Ademais, um alto nível pluviométrico também necessita de uma implantação de um sistema de drenagem superficial com dimensões mais robustas, demandando manutenções mais frequentes.

Para o empilhamento de rejeitos filtrados comumente são utilizados equipamentos de terraplenagem típicos em áreas mineradoras. Após a construção de cada camada de rejeito filtrado, ocorre o processo de liberação tecnológica da mesma, por meio de execução de ensaios de aferição de compactação pelo método de Hilf. Uma vez atingido o grau de compactação e o desvio de umidade solicitados em especificação técnica, a camada é então liberada. É relevante destacar os principais desafios encontrados ao longo do processo construtivo do empilhamento filtrado, como: o excesso de umidade no rejeito na saída da planta de filtragem, o que dificulta o processo de espalhamento e compactação da camada; o tempo para liberação de camadas, que depende dos ensaios de laboratório para verificação, o clima tropical em período chuvoso, ampliando o tempo necessário para secagem do material, e a necessidade de índices de controle e riscos da operação associados a ausência de legislação específica para o método de empilhamento de rejeitos filtrados.

(Alves, 2020) discorre sobre os diferentes tipos de filtros existentes hoje nas operações de filtração de rejeito vigentes no Brasil e no Chile. Dentre eles, o filtro prensa apresenta uma série de placas revestidas com um tecido filtrante, as quais são prensadas para a formação de câmaras entre as placas. A polpa de rejeito, bombeada para o interior das câmaras, é conduzida de encontro às placas, atravessando o elemento filtrante. No momento de separação das placas ocorre a queda da torta de rejeito, já formada, por gravidade.

Já o filtro a disco contém discos conectados a um mesmo eixo comum, o qual é responsável pelo processo filtrante. Este elemento é imerso diretamente na polpa de rejeitos, por meio de uma rotação do eixo central. Na zona de formação da torta, ocorre uma aspiração contínua do rejeito filtrado, o qual é posteriormente descarregado pela ação do sopro de ar comprimido. A Figura 2-3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um esquema representativo do filtro a disco.

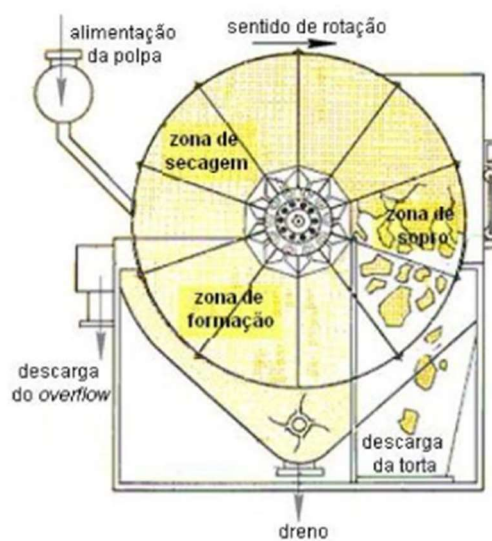


Figura 2-3 – Esquema representativo do filtro a disco. Fonte : (Alves, 2020)

2.3. REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRA INDEFORMADA COMO CONDIÇÃO DE CAMPO

De acordo com (Lade, 2016), para preservar de forma fidedigna as condições de campo e não provocar danos significativos à estrutura do solo, classificando desta forma a amostra como indeformada, as mesmas devem ser seladas de ponta a ponta com objetivo de se evitar qualquer tipo de perda de umidade, que possa levar a secagem da amostra, e evitar processos de oxidação

da mesma. O material de selagem, preferencialmente uma cera composta de parafina e vaselina, é utilizado no topo e base da amostra, para evitar que qualquer parte da mesma esteja desprotegida da entrada de ar.

Esta técnica é tida como válida para amostras indeformadas retiradas em hastes (tubos) de sondagens, que podem ser retiradas com amostradores tipo Denison ou Barrilete Triplo, empregado para a amostragem de solos mais resistentes, em que não se consegue realizar a coleta por métodos de cravação, e amostradores tipo Shelby ou de Parede fina, utilizado para obtenção de amostras indeformadas em solos coesivos, que possuem consistência de mole a média (Aguilar, 2012), e também em formatos de blocos quando passam 20cm de diâmetro. Para essas amostras, que são cravadas diretamente do solo, devem ser enclausuradas com plástico mergulhados na mistura de cera de vaselina e parafina e colocada numa caixa, esta que é então colocada na câmara de umidade. Os amostradores do tipo Denison e Shelby possuem restrições quanto a complexidade do armazenamento da amostra, que pode sofrer grandes perturbações com vibrações, durante o transporte das mesmas, e acondicionamento da forma incorreta (haste posicionada na horizontal). Estes fatores podem prejudicar a qualidade dos ensaios executados com as amostras coletadas através destes métodos.

De acordo com (La Rochelle et al., 1986), é importante preservar a amostra em ambiente com controle de umidade a 90% e temperatura entre 8 e 9°C para que a amostra possa preservar ao máximo seu teor de umidade in situ. (La Rochelle et al., 1986) mostraram que o teor de umidade, os limites de Atterberg e o pH de duas amostras de argilas canadenses não se alteraram sobre um período de 8 anos quando seladas e armazenadas como descrito.

(Lade, 2016) também comparou a relação entre deformação axial e tensão de cisalhante retirada de um ensaio triaxial em dois diferentes tamanhos de amostras indeformadas coletadas em um pistão, da argila de Onsøy, de 7,5 cm e 5,4 cm, e um bloco de 20 cm de diâmetro. A Figura 2-4 mostra os resultados para as três amostras citadas, na qual se pode observar que o resultado da amostra indeformada referente ao bloco produz o resultado mais satisfatório, uma vez que evidencia uma condição mais realista do comportamento do solo no campo, apresentando um pico de tensão cisalhante a uma certa deformação de forma nítida, e, após a mobilização de todo o ângulo de atrito referente a uma tensão cisalhante máxima, observa-se de forma clara a ruptura da amostra, caracterizando um comportamento “*strain-softening*”, comumente encontrado em argilas.

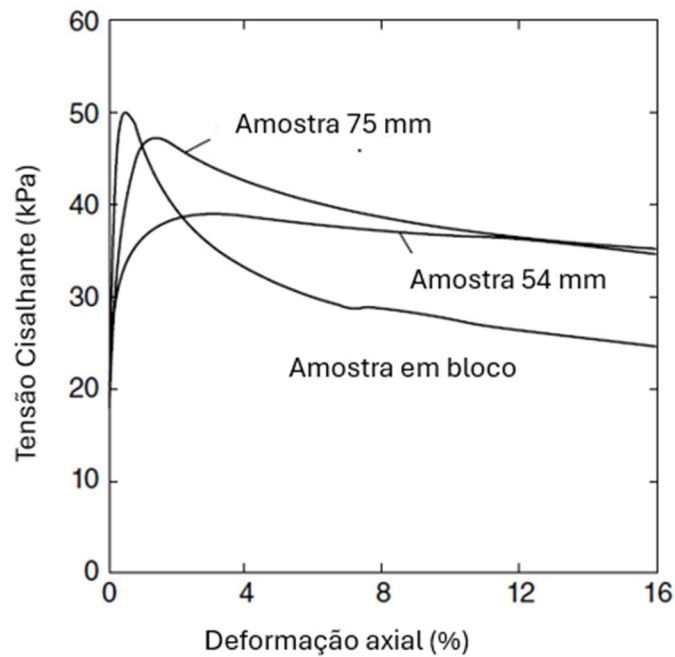


Figura 2-4 – Comparação do gráfico de tensão cisalhante versus deformação entre amostras de 75 e 54 mm de diâmetro versus amostra de bloco, com 20 cm de diâmetro, da argila de Onsøy, mostrando a qualidade superior do resultado da amostra coletada em bloco indeformado. Fonte: (Lade, 2016)

2.4. MÉTODOS DE MODELAGEM PARA RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS EM LABORATÓRIO

Segundo (Milonas, 2006), a dificuldade em se extrair amostras indeformadas no campo para materiais granulares, e a consequente incerteza da qualidade dessas amostras, fomentou-se o desenvolvimento de técnicas de reconstituição para amostras deformadas. Estas técnicas visam simular a ação da natureza dos referidos locais de coleta destes materiais granulares. As técnicas de reconstituição de amostras para este tipo de material mais difundidas são o método de compactação por soquete, *Moist tamping* (ou MT), pluviação ao ar (ou AP) e pluviação a água (ou WP), ou sedimentação.

Os métodos de reconstituição de amostras geram arranjos de partículas e comportamentos mecânicos distintos, valendo apenas ressaltar que os comportamentos podem ser diferentes daqueles a que se querem representar. A pesquisa sobre o comportamento mecânico de areias, e areias contendo relevantes percentuais de finos aumentou principalmente já que são poucos

casos históricos de liquefação ligados a esse tipo de material. (Ladd, 1978), (Vaid & Sivathayalan, 2000).

Para os materiais arenosos com certa parcela de finos, entende-se que a preparação do corpo de prova é de extrema importância pois a estrutura do material pode se tornar o fator determinante para representar seu comportamento. Diferentes métodos de preparação resultam em diferentes estruturas de solos granulares e, conseqüentemente, em diferentes características tensão-deformação de corpos de prova reconstituídos. (Vaid & Sivathayalan, 2000), (Ladd, 1978).

De acordo com (Oliveira, 2022), o histórico de tensões as quais um material já foi submetido, e conseqüentemente a sua consolidação, pode influenciar na mobilização não drenada definida para materiais de matriz arenosa. É necessário que se avalie a influência da anisotropia inerente ao material ensaiado, ou seja, o estado de tensões iniciais *in situ* da amostra, para estudos de comportamento mecânico do material.

Segundo (Silva, 2018), uma amostra de solo pode ser carregado e descarregado de tal maneira que se atinja a tensão de pré -adensamento, definida como sendo a maior tensão à qual o solo já experienciou. Analisando o histórico de tensões, os solos podem ser definidos como normalmente adensados, o qual a tensão de pré adensamento se equivale à tensão efetiva atual aplicada na amostra, e sobreadensados, o qual a tensão efetiva atual será menor do que o valor da tensão de pré adensamento.

É importante destacar que para as amostras reconstituídas existe uma ausência de histórico de tensões aplicadas ao material, já que foram moldados diretamente no laboratório, sendo dessa forma classificadas como normalmente adensadas. Este histórico de tensões associado às amostras reconstituídas pode influenciar nos resultados de ensaios mecânicos e de compressibilidade, uma vez que, quando analisada uma amostra indeformada coletada em campo, a mesma irá apresentar um histórico de tensões atrelado a sua condição *in situ*, podendo ser classificada como pré adensada ou sobreadensada, diferentemente da amostra reconstituída, que é definida como normalmente adensada.

Segundo (Miura e Toki, 1982), a resistência ao cisalhamento estático da areia em uma certa densidade depende majoritariamente das tensões efetivas de confinamento e do método de preparação da amostra.

A homogeneidade da amostra, uniformidade da densidade dos grãos do solo (índice de vazios e/ou porosidade), e grau de saturação são críticos na preparação de amostras de solo para ensaios em laboratório (Corrêa, 2018).

Vale ressaltar o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de reconstituição de amostras, pelos métodos de *Moist Tamping* e Pluviação a água (ou *slurry deposition*), principalmente, pelo Laboratório de Geotecnia da Vale (LGV), localizado no Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM), pertencente à Vale. A preparação das amostras é uma etapa essencial para a correta moldagem das amostras reconstituídas, bem como o emprego de equipamentos, insumos e material corretos para a aplicação das técnicas, utilizadas pelo LGV e que são detalhadas nos itens deste capítulo.

2.4.1. MÉTODO DE COMPACTAÇÃO COM SOQUETE, *MOIST TAMPING* (MT)

Conforme Ladd (1978), o método de amostragem de reconstituição por Compactação Úmida (“*Moist Tamping*”) é descrito como uma prática simples e comum: o material granular úmido (a quantidade de água deve ser controlada) é depositado em um amostrador, camada por camada, aplicando quantidades igualmente pequenas para cada camada. As últimas camadas serão compactadas por um soquete de compactação adequado de laboratório, formando uma composição homogênea e isotrópica.

O teor inicial de umidade deve ser de 5% para areias. Além disso, os procedimentos de compactação são realizados com uma determinada força e frequência antes que a próxima camada seja montada. As densidades relativas podem ser controladas determinando a massa específica e a altura para cada camada. Durante o processo de compressão, todas as camadas abaixo da camada superior estão sendo compactadas. Portanto, as camadas superiores atingirão um grau de compactação inferior em comparação com as inferiores (Ladd, 1978).

O método de MT é apropriado para ensaios com areia, uma vez que contempla corpos de prova com uma gama alta de índices de vazios: com valores mínimos, em que uma elevada aplicação de energia de compactação é necessária, e com estados fofos, permitindo a atuação de forças capilares entre os grãos do solo (Vaid, Sivathayalan, & Stedman, 1999).

A Figura 2-5 apresenta o esquema para moldar um espécime usando o método de compactação úmida, ou “*Moist Tamping*”.

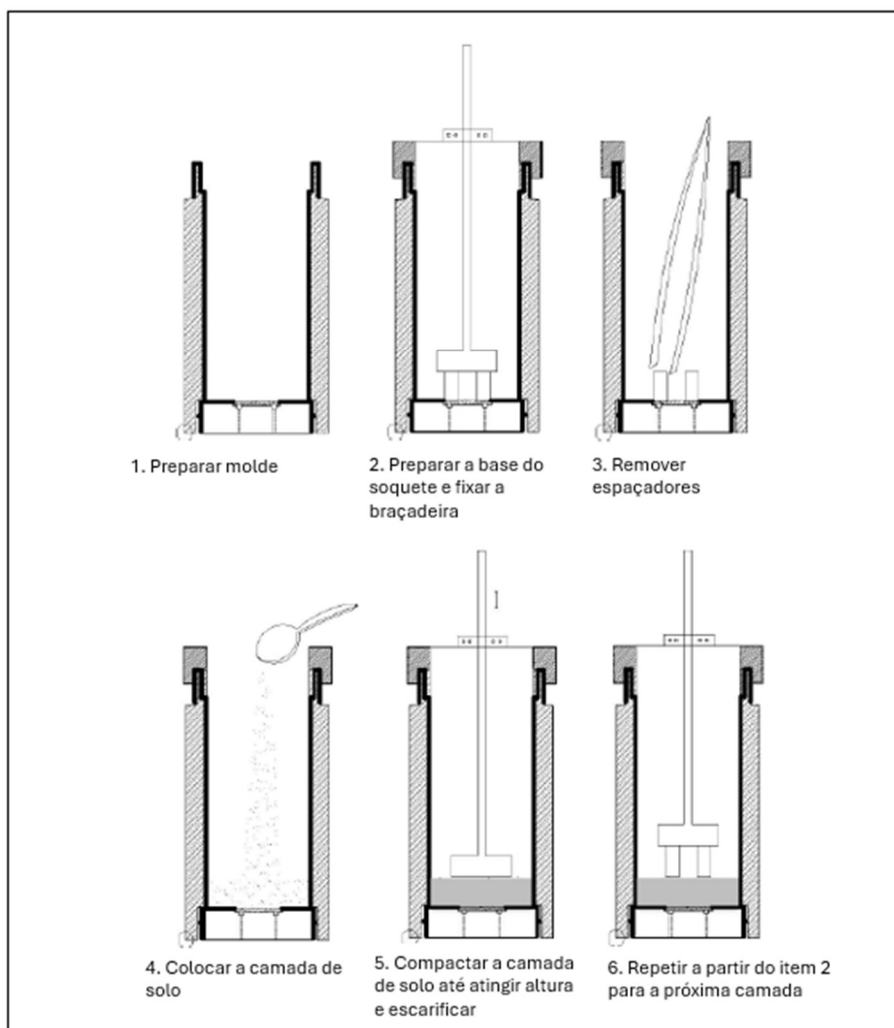


Figura 2-5 – Ilustração de preparação de amostra por meio do método de moist tamping , mostrando a compactação realizada nas camadas inferiores do corpo de prova. Fonte : Adaptado de (Jefferies & Been, 2016)

2.4.2. MÉTODO DE PLUVIAÇÃO AO AR (AP)

De acordo com (Milonas, 2006), no método de Pluviação ao Ar (AP), o material seco é disposto ou “pluviado” a partir de uma certa altura, por meio do uso de um funil que controla a velocidade de deposição do material ensaiado. No caso de materiais granulares, os grãos de areia são lançados no molde da amostra pela gravidade a partir de uma altura de queda que é tida como constante durante a deposição do material. Quando o material ensaiado é bem graduado, este método pode causar um problema de segregação, por não cobrir uma faixa considerável de densidade relativa.

Para o processo de reconstituição de amostras de pequeno porte, utiliza-se pluviadores de areias para a distribuição da areia por gravidade, os quais possuem bocais com diâmetros variáveis. Dessa forma, a chuva de areia é distribuída de forma uniforme sobre a área de moldagem. A Figura 2-5 mostra de forma esquemática um pluviador de areia tradicional.

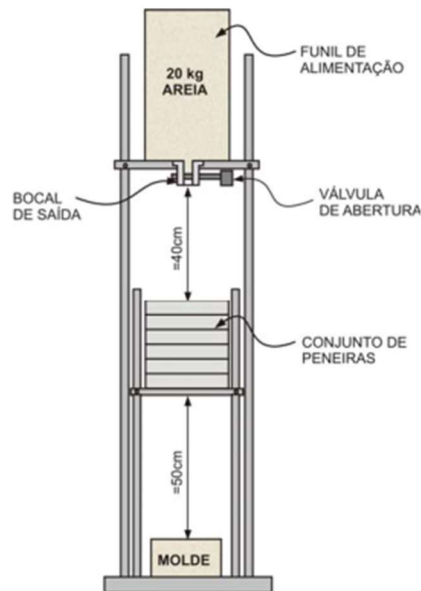


Figura 2-6 – Esquema simples para um pluviador de areia tradicional. Fonte : (Milonas, 2006)

Segundo (Vaid et al., 1999), a altura de queda pode ser modificada para produzir diferentes valores de densidades relativas, que também dependem das taxas de fluxo: vazões de lançamento em massa mais altas (com a mesma altura de lançamento) trazem densidades mais baixas.

2.4.3. MÉTODO DE PLUVIAÇÃO NA ÁGUA

Segundo (Milonas, 2006), o método de pluviação na água consiste na deposição de uma areia saturada em moldes com água deaerada. É importante ressaltar que este método permite a formação de amostras mais fofas, que não dependem de uma altura de queda, uma vez que os grãos atingem a água em baixa velocidade. Pode-se considerar que este método representa a deposição de areias em ambientes aquáticos e aterros hidráulicos.

Normalmente, a areia seca é colocada juntamente com água deaerada em um frasco. Posteriormente, após aplicação de vácuo e altas temperaturas, o conjunto é preenchido por água. Como o molde será preenchido com água deaerada, o frasco é então invertido, viabilizando a

sedimentação da área até finalizar a altura do molde. A Figura 2-7 representa um esquema do aparelho que realiza a pluviação a água.

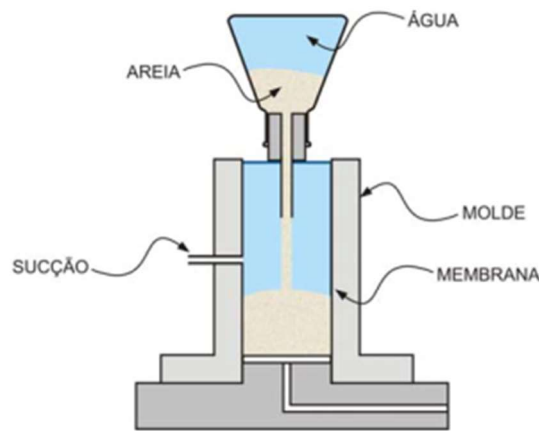


Figura 2-7 – Croqui do aparelho usado para determinação de umidades e densidades. Fonte: (Milonas, 2006)

De acordo com (Milonas, 2006), o método de pluviação a água simula de maneira eficaz a deposição de areias em sistemas aquáticos e aterros hidráulicos de disposição de rejeitos. É importante destacar que, da mesma forma ocorrida no método de pluviação a ar, o método de pluviação a água também apresenta problemas de segregação das partículas.

2.5. COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS E AMOSTRAS INDEFORMADAS

Uma vez que os diferentes métodos de reconstituição de amostras deformadas utilizam de diferentes técnicas para preparação dos corpos de prova, é importante analisar e comparar os resultados de ensaios que avaliam o comportamento mecânico dos mesmos.

Segundo (da Fonseca, et al., 2022), para análise dos rejeitos remanescentes após a ruptura da Barragem B1, em Brumadinho, Minas Gerais, foram determinadas campanhas de coletas de amostras deformadas, reconstituídas em laboratório pelo método de “*Moist Tamping*”, garantindo um estado menos denso para as amostras. Estas campanhas foram elaboradas tendo como base resultados de ensaios CPTu (Cone Penetration Test, com medida de poropressão), em que foram determinados o índice de vazios de campo para moldagem das amostras, e também medidas as velocidades de onda cisalhante (V_s). Os perfis de CPTu e V_s foram

analisados para a tomada de decisão dos pontos de coleta do rejeito, bem como em diferentes profundidades de coleta, uma vez que o rejeito remanescente apresentou uma elevada heterogeneidade e variabilidade em características ao longo da mancha de ruptura.

(da Fonseca, et al., 2022) Também discorre sobre a importância de se testar as amostras indeformadas, para identificar como os resultados de cada camada de rejeito se encaixam no espectro geral da análise, visando constituir de um modelo numérico de análise. Porém, como as amostras indeformadas coletadas para o rejeito da Barragem B1 apresentam uma estratigrafia muito bem definida, com uma série de diferentes tipos de rejeitos com comportamentos específicos e uma distribuição de material individual, a extrapolação para um modelo unificado para cada um destes componentes se torna algo desafiador. Assim, uma identificação de regiões de massas mais homogêneas, por meio dos elementos investigados nos ensaios de CPTu e onda cisalhante, foi realizado, e o material foi coletado para aporte ao laboratório.

Posteriormente, os mesmos autores realizaram ensaios de adensamento oedométrico e adensamento isotrópico conduzido em células triaxiais, com três amostras reconstituídas para tipos distintos de rejeitos (tipo 1, com baixo teor de ferro, tipo2, com teor de ferro intermediário, e tipo 3, com alto percentual de teor de ferro). A Figura 2-8 apresenta os resultados para o ensaio de adensamento isotrópico para as três amostras reconstituídas por “*Moist Tamping*” analisadas. É importante destacar que os ensaios foram realizados em diferentes estágios de adensamento. Além disso, vale mencionar que as células triaxiais estavam equipadas com o ensaio Bender Elements, sendo então possível medir a velocidade da onda cisalhante V_s , e então estimar a variação das pequenas deformações em cada estágio de adensamento. Por fim, velocidades de onda de compressão (V_p) foram realizadas para assegurar as condições de saturação da amostra. (da Fonseca, et al., 2022) conclui a partir dos resultados que os três tipos de rejeitos apresentam compressibilidade e comportamentos distintos.

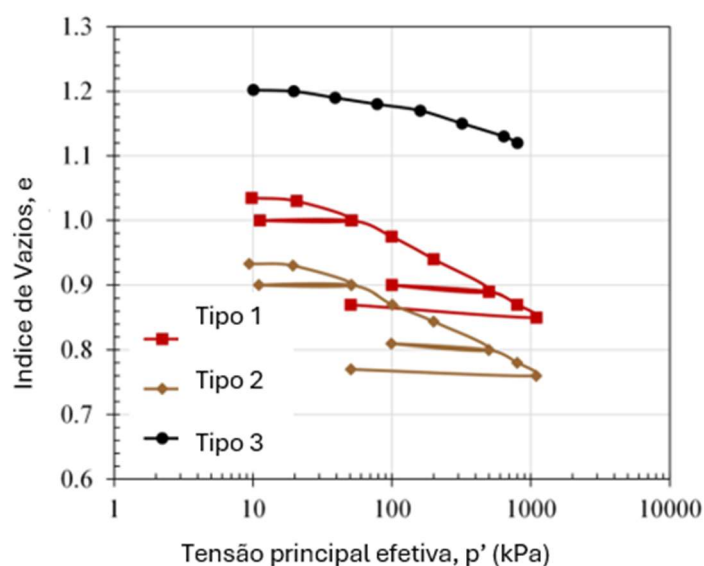


Figura 2-8 – Curvas de compressibilidade isotrópica para três tipos de rejeitos, amostras reconstituídas por *Moist Tamping*. Fonte: (da Fonseca, et al., 2022)

De acordo com (Raghunandan et. al, 2012), o alto custo relacionado a coleta de amostras indeformadas de alta qualidade para materiais granulares fez elevar o número de pesquisas relacionadas a métodos de reconstituição de amostras em laboratório para solos arenosos. Dentre os métodos já citados no item 2.4, dentre eles pluviação a ar e a água, e o método de compactado por soquete (“*Moist Tamping*”), (Raghunandan et. al, 2012) destaca que a taxa de deposição do solo nos diferentes amostradores durante a preparação da amostra afeta diretamente a densidade seca da mesma. Os autores pontuam que a escolha para o método mais ideal para reconstituir amostras de solos arenosos se torna uma tarefa complexa, já que nenhum dos métodos apresentados aparentam ser únicos e exclusivos. Como o processo de preparação é diferente para cada método, os valores de densidade seca e a organização dos grãos será afetada, o que resulta em respostas mecânicas distintas em ensaios laboratoriais.

Segundo (Vaid & Sivathayalan, 2000), amostras de solos arenosos preparadas pelo método de “*Moist Tamping*” e pluviação a ar apresentaram comportamento mecânico similar, “*strain softening*”, quando cisalhados em condição não drenadas, estando claro o alcance de um pico de tensão cisalhante, para uma dada deformação axial, e posteriormente a queda da tensão cisalhante ao longo da execução do ensaio. Porém, as amostras preparadas pelo método de pluviação a água apresentaram um comportamento “*strain hardening*”, onde não se identificava

com clareza um valor máximo para a tensão cisalhante e se observava um aumento da deformação volumétrica, ou dilatância.

(Raghunandan et. al, 2012) realizaram ensaios utilizando areias finas coletadas na cidade de Kutch, Índia. Foram preparadas amostras reconstituídas utilizando os métodos de pluviação a ar, pluviação a água, “*Moist Tamping*” (conduzido com areias parcialmente submergidas) e “*Dry Tamping*” (conduzido com areias secas). Os métodos de “*Moist Tamping*” e “*Dry Tamping*” possuem o mesmo processo de preparação, alterando somente a umidade inicial das amostras. Inicialmente, foi possível observar que os valores de índices de vazios ao final da preparação das amostras, para os métodos de pluviação a ar e a água (0,695 e 0,681; respectivamente), foram relativamente superiores se comparado aos valores de índice de vazios para os métodos de “*Moist Tamping*” (0,605) e “*Dry Tamping*” (0,603). Apesar desta diferença ser normalmente utilizada para avaliar a resposta mecânica dos solos, é importante destacar que as características atreladas a solos densos e fofos também possuem a resposta mecânica relacionada a tensão de confinamento. (Vaid et al., 1999) também discorre sobre o comportamento de areias densas que, quando submetidas a tensões de confinamento elevadas, possuem comportamento similar a argilas normalmente adensadas.

Após avaliação dos índices de vazios, (Raghunandan et. al, 2012) realizaram ensaios triaxiais drenados com as amostras reconstituídas preparadas pelos diferentes métodos citados. A Figura 2-9 apresenta os resultados de tensão desviadora versus deformação axial, e deformação volumétrica versus deformação axial, para todas as amostras ensaiadas a uma mesma tensão principal efetiva de 150 kPa. Por meio dela, é possível observar que os distintos métodos de reconstituição apresentaram tensões de cisalhamento de pico similares, relativos a uma mesma deformação axial, entre aproximadamente 350 kPa para a amostra DP1, e aproximadamente 460 kPa para a amostra DT, a uma deformação axial de em torno de 4,0%. Além disso, observa-se que a amostra reconstituída pelo método de pluviação a água apresentou um comportamento de aumento da deformação volumétrica (comportamento dilatante), enquanto as amostras reconstituídas pelo método de pluviação a ar apresentaram redução da deformação volumétrica. Ambas as amostras ensaiadas pelos métodos de “*Moist Tamping*” e “*Dry Tamping*” apresentaram redução no valor da deformação volumétrica, apresentando um comportamento contrátil.

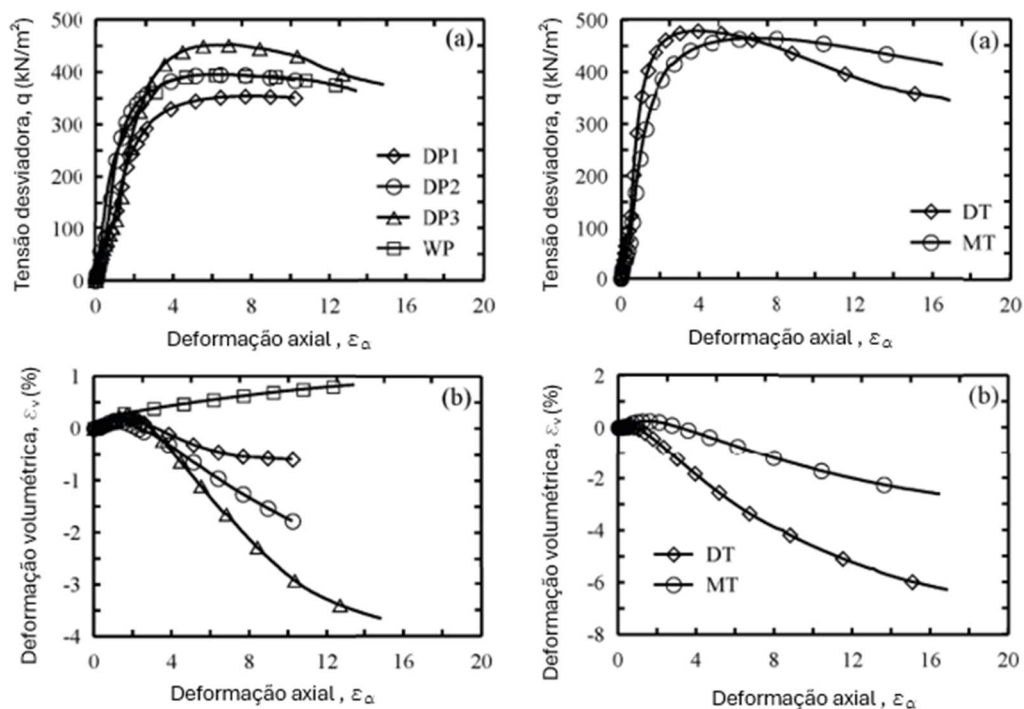


Figura 2-9 – Resultados de ensaios triaxiais drenados gráficos de tensão desviadora e deformação volumétrica por deformação axial, com amostras preparadas pelos métodos de pluviação a água (WP), pluviação a ar (DP), Moist Tamping (MT) e Dry Tamping (DT). Fonte : (Raghunandan et. al, 2012)

(Montemezzo, 2005) realizou em amostras de areia siltosa e de argila siltosa, ambas em condições indeformadas e deformadas remoldadas, ensaios de adensamento convencional, para o desenvolvimento de sua pesquisa relacionada ao ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação, ou ensaio CSR (“*Constant Rate of Strain*”), que possui objetivo de se determinar de forma mais célere as tensões de pré adensamento da amostra. Importante destacar que as amostras deformadas foram remoldadas no interior dos anéis metálicos destinados ao ensaio de adensamento convencional, utilizando um índice de vazios próximo ao encontrado em campo.

Enfatizam-se os resultados encontrados para os ensaios de adensamento convencional, apresentados pela Figura 2-10 (areia siltosa) e pela Figura 2-11 (argila siltosa). Os resultados apontados pela Figura 2-10 mostram que a amostra remoldada no laboratório apresentou ser um pouco menos compressível se comparada com os resultados obtidos pelas amostras indeformadas. Já para as argilas siltosas, apresentada pela Figura 2-11, é possível observar um comportamento oposto, no qual as amostras indeformadas, que foram previamente coletadas

com amostrador Shelby em um furo trado executado em campo, apresentam ser menos compressíveis se comparadas com o resultado da amostra remoldada em laboratório.

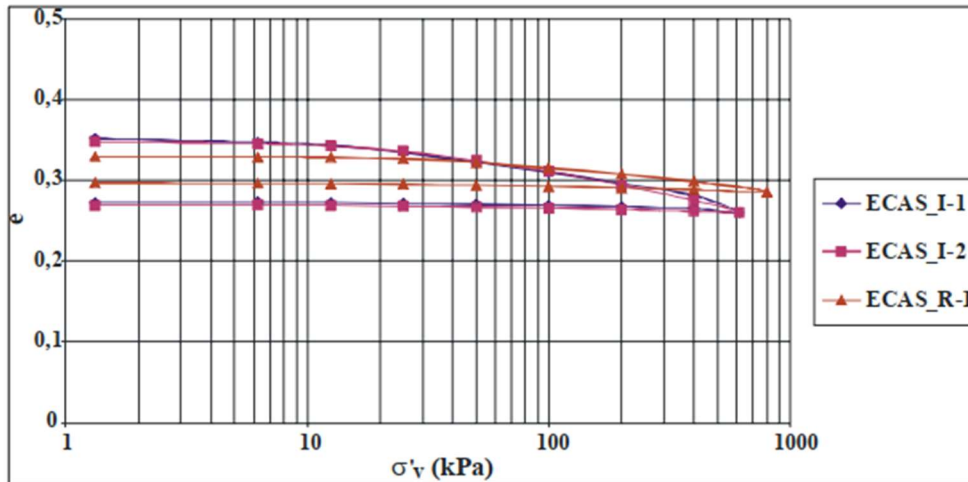


Figura 2-10 – Curvas de índice de vazios por tensão vertical efetiva, para a amostra indeformada de areia siltosa (ECAS_I-1 e ECAS_I-2) e amostra remoldada ECAS_R-1. Fonte : (Montemeyzzo, 2005)

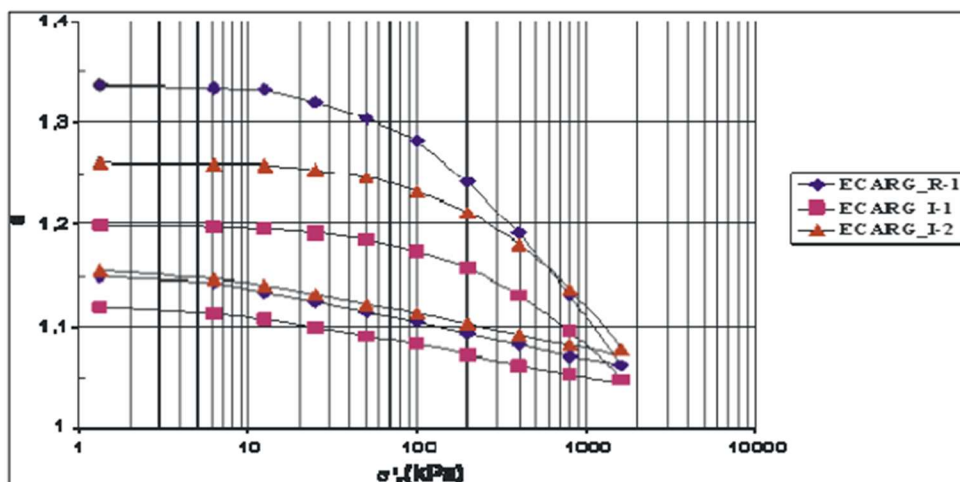


Figura 2-11 - Curvas de índice de vazios por tensão vertical efetiva, para a amostra indeformada de argila siltosa (ECARG_I-1 e ECARG_I-2) e amostra remoldada ECARG_R-1. Fonte : (Montemeyzzo, 2005)

2.6. PROCESSOS PARA AVALIAÇÃO DA *FABRIC* NO ESPECTRO DE COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS

O termo “fabric” faz referência ao conjunto de partículas, espaços e poros que estão presentes no solo (Mitchell & Soga, 2005). Já a definição de estrutura pode ser dada pelo efeito combinado da “fabric”, composição e forças intermoleculares do solo. O conhecimento de associações de partículas em suspensão é um dos pontos principais para entender como a “fabric” de um solo é formada e como ela é modificada ao longo do tempo. Os elementos de “fabric” podem ser divididos em três grupos: arranjo de partícula elementar, arranjo de partículas e espaços de poros.

A mecânica dos solos e propriedades hidráulicas para uma determinada amostra dependem de três níveis de escala apropriadas para a “fabric” do solo: “microfabric”, “minifabric” and “macrofabric”, onde por exemplo, a condutividade hidráulica irá ser representada pela macro e “minifabric”, e as deformações que ocorrem ao longo do tempo, como o adensamento secundário, são controladas pela “microfabric”.

Para solos e materiais granulares, como materiais com matrizes arenosas, existem alguns estudos que mostram que, para um determinado tipo de solo sem coesão, podem se encontrados diferentes tipos de “fabric” para o mesmo índice de vazios ou densidade relativa. A caracterização desta “fabric” pode ser feita se baseando nas formas dos grãos, orientações dos grãos e orientação do contato intermolecular. A orientação dos grãos pode ser descrita pela inclinação do eixo da partícula em relação a um eixo orientativo. (Mitchell & Soga, 2005). É importante observar que o material a ser discutido no item 3.1 desta dissertação aborda uma amostra predominantemente areno-siltosa. Dessa forma, é importante analisar a diferença da “fabric” para índices de vazios iguais e métodos de reconstituição de amostras distintos, além da comparação com amostras indeformadas que contenham o mesmo índice de vazios.

Segundo (Boxil, 2016), para a correta análise da *fabric* do rejeito fino com adição de polímero aniônico poliacrilamido (PA-MFT), foram realizados ensaios Síncrotron baseado em tomografia computadorizada, onde possível fazer diferenciação por cor amarela dos vazios da amostra úmida. Percebe-se por meio deste ensaio que se trata de um material com grande quantidade de poros e com baixa permeabilidade efetiva.

De maneira conservadora, é possível dizer que a *fabric* do rejeito PA MFT é relativamente densa e pode passar por alterações de volume significativas enquanto água for removida durante processo de evaporação. Imagens Cryro-SEM, mostram que a fabric do PA MFT se torna menos caótica e mais ordenada quando os sólidos floculados na amostra se mantem por um maior período de tempo em condições não drenadas e saturadas. Os ensaios de imagem por

microscopia eletrônica por varredura utilizando um estágio “Cyro” também foi realizado para avaliar a fabric do material.

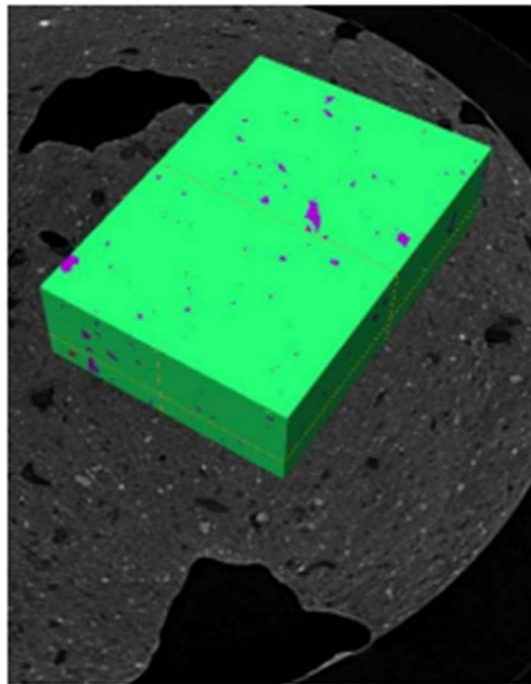


Figura 2-12 – Amostra de rejeito seco PA MFT apresentando vazios (coloração falsa) em regiões selecionadas, em uma ensaio de tomografia computadorizada baseada em sincroton. Fonte: (Boxil, 2016)

Segundo (Corrêa, 2018), os métodos de reconstituição de amostras para areias finas foram criados para fazer simulações da *fabric* nas amostras de solo de acordo com a condição de saturação encontrada no campo. De acordo com (Carraro & Prezzi, 2007), a técnica de “*Slurry Deposition*” permite a sedimentação das partículas da amostra analisada, sendo possível a simulação da *fabric* do material encontrado in situ, o que é fundamental para a análise do potencial de liquefação do solo em estudo.

De acordo com (Zlatovic & Ishiara, 1997) e (Vaid, Sivathayalan, & Stedman, 1999), como apresentado na Figura 2-13, o pico de resistência para ambos os métodos de reconstituição apresentados, sendo o “Water Pluviation” (WP) e “Moist Tamping” (MT), dado o mesmo índice de vazios igual a aproximadamente 0,86 para a moldagem dos corpos de prova nos dois diferentes métodos, é igual. Isso mostra que, apesar da diferença da *fabric* existente entre os dois métodos (como a metodologia de preparação das amostras nos dois métodos é distinto, é alterado o arranjo da estrutura, alterando então a *fabric* da amostra), o valor do pico de resistência não sofre alteração.

Porém, ao analisar o pico de resistência normalizado, após ultrapassado o estado de tensão deformação que está além do valor do pico de resistência, observa-se que há influencia do método de preparação da amostra, pois os valores do pico de resistência normalizado se diverge significativamente quando comparado os dois métodos , WP e MT, variando então de acordo com a variação da fabric (arranjo das partículas) da amostra.

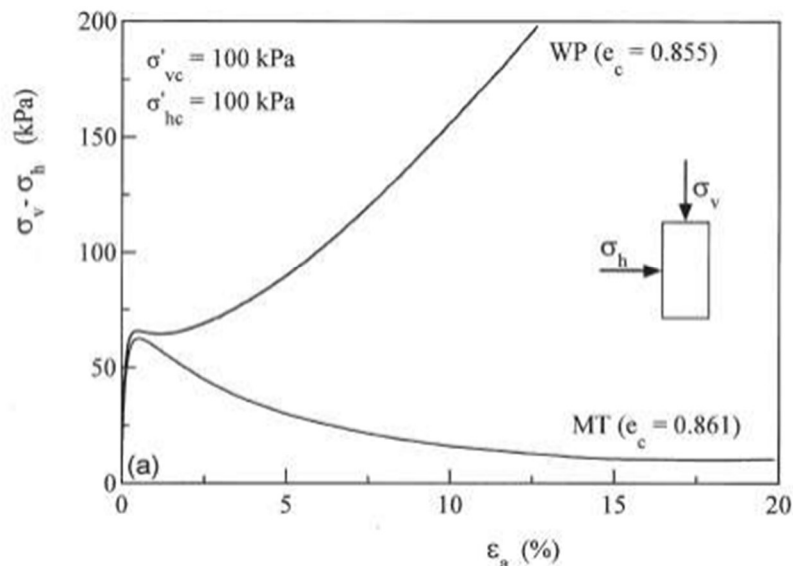


Figura 2-13 - Representação das curvas de tensão deformação para areais siltosas em estado fofo, para os métodos de pluviação de água (WP) e compactação por soquete (MT). Fonte: (Vaid, Sivathayalan, & Stedman, 1999) (modificado)

Segundo (Freire, 2022), o efeito da *fabric* da amostra relacionado ao método de reconstituição, quando levado em consideração deformações superiores a 20%, passa a ser irrelevante. Neste momento, o comportamento do material analisado é regido diretamente pelo índice de vazios.

Observa-se que as distintas metodologias de reconstituição de amostras descritas neste capítulo geram uma estruturação de grãos particular (*fabric*), sendo diferente do arranjo encontrado *in situ*, agindo diretamente no comportamento mecânico do material.

A partir da análise de (Vaid & Sivathayalan, 2000) e (Casagrande, 1975), é possível concluir que amostras reconstituídas por meio do método de compactação úmida (*moist tamping*) contém uma estruturação porosa e “metaestável”, trazendo materiais com índices de vazios mais elevados se comparados a amostras reconstituídas por meio dos métodos de pluviação a ar ou a água.

2.7. EFEITO DA *FABRIC* NOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO SIMPLES E CÍCLICO (DSS E CDSS)

De acordo com (Wei & Wang, 2016), a análise da *fabric* em amostras reconstituídas de areia pode ser conduzida por meio de ensaios de cisalhamento direto simples e cíclico (DSS e CDSS). As mostras reconstituídas em laboratório são geradas garantindo que elas apresentem diferentes *fabric* iniciais, para ser uma maior representatividade da areia ensaiada. Assim, objetiva-se realizar carregamentos até o momento que ocorra a liquefação nas amostras (a liquefação pode ser descrita como um fenômeno no qual ocorre uma elevação da poropressão nos vazios (poros) de uma amostra de solo saturada sob influência de uma carga cíclica. A liquefação por fluxo pode ser definida pela perda abrupta da resistência e rigidez da amostra em análise (Wang & Wei, 2016)). É então comparada a evolução da *fabric* das amostras ensaiadas antes e depois da liquefação cíclica ocorrer, isto é, durante o ensaio de cisalhamento cíclico simples.

Para (Wang & Wei, 2016), por meio da análise de simulação pelo método dos elementos discretos (DEM), é possível verificar as mudanças ocorridas na *fabric* das amostras ensaiadas e analisar o comportamento micromecânico das mesmas. Observa-se na amostra uma elevada capacidade de suporte de carga anisotrópica. Imediatamente após o momento de descarregamento, a *fabric* da amostra não sofre alteração, ou seja, os vazios não sofrem reorganização. Por outro lado, vazios maiores devem ser formados em uma determinada direção analisada pelo método DEM, serem comprimidos e então pode ser formada uma cadeia de forças na mesma direção. Esta reorganização dos vazios pode levar a estrutura da amostra em entrar em colapso e iniciar um estado liquefeito, ocorrendo então deformações. Assim, será por meio destas deformações que os vazios poderão ser redistribuídos, até o momento que uma nova *fabric* dos grãos seja formada, onde existirão cadeias de forças significativas, na mesma direção onde inicialmente houve o descarregamento, para que então ocorra o processo de recarregamento.

Segundo (Wei & Wang, 2016), a razão de tensão cíclica, ou Cyclic Stress Ratio (CSR), é definida pela tensão de cisalhamento cíclica atuando em um plano horizontal (τ_{xz}), dividida pela tensão vertical efetiva inicial (σ'_v) definida para realizar o ensaio, como mostra a eq. 2.1:

$$CSR = \frac{\tau_{xz}}{\sigma'_v} \quad (2.1)$$

A partir do aumento do número de ciclos durante o ensaio CDSS, a tensão vertical efetiva progressivamente é reduzida até a ocorrência do início do processo de liquefação da amostra quando o valor de σ'_v for próximo de 0 kPa.

Após a liquefação, a trajetória das tensões de cisalhamento apresenta um comportamento comumente conhecido como “borboleta” em loop, enquanto a amplitude da deformação cisalhante permanece aumentando ciclo após ciclo, como mostra ensaios executados com duas amostras distintas de areia na Figura 2-14, denominadas de “S2”, gráficos “a” e “b”, e “S6”, gráficos “c” e “d”.

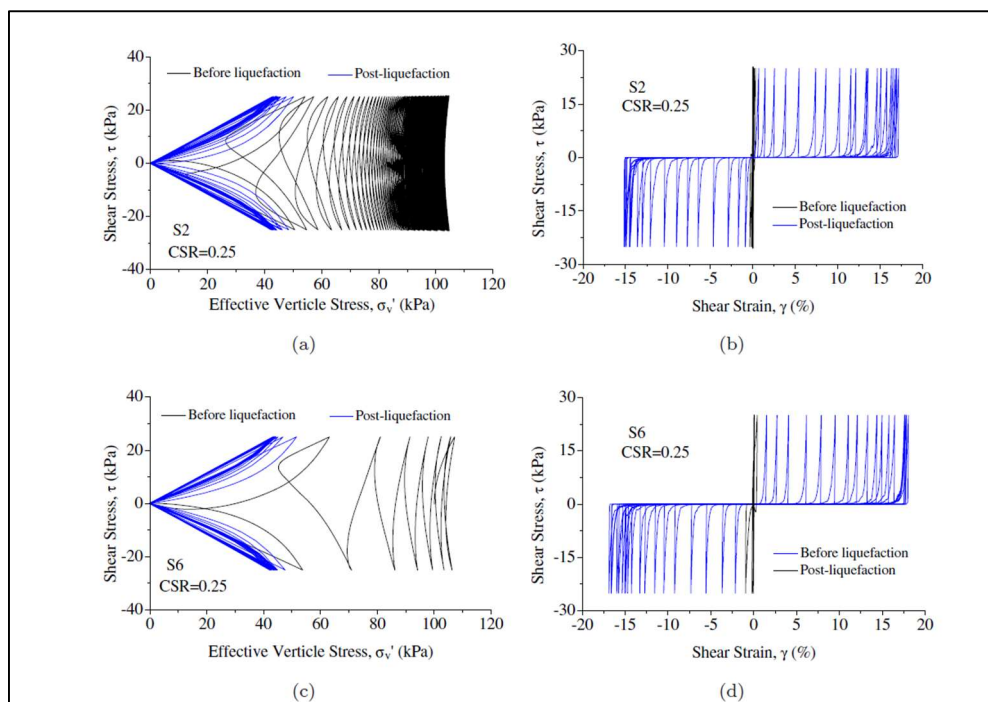


Figura 2-14 – Comportamento de duas amostras de areias durante o ensaio de CDSS, realizado com um CSR de 0,25 – Fonte : (Wei & Wang, 2016)

Por meio da Figura 2-14 é possível observar que, apesar das duas amostras de areia ensaiadas possuírem fabric distintas no início dos ensaios, o comportamento do gráfico mostra que a deformação de cisalhamento versus a tensão de cisalhamento é similar. Isto ocorre, pois, a tensão de cisalhamento cíclica aplicada é simétrica e perpendicular a direção da fabric inicial das amostras. É também possível perceber que a amplitude deformação cisalhante aumenta de maneira pouca expressiva antes de ocorrer a liquefação, e passa a crescer rapidamente no estágio pós liquefação, como mostra a Figura 2-14. Por fim, observa-se que as amostras S2 e S6 apresentam uma trajetória de tensões relativamente diferente antes do início da liquefação,

mostrando que a fabric inicial pode ter uma influência significativa na resistência a liquefação das areias.

A redução da tensão efetiva vertical ao longo do carregamento cíclico não drenado implica em mudanças nas estruturas de suporte do carregamento das areias (Wang & Wei, 2016). Assim, os contatos inter-partículas vão gradualmente reduzir, alterando desta forma a fabric da amostra. Também é importante ressaltar que, ao longo desta queda da tensão efetiva vertical, a amostra vai ficando mais próxima de atingir o início do processo de liquefação, sendo possível observar então que a reorganização da fabric passa a ser mais predominante. Neste momento, o grau de anisotropia da amostra aumenta à medida que o número de ciclos cresce (passado do estágio inicial de liquefação para pós liquefação), em um padrão de repetição dos ciclos.

Segundo (Cappellaro, 2019) também discute sobre a comparação de resultados de ensaios DSS entre amostras indeformadas de uma areia proveniente da formação “*Christchurch*”, localizada na Nova Zelândia, coletada por meio do método “*Gel-Push*”, que consiste na utilização de um gel polímero de baixa razão de atrito na coleta de amostras de areias e siltes, para remover o atrito mobilizado na lateral do amostrador à medida que o mesmo penetra na haste de ensaio (Stringer et al., 2016), e as amostras reconstituídas por meio dos métodos de *Moist Tamping* e método de pluviação a água.

Primeiramente, é possível observar que a faixa de densidades relativas encontradas nos resultados de ensaios DSS realizados com as amostras reconstituídas por meio do método de Pluviação a água e as amostras indeformadas é relativamente similar e compatível. Além disso, observou-se que as amostras reconstituídas por *Moist Tamping* colapsaram no momento que a condição de liquefação foi atingida no ensaio DSS e rapidamente desenvolveram grandes deformações axiais. Já as amostras indeformadas apresentaram um aumento mais gradual e lento de excesso de poro pressão e desenvolvimento de deformações axiais. Vale recordar que o ensaio DSS foi executado na condição não drenada mantendo o volume constante.

Segundo (Cappellaro, 2019), quando submetidos à carga monotônica em ensaio DSS, as amostras indeformadas são expressamente mais rígidas e possuem maior valor de resistência ao cisalhamento não drenada do que as amostras reconstituídas por meio do método de pluviação a água, analisando o mesmo índice de vazios.

Já nos ensaios de cisalhamento cíclico (CDSS), as amostras reconstituídas apresentam resistências significativamente menores quando comparadas aos valores das amostras indeformadas. Os resultados dos ensaios monotônicos e cíclicos são pertinentes e comparáveis

entre si, demonstrando uma *fabric* mais robusta nas amostras indeformadas. É possível atribuir esta diferença na *fabric* ao fato do método de pluviação a água para reconstituir a amostra deformada não conseguir reproduzir de forma fidedigna a *fabric* da estrutura dos grãos da amostra em condições naturais.

Em suma, a técnica de pluviação a água permite moldar amostras que apresentam *fabric* mais representativas em relação a *fabric* da partícula da referida amostra encontrada diretamente no campo, se comparada a *fabric* da amostra reconstituída por meio do método de Moist Tamping. Apesar disso, é possível observar que os métodos de reconstituição de amostra realizados em laboratório não podem reproduzir fidedignamente a complexidade natural de formação mineralógica e rochosa, a qual múltiplos fatores distintos acontecem durante uma longa escala geológica.

De acordo com (Cappellaro, 2019), amostras indeformadas obtiveram valores mais dilatantes quando submetidos a carga monotônica, se comparadas às amostras reconstituídas do mesmo material, e preparadas com as mesmas densidades iniciais. Também é importante destacar que as amostras indeformadas apresentaram um maior valor de resistência à liquefação cíclica.

Também segundo (Cappellaro, 2019), uma maneira de analisar a *fabric* do material ensaiado nos testes de DSS e CDSS é por meio da técnica de análise que avalia a esfericidade e arredondamento das amostras, com base em um ábaco que avalia estas características, o formato do arredondamento e da esfera dos grãos. O ábaco está representado na Figura 2-15.

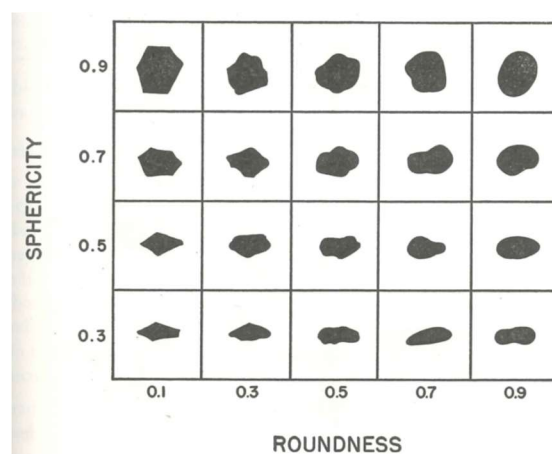


Figura 2-15 -: Gráfico para classificação de partículas, de acordo com critérios de “arredondamento” e “esfericidade”. Fonte : (Cappellaro, 2019)

Segundo (Viana da Fonseca et. al, 2015), após execução de ensaios de cisalhamento direto cíclico simples (CDSS) em amostras de areia provenientes da Argélia e Portugal, que possuem diferentes tamanhos de grãos e distribuições e organizações de grãos distintas, é possível identificar um processo de densificação das amostras, provavelmente associado a mudanças na *fabric* da estrutura, que ocorrem durante a fase de cisalhamento do ensaio. Como o formato dos grãos e a rugosidade dos mesmos são diferentes, observa-se que a *fabric* de ambos também pode ser definida como *fabric* distintas.

Por meio destas observações é possível deduzir que a *fabric* formada por um determinado método de reconstituição de amostra deformada, além das mudanças ocorridas na *fabric* original do espécime provocadas pelo acúmulo de deformação plástica ao longo do teste de cisalhamento cíclico.

3. METODOLOGIA

Nesse capítulo, apresenta-se os materiais que foram analisados e utilizados para a realização desta pesquisa, além dos métodos de ensaios executados para concluir os objetivos informados ao longo da dissertação. A apresentação dos materiais e métodos é fundamental para o correto entendimento dos resultados obtidos e da ordem em que a pesquisa foi realizada.

3.1. MATERIAIS

No item “Materiais” são definidas as especificações e características do material utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa. Foi discutido o rejeito filtrado de flotação analisado. A sua origem e caracterização completa foi descrita e analisada.

3.1.1. REJEITO FILTRADO ARENOSO DE MINÉRIO DE FERRO

O rejeito filtrado arenoso de minério de ferro é proveniente de uma pilha de rejeitos filtrado, localizada no quadrilátero ferrífero, em, Minas Gerais. A Figura 3-1 apresenta uma imagem da localização desta estrutura geotécnica.

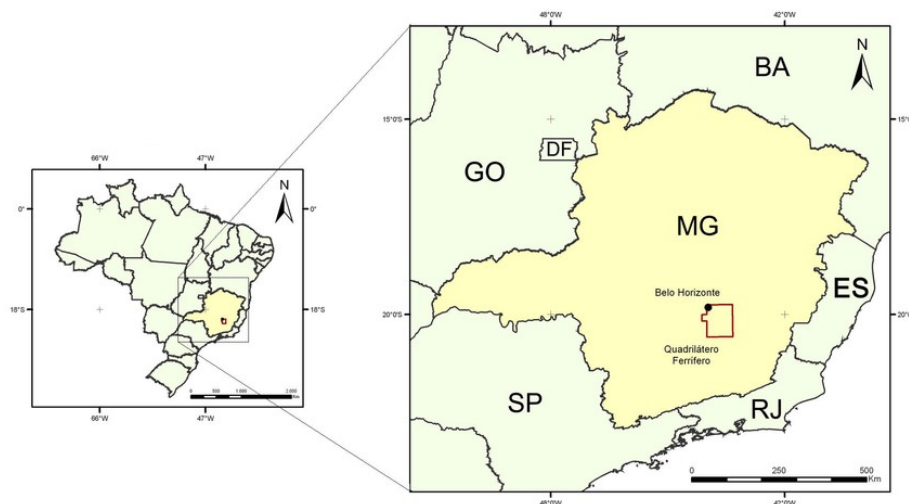


Figura 3-1 –Localização do quadrilátero ferrífero no âmbito do território nacional. Fonte : (Ruchkys & Machado, 2012)

O rejeito de flotação é oriundo do processo de beneficiamento do minério de ferro em uma usina de processamento mineral, situada em uma mina do quadrilátero ferrífero, no qual o *underflow* do espessador de adensamento do rejeito envia este material para um rejeitoduto, que

posteriormente é filtrado dentro de uma usina de filtragem, utilizando a técnica com filtros a vácuo (disco cerâmico).

A Figura 3-2 apresenta a curva granulométrica do rejeito filtrado de flotação, obtida por meio de amostra coletada na praça de disposição de rejeito em novembro de 2022, quando do início da construção das pistas teste. Por meio da análise da curva granulométrica apresentada, é importante destacar a maior porcentagem de silte em relação a porcentagem de areias, caracterizando a presença de finos no material. Esta presença será melhor detalhada no item de Resultados.

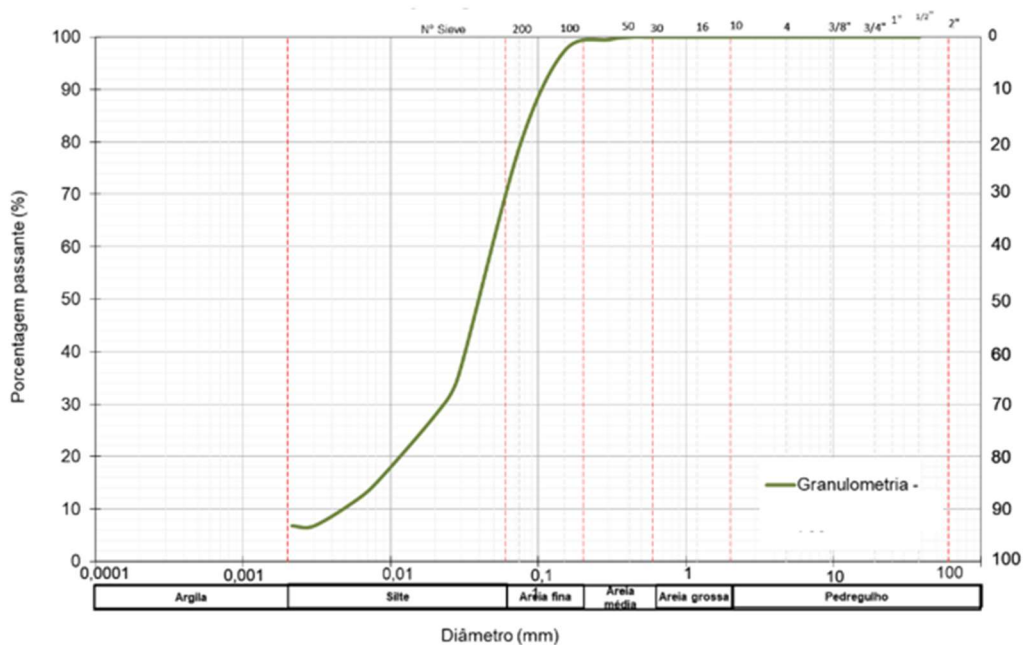


Figura 3-2 - Curva granulométrica rejeito filtrado arenoso. Ensaio executado em Agosto de 2023. Fonte : o autor

A Figura 3-3 apresenta a curva granulométrica para o rejeito de deslamagem, obtida por meio de amostra coletada no reservatório de armazenamento de rejeitos em maio de 2023. É possível perceber que as lamas do processo de beneficiamento mineral do minério de ferro são classificadas como silte-argilosas.

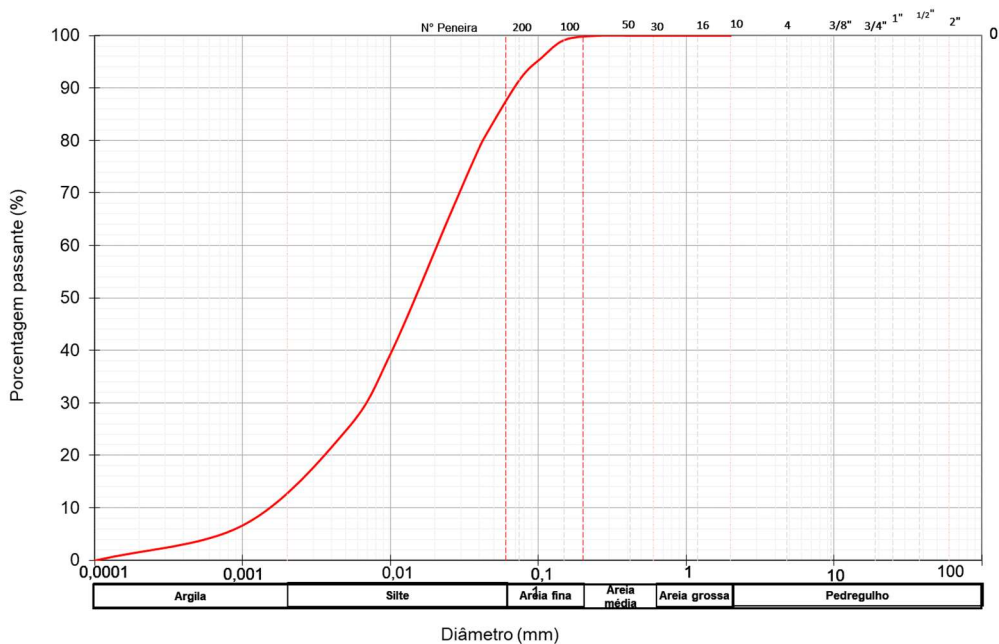


Figura 3-3 – Curva granulométrica para o rejeito de deslamagem. Ensaio executado em maio de 2023. Fonte : o autor.

A Figura 3-4 apresenta a curva de compactação obtida através de ensaio de compactação Proctor Normal realizado em maio de 2023 com o rejeito de flotação filtrado arenoso disposto na área próxima à pista teste construída.

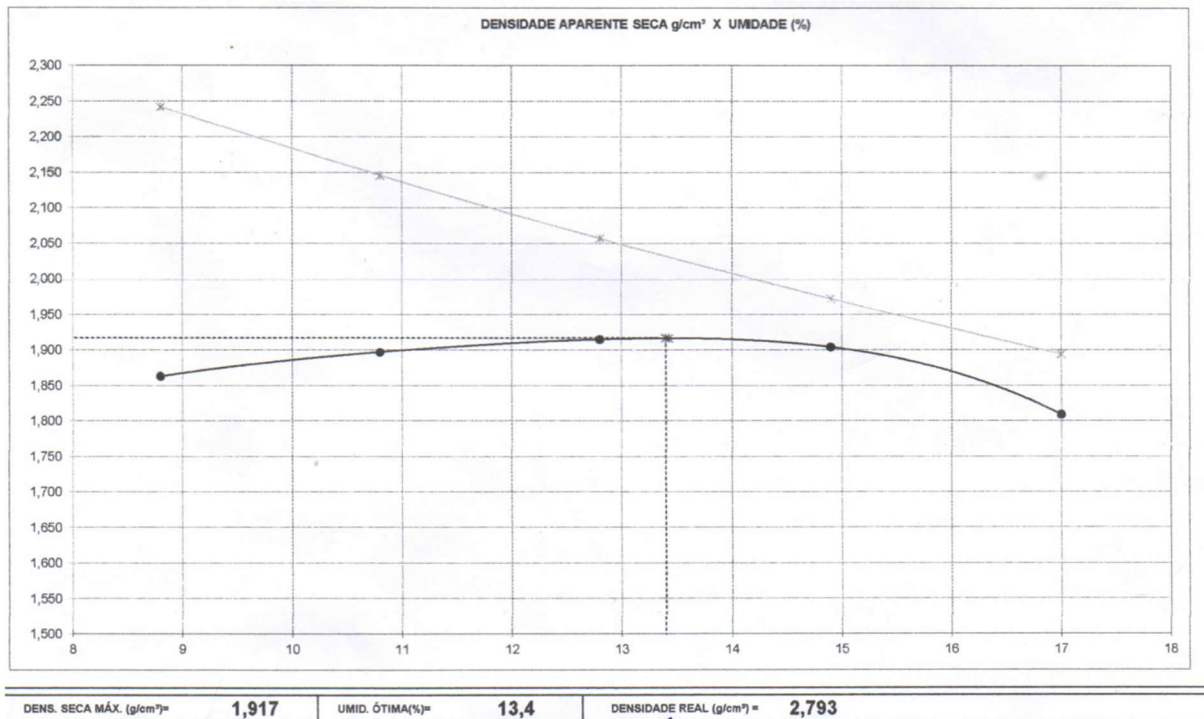


Figura 3-4 – Curva de compactação típica do rejeito de flotação filtrado arenoso, Ensaio executado em maio de 2023. Fonte : o autor

Com base nos resultados, é possível observar uma umidade ótima de 13,4% e uma densidade seca máxima obtida de 1,917 g/cm³. A densidade real dos grãos para esta amostra coletada em maio de 2023 também foi determinada, em ensaio de laboratório, obtendo o valor de 2,793. De posse deste valor de massa específica dos grãos, e da densidade seca máxima obtida na curva de compactação, obtém-se um índice de vazios na compactação de 0,46. Os Limites de Atterberg para esta amostraram foram classificados como sendo um material não plástico.

A Figura 3-5 apresenta o fluxograma definido para o processo de geração do rejeito de flotação das usinas de Vargem Grande I e Vargem Grande II, identificando a rota de processo até a chegada na usina de filtragem, onde o mesmo é filtrado e posteriormente enviado à pilha de disposição de rejeitos filtrados, local de coleta de amostras para o desenvolvimento desta pesquisa.

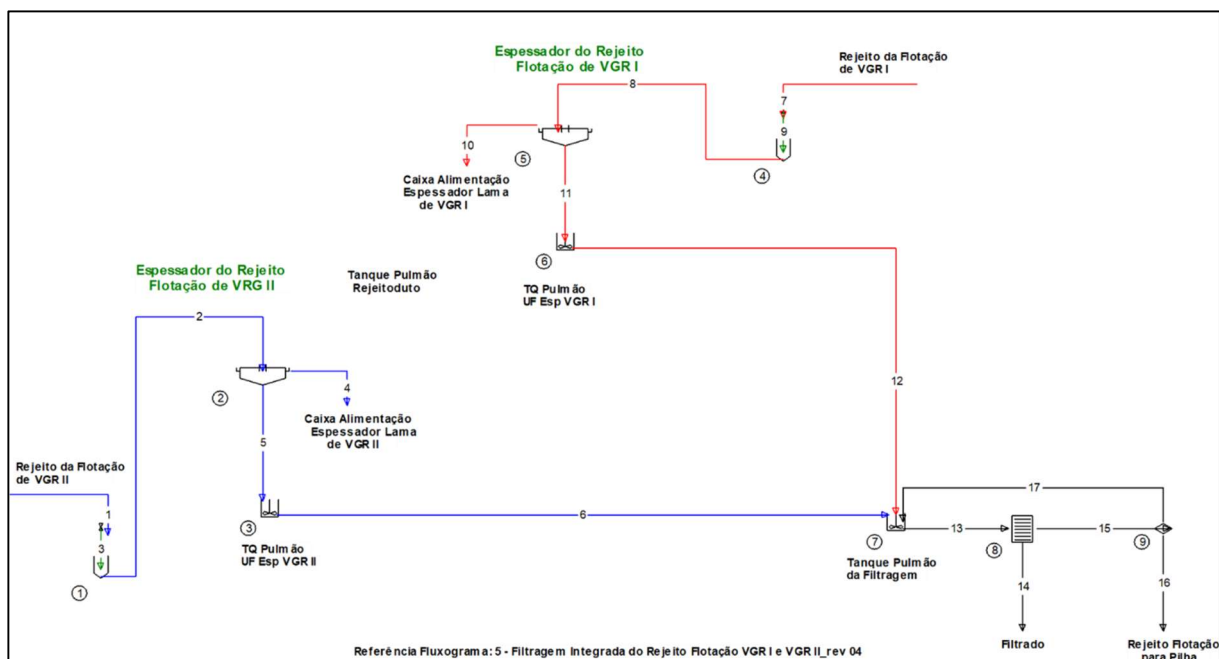


Figura 3-5 – Fluxograma mostrando a produção do rejeito de flotação, e o seu caminho até a usina de filtragem.

Fonte : o autor

Para a filtragem do rejeito de flotação do minério de ferro, objeto-material tema desta dissertação, foram previamente testados pela indústria alguns tipos de filtros, dentre eles o filtro a disco cerâmico (vácuo), e o filtro prensa. Após a execução de alguns testes, pôde-se perceber que o filtro a disco cerâmico possui maior eficiência, melhor performance e um menor investimento de CaPex (*Capital Expenditure*, ou orçamento para construção) se comparado com o filtro prensa, apesar de entregar uma torta filtrada com um teor de umidade um pouco acima daquele entregue pelo filtro prensa. Porém, essa diferença pode ser vencida dentro da operação para que se permita o desaguamento final deste material in loco.

A alternativa existente para a disposição dos rejeitos contempla o envio das lamas para uma barragem de contenção de rejeitos e a disposição do rejeito filtrado de flotação em uma pilha de rejeito.

3.2. MÉTODOS

Nesta seção, é detalhado o programa de ensaios experimentais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Os ensaios foram executados no rejeito filtrado de flotação oriundo do processo de beneficiamento do minério de ferro da mina do Pico, utilizando de amostras indeformadas e amostras deformadas reconstituídas em laboratório, objetivando

comparar as suas características físicas e mecânicas. Ressalta-se que o mesmo programa de ensaios realizado nas amostras indeformadas foi também realizado nas amostras deformadas reconstituídas em laboratório, para que a comparação entre os resultados se apresentasse de maneira fidedigna e completa.

Para controlar as variáveis e elementos que podem influenciar nos resultados da pesquisa, foram adotados controles de umidade nos ensaios, onde a umidade foi especificada para moldagem dos corpos de prova em laboratório. Ademais, é importante destacar também o controle adotado para aplicação da vibração do rolo compactador, a ser detalhado no item de execução de pista teste e amostragem, importante para garantir a homogeneidade da vibração ao longo da pista teste.

3.2.1. EXECUÇÃO DE PISTA TESTE E AMOSTRAGEM

Para coleta de amostras deformadas e indeformadas do rejeito filtrado arenoso de minério de ferro, foi construída uma pilha teste localizada dentro das dependências de uma mina de minério de ferro.

Primeiramente, foi basculado aproximadamente 6000 m³ de rejeito filtrado em uma área estimada de 10 000 m². Esse material foi espalhado e esteirado com o uso de grade, motoniveladora e trator de esteira, para que o material atinja a umidade ótima e esteja apto a ser compactado. A Figura 3-6 apresenta o equipamento Bulldozer D8 , a esquerda, utilizado para a etapa de espalhamento do material, e o caminhão a direita, realizando o basculamento de rejeito na praça. Posteriormente, foi feita uma aferição de espessura para verificar que a camada se encontrasse com 60 cm, antes da mesma ser liberada para a compactação. O mesmo procedimento foi realizado em 3 camadas consecutivas, permitindo a extração do bloco indeformado.



Figura 3-6 Equipamentos de espalhamento do rejeito (trator Bulldozer) e caminhão rodoviário para transporte do material. Fonte : o autor

A pilha teste foi dividida em duas pistas testes distintos, como apresentado pela Figura 3-7. Primeiramente, a pista designada como “A” foi medianamente compactada utilizando o peso próprio do trator de esteira dozer D8 (esteirada com a esteira do trator), da marca Caterpillar, de aproximadamente 38 toneladas, este responsável por espalhar o rejeito filtrado e nivelar o mesmo a uma camada de 60 cm, conferindo uma compactação a camada sem o uso de vibração de um rolo compactador. Isto permitiu que sejam coletados dois blocos indeformados nesta pista com um material de características um pouco menos densas se comparado a uma pista compactada, para análise do desempenho mecânico das amostras indeformadas comparadas com as amostras deformadas reconstituídas em laboratório. Vale ressaltar que o grau de compactação aferido em campo para esta pista foi de 100% do Proctor Normal, o que pode ser explicado pelo elevado peso do trator de esteira aplicado na camada de 60 cm de espessura.

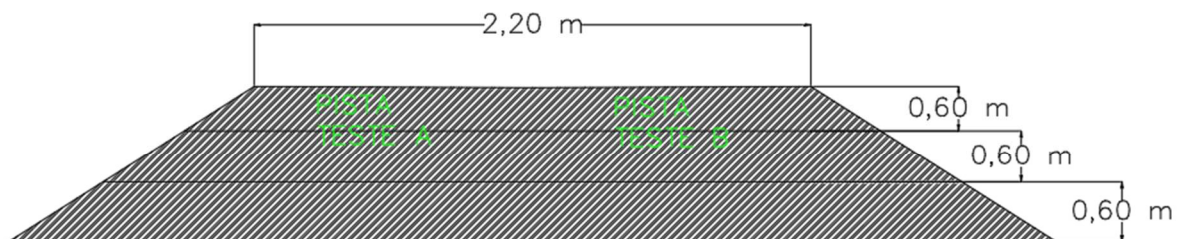


Figura 3-7 – Croqui pista teste construída na pilha de rejeitos Cianita. Fonte : o autor

Posteriormente, para a pista teste designada como B”, após a passagem do trator de esteira dozer D8, foi também utilizado o rolo compactador vibratório liso marca Dynapac CA 610, de aproximadamente 19 toneladas, com valor de carga estática linear de 60 kg/cm, com uma amplitude de frequência vibratória de 19 Hz, alcançando, segundo o fabricante, uma espessura de 62 cm para eficácia da compactação com vibração, para materiais siltosos. O grau de compactação Proctor Normal para esta camada foi aferido estando entre 101 e 102 % do Proctor Normal. Assim, foi possível coletar amostras indeformadas de um material mais denso, trazendo resultados mais confiáveis para realizar também a análise do desempenho mecânico das amostras indeformadas comparadas com as amostras reconstituídas em laboratório.

. A Figura 3-8 apresenta equipamentos para transporte (caminhão fora de estrada), espalhamento (trator Bulldozer), compactação (rolo compactador, para a pista B”) para as atividades relacionadas a disposição do rejeito filtrado. A Figura 3-9 apresenta, como exemplo, a amostra indeformada que foi coletada em campo na pista teste do trecho compactado



Figura 3-8 Equipamentos para transporte (caminhão fora de estrada), espalhamento (trator Bulldozer), compactação (rolo compactador) para as atividades relacionadas a disposição do rejeito filtrado. Fomte: o autor



Figura 3-9 – Amostra indeformada coletada em campo na pista teste do rejeito filtrado de flotação. Fonte: o autor

É importante ressaltar que amostras deformadas foram coletadas ao lado das amostras indeformadas de ambas as pistas testes para a execução dos ensaios descritos nos itens a seguir, bem como executados com as próprias amostras indeformadas.

A Figura 3-10 apresenta o fluxograma que define os ensaios que serão feitos a partir da coleta das amostras deformadas e indeformadas referentes à Pista teste A – medianamente compactada.

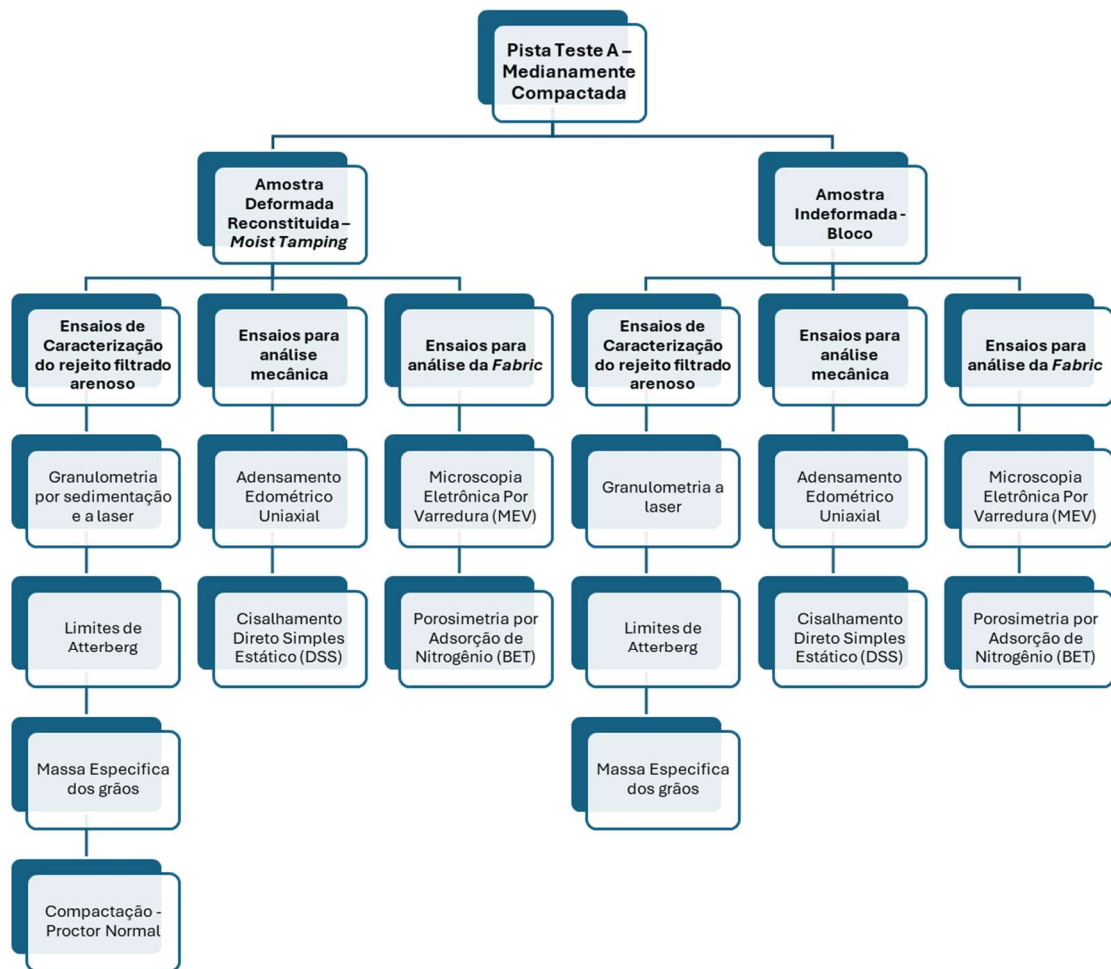


Figura 3-10 – Fluxograma para ensaios realizados com as amostras coletadas na Pista teste A – Medianamente Compactada

A Figura 3-11 apresenta o fluxograma que define os ensaios que serão feitos a partir da coleta das amostras deformadas e indeformadas referentes à Pista teste B – Compactada.

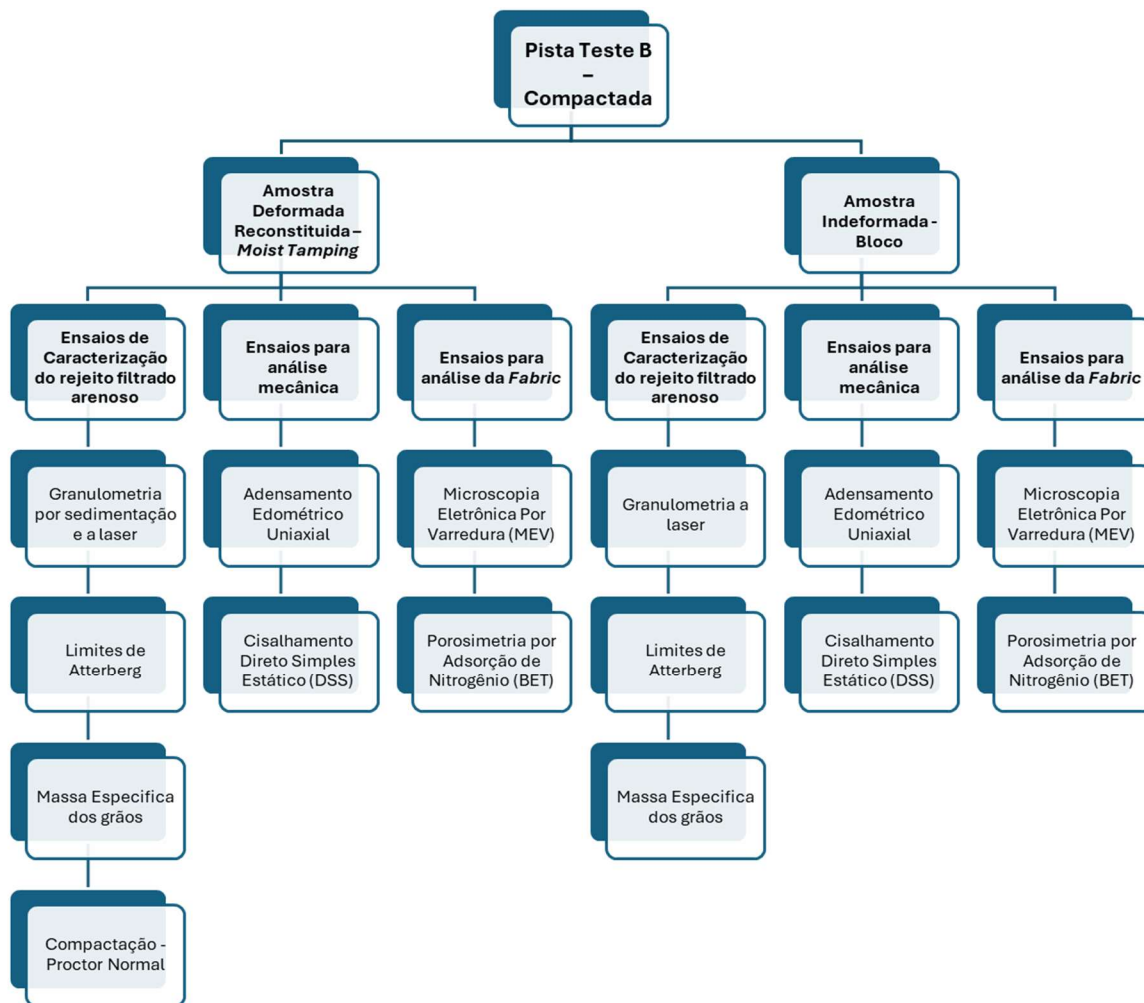


Figura 3-11 - Fluxograma para ensaios realizados com as amostras coletadas na Pista teste B –Compactada

A Tabela 3-1 apresenta um descritivo das amostras coletadas em campo, a sua qualidade, se deformada ou indeformada, e o respectivo trecho/pista teste no qual a amostra foi coletada. Apresenta-se também uma abreviação criada para identificar cada tipo de amostra, para a utilização em descritivos oportunos ao longo do capítulo. Para definição das abreviações, a letra “A” é definida por “Amostra”, a letra “I” definida como “Indeformada”, as letras “DR” definidas como “Deformada Reconstituída”, a letra C definida como “Compactada”, e as letras “MC” definidas como “Medianamente Compactada”.

Tabela 3-1 – Resumo das amostras coletadas e ensaiadas

Qualidade /Amostra	Trecho/Pista teste	Abreviação
Indeformada	Compactado	AIC
Deformada /Reconstituída	Compactado	ADRC

Indeformada	Medianamente Compactado	AIMC
Deformada/ Reconstituída	Medianamente Compactado	ADRMC

Durante a coleta das amostras deformadas e indeformadas nas pistas teste, foram realizados ensaios de Compactação pelo método de Hilf, in situ, utilizando a norma ABNT NBR 12102 (ABNT, 1991) para determinação da densidade in situ e grau de compactação das amostras coletadas. Para a Pista teste A – medianamente compactada, foram obtidos os seguintes resultados:

- Densidade seca obtida :1,891 g/cm³
- Densidade úmida – topo : 2,179 g/cm³
- Densidade úmida – base : 2,116 g/cm³
- Massa específica úmida convertida : 2,143 g/cm³
- Umidade do aterro: 13,5 %
- Umidade ótima, segundo ábaco de Hilf: 14,6 %
- Desvio de umidade: -1,1%
- Grau de Compactação de campo – topo : 101,7%
- Grau de Compactação de campo – base : 98,7%

Para a Pista teste B –compactada, foram obtidos os seguintes resultados:

- Densidade seca obtida :1,820 g/cm³
- Densidade úmida – topo : 2,081 g/cm³
- Densidade úmida – base : 2,112 g/cm³
- Massa específica úmida convertida : 2,058 g/cm³
- Umidade do aterro: 13,5 %
- Umidade ótima, segundo ábaco de Hilf: 15,9 %
- Desvio de umidade: -2,4%
- Grau de Compactação de campo – topo : 101,1%
- Grau de Compactação de campo – base : 102,6%

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO FILTRADO ARENOSO DE MINÉRIO DE FERRO

Para caracterização do rejeito de minério de ferro filtrado de flotação foram feitos os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica conforme a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016), peneiramento; e granulometria a laser executado no laboratório de geotecnia do Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale (CDM).
- Determinação da massa específica dos grãos conforme ABNT NBR 6508 (ABNT, 2018), executado no laboratório de geotecnia do Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale (CDM).
- Limites de Atterberg - liquidez e plasticidade (NBR 6459 – ABNT, 2016 e NBR 7180 - ABNT, 2016), executado no laboratório de geotecnia do Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale (CDM)

3.2.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL

A compactação dinâmica realizada em laboratório consiste na aplicação em repetição e incremental de uma carga previamente definida em norma e em quantidades pré-determinadas. O método de Proctor é o método mais difundido para o ensaio de compactação em laboratório no Brasil.

Foram realizados ensaios de compactação Proctor Normal de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2020) para o rejeito de minério de ferro de flotação filtrado e coletado em campo, executado no laboratório de geotecnia do Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale (CDM).

3.2.4. MÉTODO DE MOIST TAMPING PARA RECONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS DEFORMADAS COMPACTADAS EM LABORATÓRIO

As amostras de rejeitos de minério de ferro com fração fina foram moldadas aplicando o método MT, com teor inicial de umidade entre 14% e 15% da umidade geotécnica (massa de água dividida pela massa de sólidos da amostra). A umidade geotécnica foi escolhida devido a interpretação dos ensaios de laboratório, que levam em conta a umidade geotécnica, e não a umidade de processo, já que a mesma analisa a massa de água em função da massa total da amostra.

Os espécimes foram reconstituídos usando um anel de consolidação com diâmetro de 51,5 mm, com alturas entre 18,5 mm e 24,0 mm (para os ensaios de Microscopia Eletrônica por Varredura – MEV e Porosimetria por Intrusão de Nitrogênio (BET), com camada única e densidade alvo aproximada 1860 kg/m³, relacionada a densidade da amostra indeformada).

Para os ensaios de adensamento uniaxial e Cisalhamento Direto Simples (DSS), foi utilizado um anel de aproximadamente 20 mm de altura por 70 mm de diâmetro, com aplicação de 4 camadas, e As camadas consecutivas foram compactadas para densidades iniciais-alvo 1860 kg/m³ para 100% do Proctor Normal , e umidade ótima referentes aos ensaios de compactação realizados com as amostras deformadas(amostras reconstituídas nas dependências do Laboratório de Geotecnia da Vale, LGV, 2024).

A Figura 3-12 apresenta a etapa de preparação dos corpos de prova reconstituídos, para realização dos ensaios de adensamento e DSS, mostrando o cilindro de 20 por 70 mm utilizado, e o arrasamento da amostra após a conclusão da quarta camada. O controle de camada foi realizado pelo laboratório por meio de preenchimento de ficha de ensaio padronizada, na qual todas as quatro camadas executadas foram registradas. Da mesma forma, a densidade alvo de 1860 kg/m³ também foi controlada através de determinação da massa aplicada para cada camada, uma vez definido o volume da mesma pelo corpo de prova.

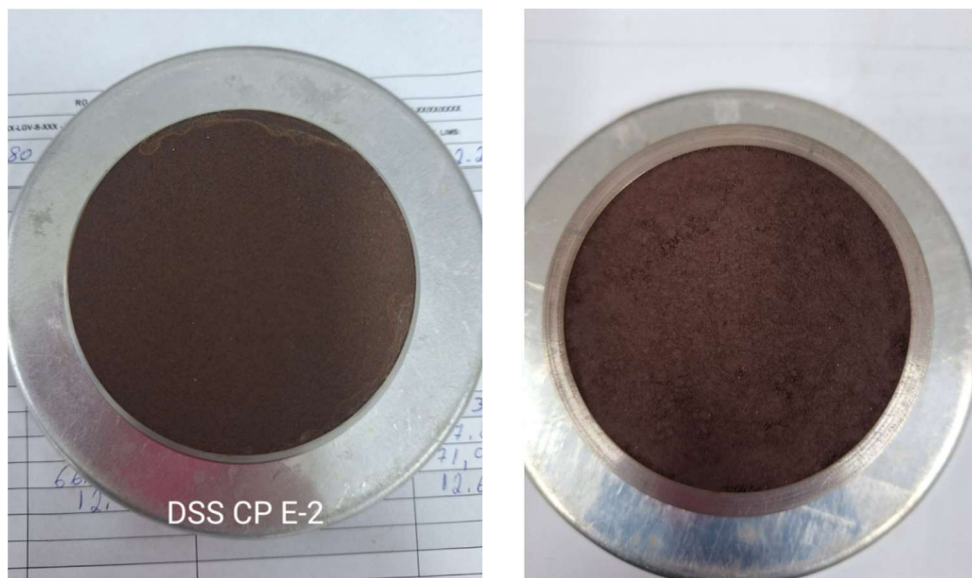


Figura 3-12 – Etapa de preparação do corpo de prova para ensaios de DSS e adensamento, mostrando o arrasamento da amostra na quarta camada. Fonte: o autor.

Após a conclusão do processo de reconstituição, os espécimes foram preparados para a execução do ensaio de adensamento uniaxial no laboratório e DSS, incluindo os espécimes preparados com amostras indeformadas dos rejeitos filtrados de flotação.

A Figura 3-13 apresenta uma amostra reconstituída pelo método de “*Moist Taimping*”, para utilização nos ensaios MEV e Porosimetria por Intrusão de Nitrogênio.



Figura 3-13 – Amostra reconstituída pelo método de *Moist Taimping*, para utilização nos ensaios de MEV e Porosimetria por Intrusão de Nitrogênio. Fonte: o autor.

3.2.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO CONFINADA

Foi realizado o ensaio de adensamento uniaxial, com carregamento e descarregamento de ao menos 5 cargas, seguindo as orientações da norma NBR 16853 (ABNT,2020) com ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas. A amostra de solo será axialmente carregada por incrementos de carga, mantendo constante a pressão a cada acréscimo de carga, até que o excesso de pressão de água nos poros tenha sido completamente dissipado.

As medidas de variação de altura que ocorrem ao longo do ensaio são utilizadas na determinação do parâmetro que caracteriza a relação entre a pressão efetiva e o índice de vazios da amostra (gráfico de índice de vazios versus tensão efetiva).

Os resultados do ensaio de adensamento são comumente usados para estimar a magnitude dos recalques totais e diferenciais da pilha de rejeito e a velocidade dos recalques.

3.2.6. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Os parâmetros de resistência do rejeito de minério de ferro filtrado de flotação serão avaliados conforme o método para ensaio de cisalhamento simples direto estático (DSS), realizado conforme os métodos estabelecidos pela ASTM D6528 (ASTM, 2017). Foram realizados ensaios utilizando amostras indeformadas (blocos) coletados em dois graus de compactação distintos, como descrito no item 3.2.1, e também utilizando amostras reconstituídas, por meio de amostras deformadas coletadas em campo reconstituídas pelo método de *Moist Tamping*, conforme descrito no item 3.2.5.

No planejamento inicial da campanha experimental a ser desenvolvida para este projeto de pesquisa, originalmente previu-se a execução de ensaios triaxiais drenados e não drenados, para determinação dos parâmetros geotécnicos mecânicos das amostras de rejeito, e ensaios de cisalhamento direto simples cíclico (CDSS) além dos ensaios de DSS e adensamento. Porém, devido ao tempo limitado destinado à pesquisa e a indisponibilidade das câmaras triaxiais no Laboratório de Geotecnia da Vale, os ensaios triaxiais não puderam ser executados. Na ótica do ensaio de cisalhamento direto simples cíclico, não houve tempo hábil para executá-lo após a conclusão dos ensaios de cisalhamento direto simples. Dessa forma, a campanha experimental focou nos ensaios de adensamento uniaxial e DSS para caracterização mecânica monotônica do rejeito filtrado arenoso.

3.2.6.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO SIMPLES (DSS)

O ensaio de cisalhamento direto simples (DSS) foi realizado na condição não saturada (não houve percolação de água na amostra, o ensaio seguiu com a amostra na sua condição natural) e não drenada, realizado segundo a norma ASTM D6528 (ASTM, 2017). O ensaio foi executado no laboratório de geotecnia do centro de desenvolvimento mineral da Vale (CDM), atingindo um valor de deformação de 30% e tensões verticais aplicadas de 50, 100, 200 400 e 800 kPa. A velocidade adotada e controlada ao longo do ensaio foi de 0,0184 mm/min, respeitando os 30% de deformação como alvo a ser atingido, a uma taxa de 5% de deformação por hora.

Segundo (M & Kim, 2013), o ensaio de cisalhamento direto simples (DSS) é um método eficaz e confiável para determinar os parâmetros de resistência não drenada de amostras indeformadas e reconstituídas de solos, além dos parâmetros geotécnicos como o ângulo de atrito interno e coesão de um material. O cisalhamento simples é uma condição de teste na qual somente

tensões normais e cisalhantes a deformação radial é considerada igual a zero. A Figura 3-14 mostra a aplicação da força vertical atuante em um corpo de prova com sua base fixada.

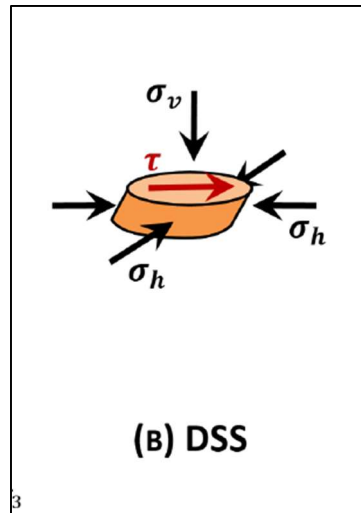


Figura 3-14 – Imagem mostrando a aplicação de força vertical atuante sobre um corpo de prova com base fixada.

Fonte : (Cappellaro, 2019)

O ensaio DSS pode ser sumarizado da seguinte forma: a amostra é carregada verticalmente, permitindo então que seja adensada unidimensionalmente. Cada incremento de carga vertical é mantido até que todo excesso de poropressão seja dissipado, o que pode ser interpretado pela taxa de deslocamento vertical. Após a fase de adensamento, a amostra é cisalhada por meio da movimentação da placa superior de forma tangencial em relação a placa inferior, em uma taxa constante de deslocamento, medindo dessa forma a força cisalhante resultante. É importante destacar que as placas são fixadas para impedir movimentos verticais e rotacionais durante o cisalhamento. O volume da amostra é mantido constante durante toda a etapa de cisalhamento por meio da alteração da carga vertical aplicada a amostra, mantendo a sua altura constante, visando simular a condição não drenada imposta.

Como a geração de poropressão ao longo da etapa de cisalhamento é igual a 0, a mudança na tensão vertical é equivalente a mudança na tensão efetiva, assumindo-se ser também equivalente a mudança de poro pressão que ocorreria em uma amostra selada confinada por uma tensão vertical total de valor constante (ASTM D6528, 2017). Durante a fase de cisalhamento, é importante estabelecer a deformação máxima que deve ser alcançada e mesurada no ensaio.

Para esta pesquisa em questão, foram feitos ensaios a 50, 100, 200, 400 e 800 kPa para a tensão axial, gerando então 5 envoltórias de trajetórias de tensões, que serão apresentadas no capítulo

de Resultados, e sempre mantendo a deformação máxima em 30%. Este ensaio possui como um dos principais objetivos simular o estado plano de deformações e tensões dito cisalhamento puro.

A Figura 3-15 apresenta o aparelho da marca GDS utilizado para a realização dos ensaios DSS. Este aparelho utiliza da técnica NGI para realização de ambos os ensaios de cisalhamento direto simples.

A Figura 3-16 apresenta um esquema simples mostrando um corte do aparelho do ensaio de cisalhamento direto simples estático, mostrando a posição das placas e aplicação da tensão normal, para carregamento do material ensaiado. A força de cisalhamento τ também é identificada.



Figura 3-15 – Aparelho para execução dos ensaios DSS, Laboratório de Geotecnia, Vale, CDM. – Fonte : o autor

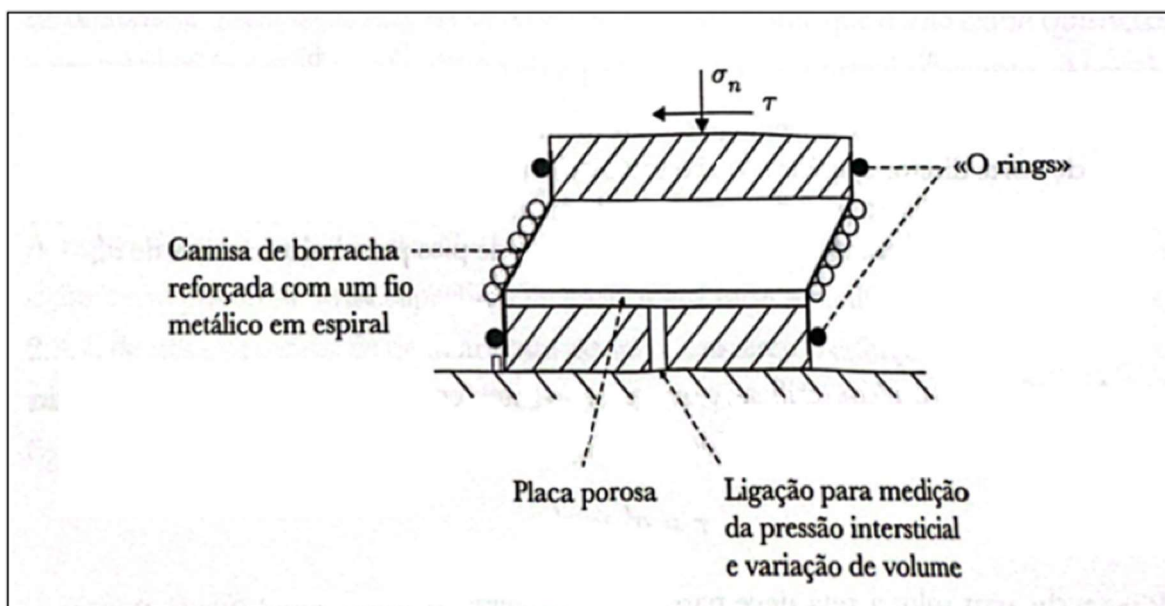


Figura 3-16 – Esquema ilustrativo para o ensaio cisalhamento direto simples estático, mostrando a posição das placas e aplicação da tensão normal, para carregamento. Fonte : (Neves, 2016)

3.2.7. AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DA “FABRIC”

Para a avaliação da *fabric* do rejeito filtrado arenoso, foram eleitos os ensaios de Porosimetria por adsorção de nitrogênio (BET), uma vez que, para análise de volume e dimensões de poros, a técnica por intrusão de mercúrio não é aplicável, por se tratar de um material granular, e o ensaio de microscopia eletrônica por varredura (MEV), para análise da distribuição dos grãos. Estes ensaios foram elegidos para execução devido a sua disponibilidade nos laboratórios de mineralogia da Vale e no centro de tratamento de ferrosos, também pertencente à Vale.

3.2.7.1. POROSIMETRIA POR ADSORÇÃO DE NITROGÊNIO (BET)

O ensaio de porosimetria por adsorção de nitrogênio por meio da metodologia BET (Brunauer, Emmett e Teller) é baseado no princípio de adsorção e dessorção do gás nitrogênio na superfície da amostra. Esta técnica determina a área de superfície e a porosimetria da amostra de rejeito filtrado arenoso, por meio de poros e microporos com diâmetro de 3 Anômetros até 2000 Anômetros.

Durante a fase de preparação da análise da amostra de rejeito pelo método de adsorção de gás, a amostra foi submetida à etapa de “degas”, ou seja, remoção de gás, para a limpeza total dos poros em condições de vácuo durante uma hora, a uma temperatura de 100°C. O ensaio foi executado em um aparelho NOVA 1000e Surface Area & Pore Size Analyser, da marca

Quantachrome, usando do princípio da adsorção do gás nitrogênio na superfície da amostra (rejeito filtrado), por meio da equação proposta pela técnica de BET, a qual permite calcular a área superficial específica da amostra. Já o método BJH (Barrett, Joyner e Halenda) permite calcular o volume total de poros, além do diâmetro médio dos poros, resultados do ensaio de porosimetria. (Ávila et al., 2010).

No primeiro estágio da técnica, as moléculas de nitrogênio são adsorvidas em pontos aleatórios na superfície da amostra, em condições de pressões baixas. Já no segundo estágio, quando se inicia o aumento da pressão de inserção do gás nitrogênio, forma-se uma monocamada do mesmo. Nesta etapa, é possível calcular a área da superfície desta monocamada a partir da equação de BET. No terceiro estágio, como a pressão de gás continua a crescer, multicamadas de moléculas de nitrogênio são formadas, e assim os menores poros da amostra são preenchidos num primeiro momento.

Por fim, no quarto e último estágio, ainda se observa o aumento contínuo da pressão de gás, levando a formação completa de multicamadas e o preenchimento de todos os poros da amostra. Dessa forma, é possível analisar a fabric do rejeito, utilizando métodos específicos (BJH) para determinar a distribuição dos poros, volume e diâmetro.

Dessa forma, foram determinados os parâmetros de área superficial específica, volume dos poros, tamanho médio e máximo dos poros, gráfico da distribuição do tamanho de poros. A amostra foi analisada na condição de pó, removendo uma pequena “lasca” do corpo de prova do rejeito filtrado, para ambas as amostras reconstituídas e indeformadas.

A Figura 3-17 apresenta a retirada de pequena “lasca” de rejeito a partir de um dos corpos de prova a serem ensaiados, para posicionamento no porta-amostras “cachimbo”. A Figura 3-18 e a Figura 3-19 apresentam, respectivamente, a pesagem da amostra de rejeito de flotação e posicionamento dentro do recipiente que será levado dentro do porosímetro (“cachimbo”), e uma imagem do aparelho Porosímetro por adsorção de nitrogênio, da marca NOVA 1000e – Surface Area & Pore Size Analyser. . A Figura 3-20 apresenta a evolução de cada estágio do teste de porosimetria.



Figura 3-17 – Retirada de pequena “lasca” de um dos corpos de prova a serem ensaiados, indicada pelo círculo vermelho, para posicionamento no porta-amostras. Fonte : o autor.



Figura 3-18 – Pesagem da amostra de rejeito de flotação. Fonte: o autor



Figura 3-19 – Porosímetro por adsorção de nitrogênio. Fonte: o autor

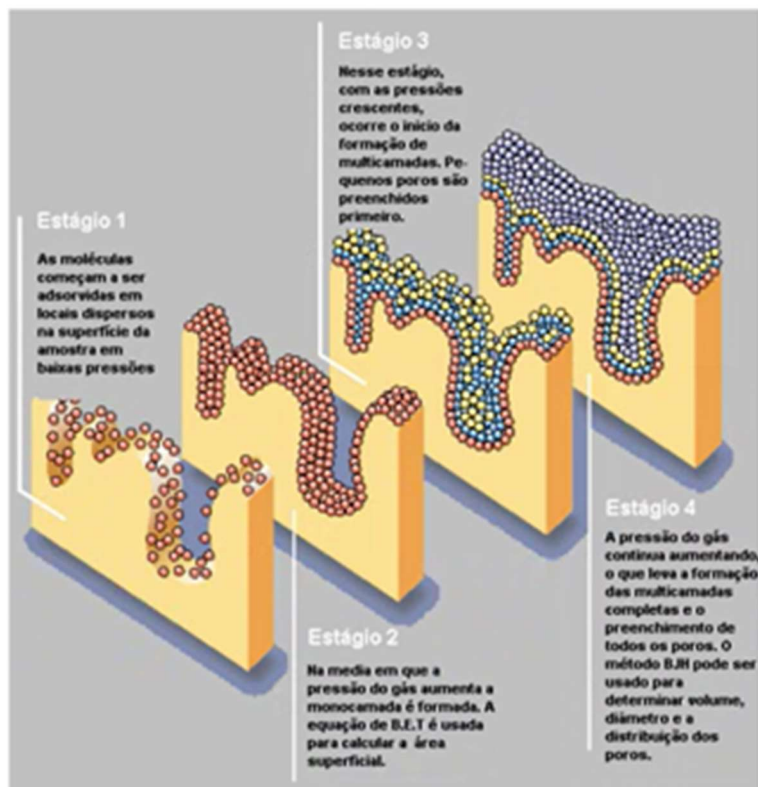


Figura 3-20 - Evolução de cada estágio do teste de porosimetria. Fonte: Adaptado (Kerce, 2024).

3.2.7.2. MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA

Realizou-se ensaios de microscopia eletrônica de varredura nas dependências do laboratório de geologia do Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) Vale para caracterizar o rejeito de flotação puro, tanto nas amostras retiradas dos blocos indeformados coletados nos trechos compactados e esteirados da pista teste, e nas amostras deformadas coletadas ao lado do local onde foram extraídos e coletados os blocos indeformados, as quais foram reconstituídas em laboratório por meio do método de *Moist Tamping*. Desta forma, tem-se quatro amostras a serem analisadas para avaliar os seguintes aspectos: tamanho dos poros, a organização dos grãos e orientação dos grãos.

Para a preparação das amostras, primeiramente foi empregada a técnica de sessão polida na amostra, a qual a mesma é mergulhada em resina, em um ambiente a vácuo, objetivando preencher os vazios com a resina e permitir a integridade da amostra, sem riscos que a mesma se desintegre ao cortá-la para se obter a seção polida.

Após a conclusão da sessão polida, é necessário empregar uma técnica denominada “carbonização de amostras”, por meio do aparelho Evaporadora de Carbono a Vácuo, da marca JEOL, visando melhorar a condutividade elétrica da amostra na execução do MEV.

A Figura 3-21 apresenta a etapa de carbonização da amostra, na qual deve-se realizar o posicionamento da seção polida dentro da evaporadora, onde a mesma irá realizar o processo de “condensação” do carbono na amostra, aprimorando a condutividade elétrica da mesma. Após este processo, o ensaio MEV pode ser executado.



Figura 3-21 – Processo de carbonização da amostra para execução do ensaio MEV por meio da evaporadora de carbono. Fonte: o autor

Posterior a secagem, a amostra é cortada estando envolvida pela resina em um formato de disco, como mostram a Figura 3-22 e a Figura 3-23, sendo esta sessão polida a amostra a ser continuada para preparação para realizar o ensaio de MEV. Todas as amostras caracterizadas pela sessão polida estão orientadas de tal forma que o topo das amostras indeformadas e reconstituídas estão representados na porção superior da sessão polida. Da mesma forma, a base está representada pela porção inferior da sessão polida.



Figura 3-22 – Posicionamento das seções polidas para identificação e organização, etapa anterior ao posicionamento das amostras no MEV. Fonte : o autor.



Figura 3-23 – Seções polidas após aplicação de resina, posicionadas no equipamento para ensaio MEV. Fonte : o autor

Para a análise microestrutural do rejeito filtrado de flotação foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo MEV FEI Inspect F50, por meio de fonte de elétrons por emissão de campo (FEG), no modo de detecção *back-scattered electrons*, comumente conhecido como BSE, ou de elétrons retroespalhados. A Figura 3-24 ilustra o aparelho utilizado para a execução dos ensaios.



Figura 3-24 - MEV FEI Inspect F50 – Laboratório de mineralogia Vale – Fonte: o autor

Por meio da análise microestrutural da amostra, é possível apresentar informações detalhadas sobre a *fabric* dos grãos do rejeito de flotação, como a orientação e distribuição dos grãos na amostra. Estes dados são cruciais para entender as características físicas e mecânicas dos rejeitos de flotação, bem como para avaliar a consistência e uniformidade desses materiais. Também foi realizado o ensaio de análise mineralógica utilizando a técnica QEMSCAN nas amostras no mesmo aparelho, visando compor a mineralogia e análise de distribuição química da mesma.

4. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos referentes aos ensaios executados com o rejeito de flotação filtrado arenoso para as amostras indeformadas e deformadas reconstituídas em laboratório por meio da técnica de “*Moist Tamping*”. Foi realizada uma análise comparativa do comportamento do rejeito em condições de carregamento estático e uma tentativa de carregamento dinâmico, analisando as diferenças de comportamento quando ensaiadas amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, em dois estados de compactação distintos (em um deles, considerou-se o peso do próprio trator para realizar a compactação. Já no segundo estado, considerou-se a utilização de um rolo compactador liso após a passagem do trator). Para auxiliar na análise dos comportamentos mecânicos do rejeito, foi também realizado ensaios para entender a *fabric* do material, auxiliando na interpretação mecânica dos resultados.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO COMPLETA

4.1.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR SEDIMENTAÇÃO, PENEIRAMENTO

Foi realizado o ensaio de granulometria por sedimentação, peneiramento, utilizando as amostras deformadas coletadas na pista-testes mediante compactadas e compactadas. As amostras indeformadas não foram utilizadas para o ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento uma vez que se optou por não retirar grandes quantidades necessárias para o ensaio em aparas do bloco, visando não perturbar a amostra. Os resultados das curvas granulométricas são apresentados na Figura 4-1. A partir deles, é possível afirmar que as amostras são constituídas de, aproximadamente, 30% de areia fina, 65% de silte e 5% de fração-argila. Além disso, é possível perceber que as amostras possuem uma tendência de apresentar uma distribuição homogênea dos materiais, uma vez que são bastante similares.

Ao concluir a plotagem da curva, é notado que o ensaio por sedimentação, peneiramento, não define de maneira completa a parcela de fração-argila das amostras ensaiadas. Dessa forma, foi também realizado o ensaio de granulometria a laser, onde o resultado está no item 4.1.2, visando também confirmar a homogeneidade das amostras coletadas.

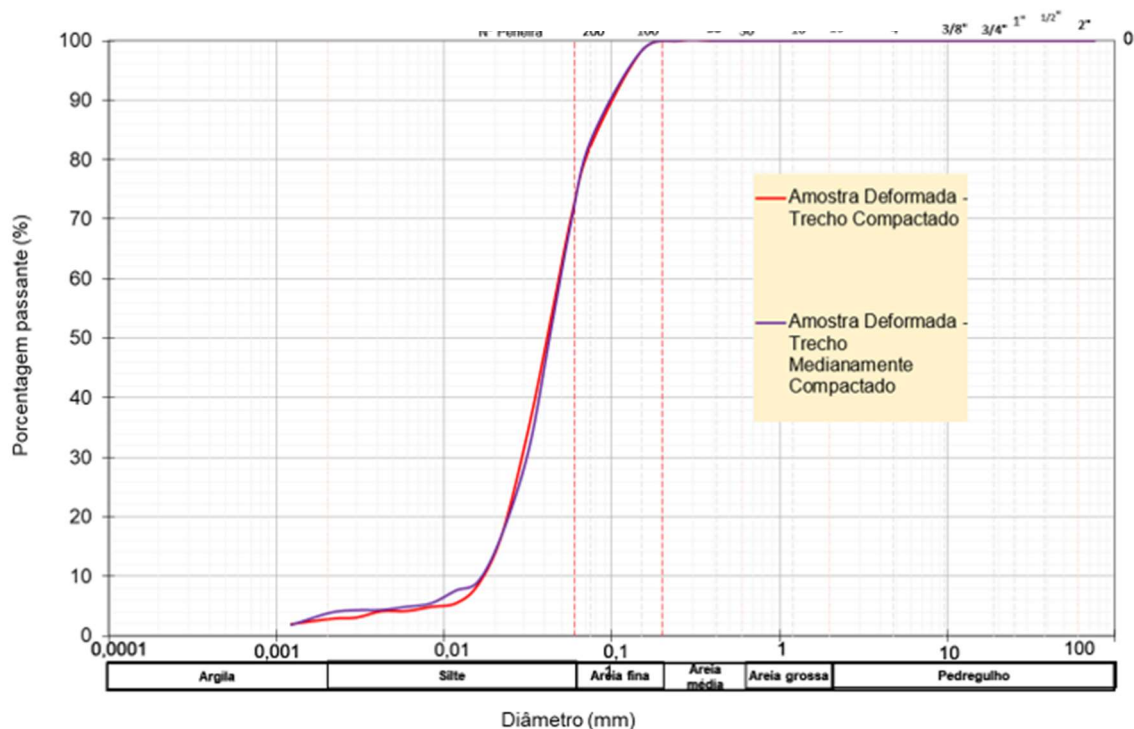


Figura 4-1 - Curva de distribuição granulométrica – granulometria por sedimentação, peneiramento

4.1.2. ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER

O ensaio de granulometria a laser realizado com as amostras deformadas e indeformadas (a execução deste ensaio com a amostra indeformada se mostrou viável uma vez que uma pequena quantidade de material é necessário para execução, o que foi retirado por aparas do bloco sem perturbar a amostra), de ambas as pistas teste medianamente compactadas e compactadas, mostra que o material de rejeito de flotação oriundo do processo de beneficiamento da usina de beneficiamento de minério de ferro pode ser de fato classificado como um silte arenoso. Majoritariamente, os materiais possuem 40% de areia fina, 58% de silte e 2% de fração-argila.

Comparando os resultados das quatro amostras ensaiadas, como apresentado na Figura 4-2, é possível concluir que as curvas granulométricas são bastante uniformes e homogêneas. Isto evidencia que os locais de coleta foram próximos um dos outros e bem determinados, garantido a qualidade da coleta das amostras deformadas e indeformadas em campo. A homogeneidade das curvas mostra também sugere uma probabilidade remota de quebra dos grãos das amostras de rejeito, uma vez que as curvas granulométricas dos trechos medianamente compactado e compactado com o rolo são uniformes entre si.

Assim, é possível deduzir que a diferença de compactação impressa nas pistas teste, ou seja, tanto a amostra coletada na pista com trecho compactado, tanto a amostra coletada no trecho medianamente compactado, não alteram a distribuição granulométrica das amostras. Ademais, percebe-se que a diferença entre o método de coleta das amostras, seja indeformada retirada no campo em forma de bloco, ou deformada, retirada por escavação manual, também não altera a distribuição granulométrica das amostras.

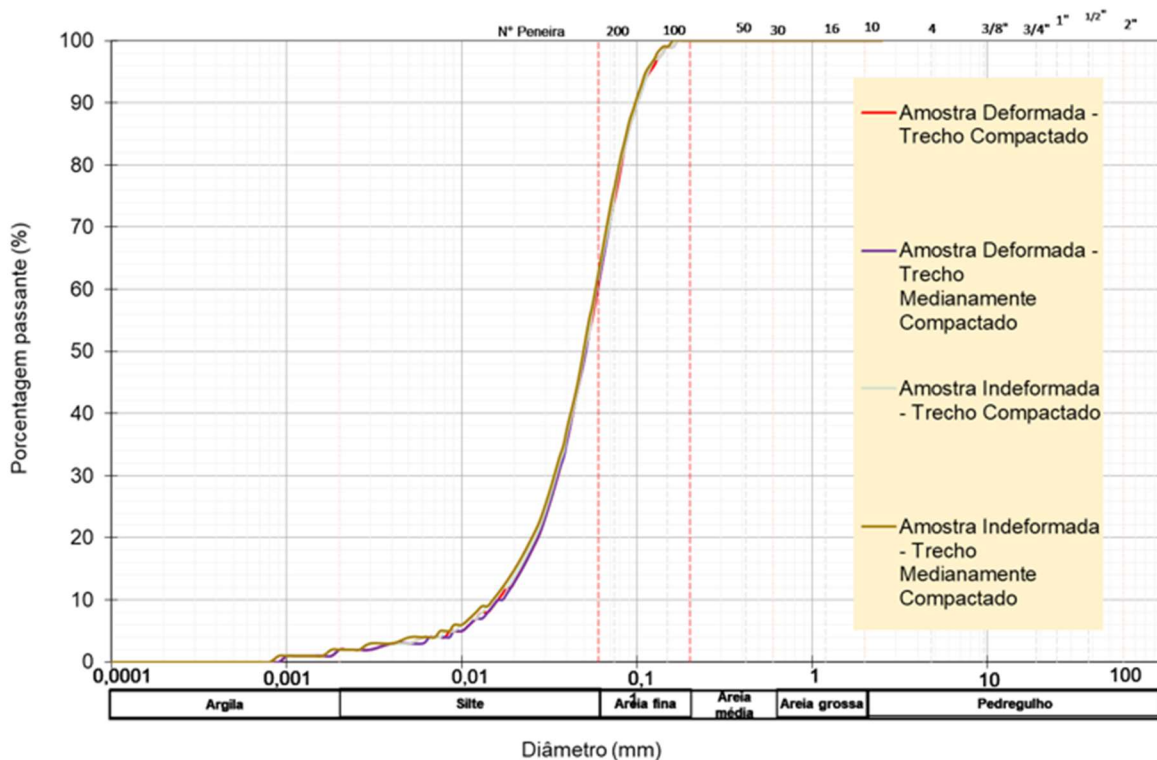


Figura 4-2- Curva de distribuição granulométrica – granulometria a Laser

4.1.3. ENSAIOS DE LIMITES DE ATTERBERG

Foram realizadas tentativas para execução dos ensaios de Limite de Atterberg, para determinação dos limites de liquidez e limite de plasticidade das amostras ensaiadas. Foi observado que para nenhuma amostra ensaiada foi possível concluir os ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade, impondo uma característica não plástica (NP) para o rejeito filtrado de flotação. A Tabela 4-1 apresenta um resumo dos resultados para os ensaios de Limite de Atterberg.

Tabela 4-1 – Resultados dos ensaios de Limite de Atterberg

Amostra / Abreviação	Indeformada/Deformada Reconstituída	Pista teste	Limite de Atterberg
----------------------	-------------------------------------	-------------	---------------------

AIC	Indeformada	Compactado	NP
AIMC	Indeformada	Medianamente Compactado	NP
ADRC	Deformada Reconstituída	Compactado	NP
ADRCM	Deformada Reconstituída	Medianamente Compactado	NP

4.1.4. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Foi realizado o ensaio para determinação da massa específica dos grãos, nas amostras de rejeito filtrado de flotação AIC, AIMC, ADRC e ADRCM. A Figura 4-3 apresenta um resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios executados. Uma pequena quantidade de material é necessária para execução do ensaio, o que viabilizou o ensaio a partir de aparas do bloco indeformado, sem perturbar a amostra.

É possível perceber que há uma similaridade significativa entre os resultados obtidos para as diferentes amostras, sendo o menor valor obtido de 3,077 e o maior valor de 3,103, apresentando uma média de 3,087. Esta uniformidade dos resultados evidencia o rigor na coleta das amostras, assim como discutido nos resultados de granulometria.

Assim, é possível afirmar que as amostras ensaiadas apresentam resultados de massa específica dos grãos bastante uniformes, podendo ser classificadas como homogêneas entre si. É importante destacar que o valor encontrado é compatível com resultados previamente encontrados na literatura para rejeitos oriundos de minério de ferro.

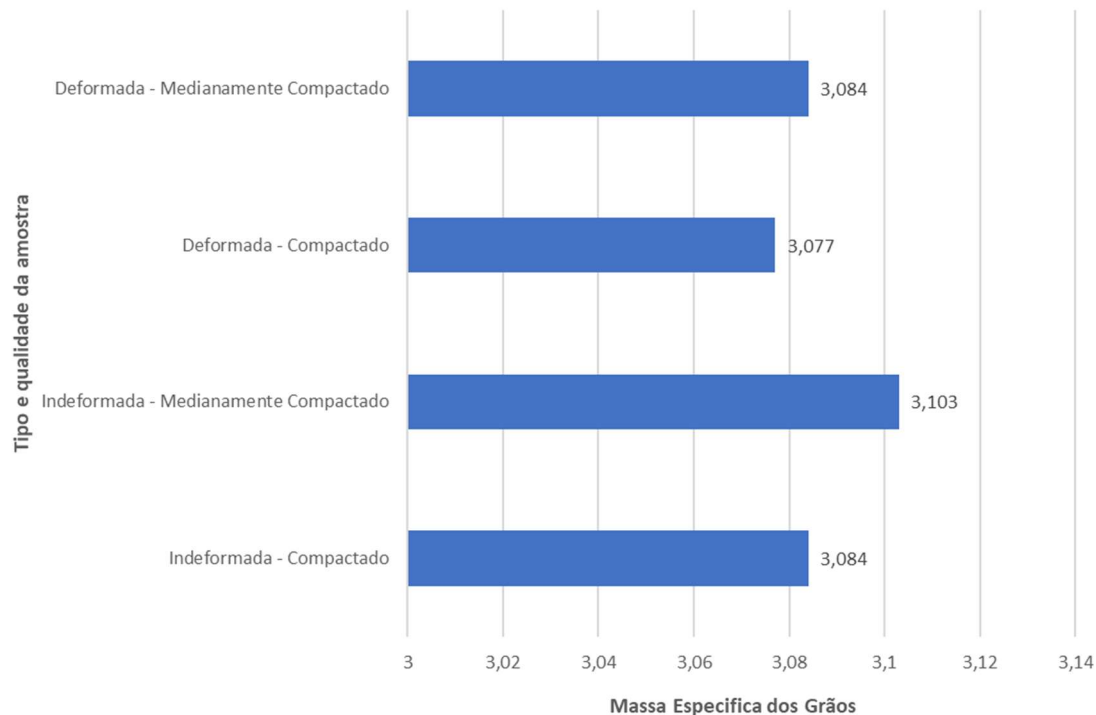


Figura 4-3 – Resultados de ensaio para determinação da massa específica dos grãos

4.1.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – PROCTOR NORMAL

Foi realizado o ensaio de compactação com a utilização da energia referente ao Proctor Normal, nas amostras deformadas coletadas nas pistas teste medianamente compactada e compactada. A Figura 4-4 e a Figura 4-5 apresentam os resultados das curvas de compactação obtidas a partir das amostras de rejeito filtrado. Devido a grande quantidade de amostra necessária para execução do ensaio, optou-se por não executar o mesmo a partir de parte do bloco indeformado, visando preservar o mesmo para os ensaios especiais para análise mecânica e da *fabric* do material.

Analisando a Figura 4-4, por meio do ponto de máxima inflexão da curva de compactação, é possível determinar os valores de umidade ótima (eixo “x”) e densidade seca máxima (eixo “y”) da amostra deformada coletada no trecho compactado. Assim, chega-se aos valores de 14,19 % para umidade ótima, e 1,86 g/cm³ para densidade seca máxima.

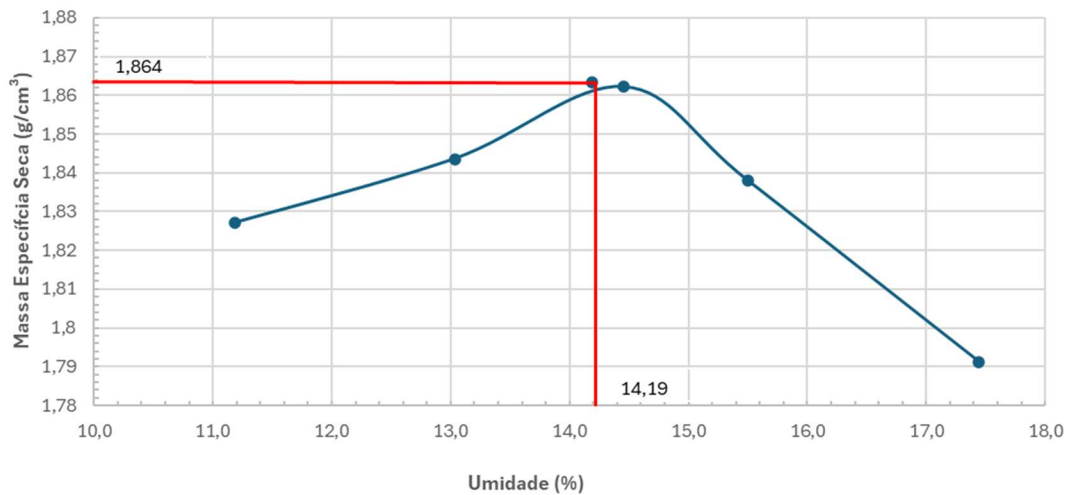


Figura 4-4 – Curva de compactação para amostra deformada, coletada no trecho compactado

Para o bloco coletado na pista teste compactada, como destacado no item 3.2.1, o ensaio de Hilf apresentou um resultado de densidade seca de aproximadamente 1,82 g/cm³. De posse deste resultado, podemos determinar o grau de compactação (GC) do bloco, através da Equação 4-1:

$$GC (\%) = \frac{\gamma_{campo}}{\gamma_{laboratório}} \quad (4.1)$$

Equação 4-1

Em que:

- GC : Grau de Compactação
- γ_{campo} : Densidade seca determinada in situ, em g/cm³
- $\gamma_{laboratório}$: Densidade seca determinada no ensaio de Proctor , em g/cm³

Assim, tem-se o resultado:

$$GC = \frac{1,82}{1,86} = 98\%$$

De posse do valor de 3,09 para massa específica dos grãos, demonstrada no item 4.1.4, é possível calcular o índice de vazios na compactação por meio da Equação 4-2:

$$e = \frac{\text{Massa específica dos grãos } 3,09}{\text{Massa específica seca } 1,82} - 1 \quad (4.2)$$

Equação 4-2

Resultando no valor de 0,69.

Por meio da Figura 4-5, utilizando o mesmo procedimento descrito para a Figura 4-4, é possível obter os valores de umidade ótima e densidade seca máxima para a amostra deformada coletada no trecho medianamente compactado. Desta forma, chega-se nos resultados de 14,72% para umidade ótima e 1,87 g/cm³ para densidade seca máxima.

Comparando ambos os resultados, observa-se que ambos os resultados alcançados para umidade ótima e densidade seca máxima, para ambas as amostras coletadas nas pistas teste compactadas e medianamente compactadas estão próximos, evidenciando a homogeneidade e uniformidade das amostras coletadas. Além disso, é relevante destacar que a umidade ótima do material do trecho medianamente compactado é superior ao valor referente ao trecho compactado.

Este resultado é compatível com o método de compactação realizado em cada pista teste, uma vez que a passagem do rolo compactador vibratório no trecho compactado faz reduzir o índice de vazios do material, expulsando água e ar dos vazios existentes entre os grãos, consequentemente apresentando um valor de umidade ótima do material ligeiramente inferior ao valor obtido para o trecho medianamente compactado, onde não houve a passagem do rolo compactador, somente a esteira do trator, fazendo com que o fenômeno de expulsão de ar e água dos vazios não fosse tão expressivo, deixando assim o valor de umidade ótima aproximadamente 0,60% superior ao valor do trecho compactado.

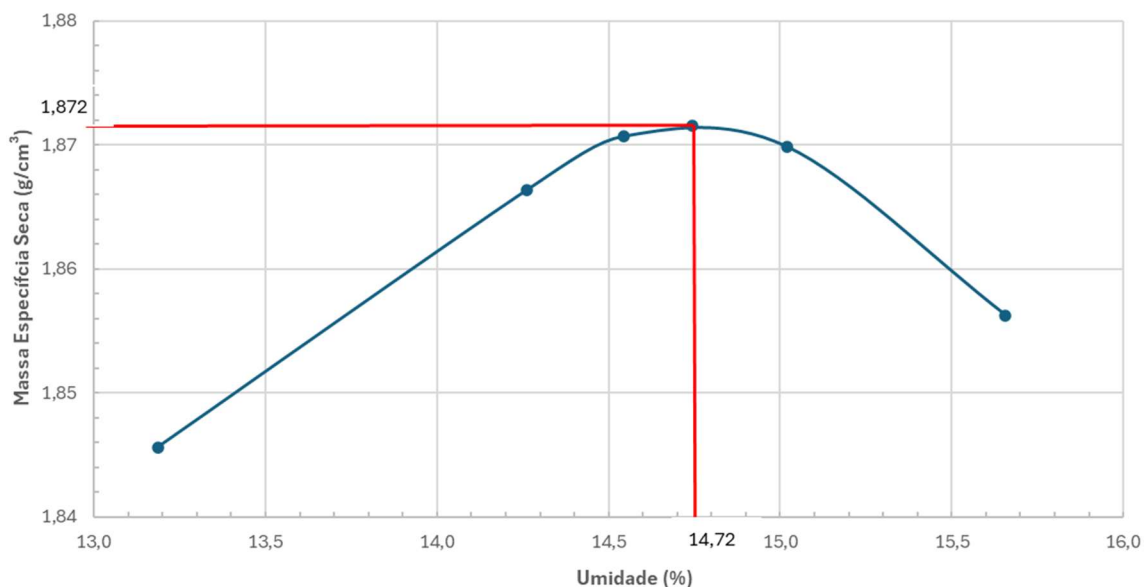


Figura 4-5 - Curva de compactação para amostra deformada, coletada no trecho medianamente compactado

Para o trecho medianamente compactado, optou-se por usar como referência os resultados do ensaio de Hilf obtidos em campo, como descritos no item 3.2.1. O Grau de Compactação para a base da camada, onde foi coletado o bloco, foi de 98%, aproximadamente. Para o índice de vazios, usando a equação 4.2, chega-se no resultado de 0,65.

4.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA

4.2.1. ENSAIO DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO 1D - UNIAXIAL

Foi realizado o ensaio de adensamento uniaxial, com determinação de permeabilidade, para as amostras deformadas reconstituídas em laboratório, e para as amostras indeformadas coletadas em campo, em ambas as pistas testes, objetivando analisar a compressibilidade dos materiais e comparar a compressibilidade entre as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas.

Para a execução dos ensaios, foram realizados entre 8 e 9 estágios de carregamento (pressão variando entre 12 e 1600 kPa), e 3 estágios de descarregamento (pressão entre 800 e 24 kPa).

A Figura 4-6 apresenta os resultados para o ensaio de adensamento uniaxial realizado com a amostra deformada reconstituída e amostra indeformada da pista compactada. A Figura 4-7 apresenta o resultado das mesmas amostras citadas na Figura 4-6, porém em função do índice de vazios normalizado.

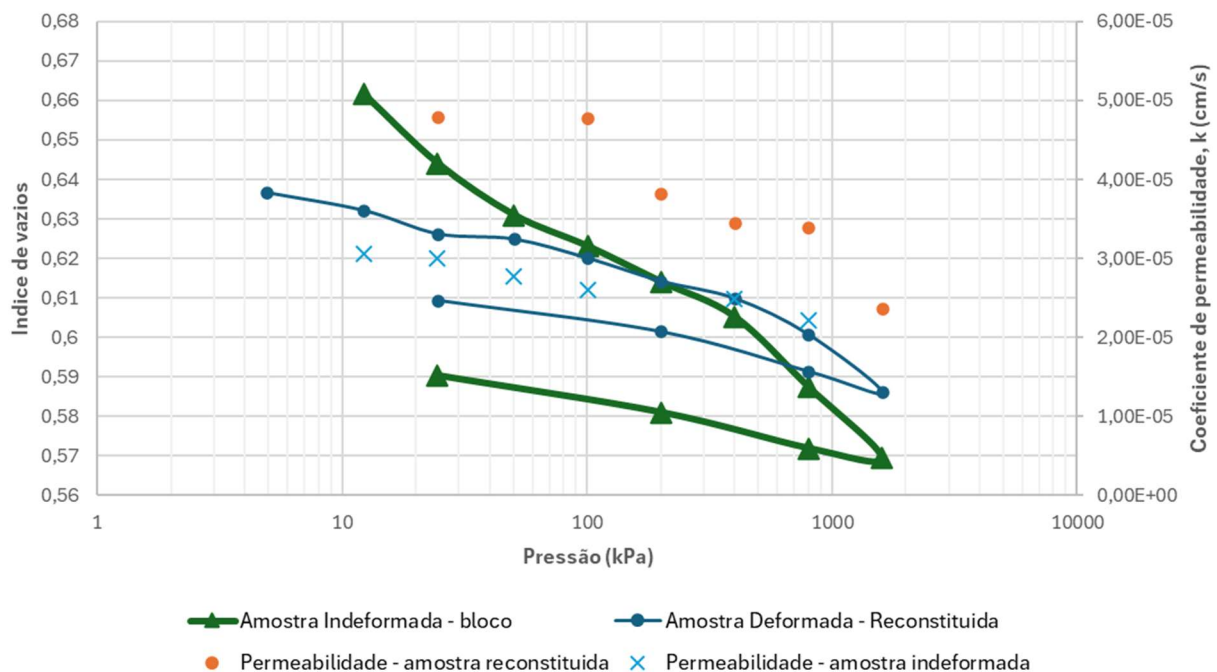


Figura 4-6 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho compactado

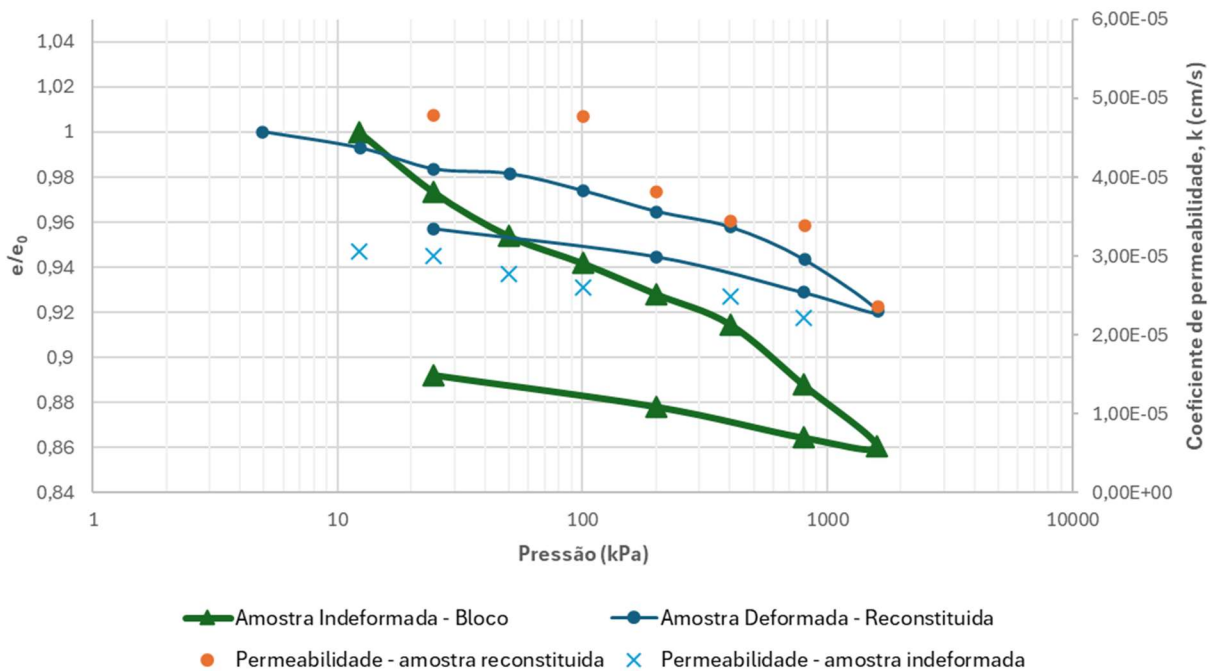


Figura 4-7 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho compactado- Índice de vazios normalizado

Analisando os resultados apresentados na Figura 4-6 e na Figura 4-7, pode-se concluir que a amostra deformada reconstituída pelo método de *Moist Tamping* apresentou um comportamento menos compressível se comparado com o resultado obtido para a amostra indeformada. Isto pode ser observado pela variação entre o de índice de vazios normalizado no primeiro estágio de carregamento, e o valor do índice de vazios normalizado para o último estágio de descarregamento.

Para a amostra indeformada, esta variação é de aproximadamente 0,11. Já para a amostra deformada reconstituída, tem-se um valor de aproximadamente 0,04. Quanto menor for o valor desta variação em relação aos índices de vazios final e inicial do ensaio, menos compressível é o material.

Dessa forma, é possível inferir que o método de reconstituição de amostras deformada *Moist Tamping* representou uma condição de laboratório na qual o rejeito se comportou de forma menos compressível, se comparado com a condição de campo, representada pela amostra indeformada.

Além disso, é possível perceber que os valores de permeabilidade obtidos para a amostra deformada reconstituída foram ligeiramente superiores se comparados com os valores de permeabilidade obtidos para a amostra indeformada: variando entre aproximadamente 2,0 E-05 e 3,0 E-05 cm/s para a amostra indeformada, e 2,5 E-05 e 4,8 E-05 cm/s para a amostra deformada reconstituída. Apesar da diferença numérica, pode-se considerar que os valores estão bem próximos, caracterizando um material de característica mais impermeável, esperado para um rejeito filtrado de matriz siltosa.

Foi também determinada a tensão de pré-adensamento a partir dos resultados presentes na Figura 4-6, a partir do método de Pacheco e Silva. Para a amostra deformada reconstituída da pista teste do trecho compactado, obteve-se o valor de 355,4 kPa, referente a um índice de vazios de pré adensamento de 0,618. Já para a amostra indeformada do mesmo trecho compactado, obteve-se o valor de 92,3 kPa, referente a um índice de vazios de 0,644, corroborando com a hipótese da amostra indeformada se apresentar mais compressível que a amostra deformada reconstituída pelo método de *Moist Tamping*.

É importante trazer a luz da discussão os valores de grau de compactação a qual foi moldada a amostra reconstituída, e do bloco indeformado. A amostra reconstituída foi moldada utilizando um grau de compactação de 100 % do Proctor Normal, já o bloco coletado na pista teste compactada obteve um grau de compactação de aproximadamente 98%. Apesar da diferença entre os valores ser pequena, o resultado menos compressível da amostra reconstituída pode ser de certa forma interpretado pelo grau de compactação superior adotado para moldagem. Adicionalmente, é relevante destacar a ausência de histórico de tensões imputada a condição da amostra reconstituída, uma vez que foi moldada em laboratório, o que pode ser notado pelo valor superior da tensão de pré adensamento em relação ao valor encontrado na tensão de pré adensamento do bloco indeformado, que já possui um pequeno histórico de tensões associado a construção da pista teste.

A Figura 4-8 apresenta os resultados para o ensaio de adensamento uniaxial realizado com a amostra deformada reconstituída e amostra indeformada para a pista medianamente compactada. A Figura 4-9 apresenta o resultado das mesmas amostras citadas na Figura 4-8, porém em função do índice de vazios normalizado.

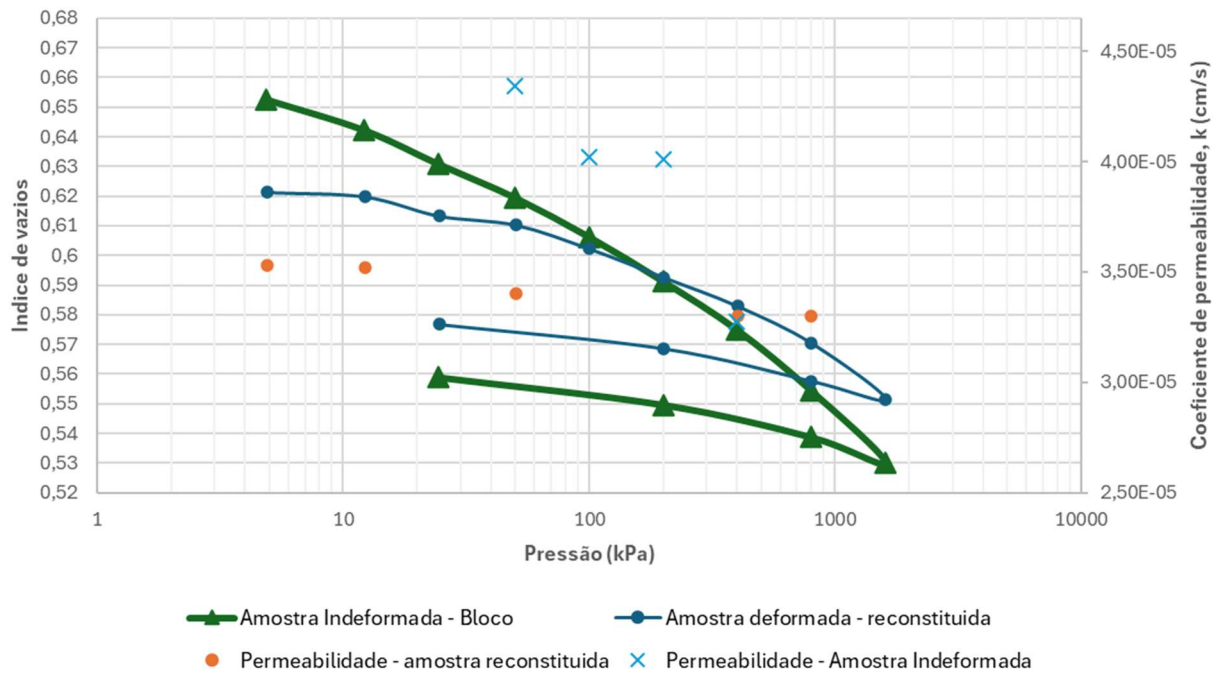


Figura 4-8 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho medianamente compactado

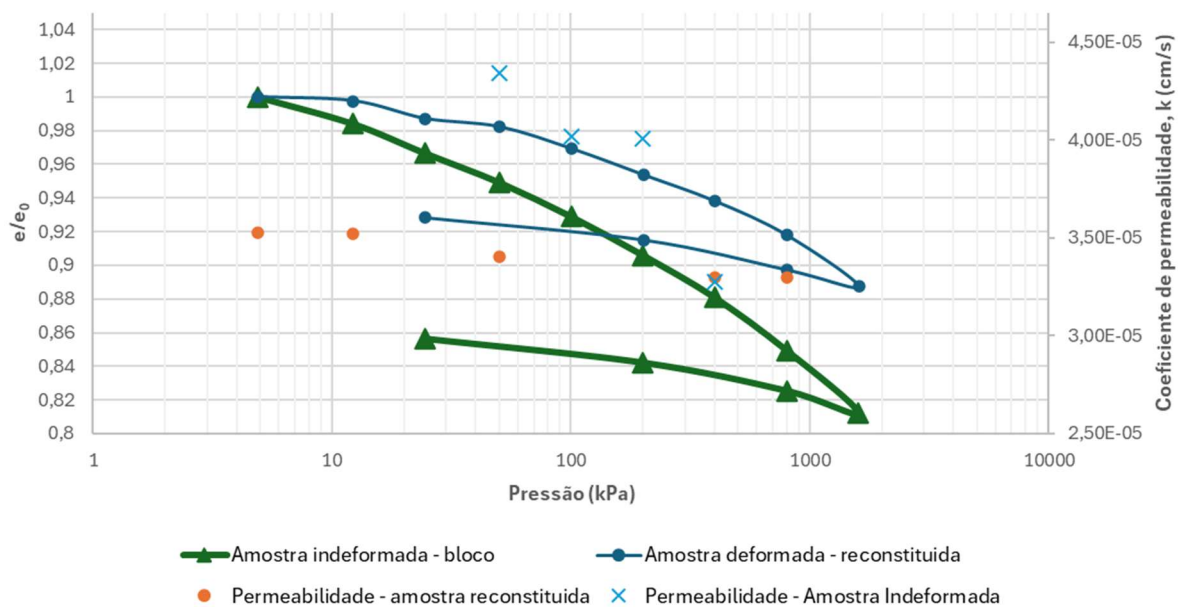


Figura 4-9 - Ensaio de adensamento uniaxial – Amostras coletadas no trecho medianamente compactado- Índice de vazios normalizado

Ao observar os resultados presentes na Figura 4-8 e na Figura 4-9, também é possível notar que a amostra deformada reconstituída pelo método de *Moist Tamping*, é menos compressível se comparada aos resultados da amostra indeformada, ambas coletadas na pista medianamente compactada.

Analisando os resultados para a amostra indeformada, a variação entre os índices de vazios normalizado final e inicial do ensaio é de aproximadamente 0,14. Já para a amostra deformada reconstituída, tem-se um valor de aproximadamente 0,07. Assim, é também viável deduzir que o método de reconstituição de amostras deformada *Moist Tamping* representou uma condição de laboratório na qual o rejeito se comportou de maneira menos compressível, quando comparado com a condição de campo, representada pela amostra indeformada.

Ao se analisar a permeabilidade obtida nas amostras da pista teste medianamente compactada, tem-se um cenário inverso ao apresentado nas amostras do trecho compactado: os valores de permeabilidade alcançados para a amostra deformada reconstituída foram ligeiramente inferiores se comparados com os valores de permeabilidade obtidos para a amostra indeformada: variando entre aproximadamente 4,0 E-05 e 4,3 E-05 cm/s para a amostra indeformada, e 3,3 E-05 e 3,5 E-05 cm/s para a amostra deformada reconstituída. Apesar da diferença numérica, pode-se considerar que os valores estão bem próximos, caracterizando um material de característica mais impermeável, esperado para um rejeito filtrado de matriz siltosa.

Determinou-se a tensão de pré-adensamento a partir dos resultados presentes na Figura 4-8, a partir do método de Pacheco e Silva. Para a amostra deformada reconstituída da pista teste do trecho medianamente compactado, obteve-se o valor de 219,6 kPa, referente a um índice de vazios de pré adensamento de 0,606. Para a amostra indeformada da mesma pista teste medianamente compactada, obteve-se o valor de 113,2 kPa, referente a um índice de vazios de 0,623, ainda confirmando a hipótese da amostra indeformada se apresentar mais compressível que a amostra deformada reconstituída pelo método de *Moist Tamping*.

Da mesma ótica analisada para os resultados da pista teste compacta, os resultados da pista teste medianamente compactada também evidenciam a ausência de histórico de tensões aplicada nas amostras reconstituídas e o valor inferior do grau de compactação do bloco versus o utilizado para moldagem, uma vez que os resultados para essas amostras também apresentaram ser menos compressíveis.

4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

4.3.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO SIMPLES ESTÁTICO (DSS)

Objetivando uma interpretação mais clara e concisa dos resultados obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto simples estático (DSS), com ambas as amostras deformadas

reconstituídas e indeformadas, em ambas as pistas testes medianamente compactadas e compactadas, é importante revisitar os conceitos de “*strain hardening*”, “*strain softening*” e “*quasi-steady state*”, que envolvem diferentes possíveis comportamentos do material em termos de trajetória de tensões e curvas de deformação X tensão cisalhante.

Os autores (Sarkar et al., 2019) realizaram uma pesquisa para avaliar os efeitos do tamanho dos grãos no comportamento mecânico de solos granulares. Para isso, foram realizados ensaios de cisalhamento direto simples (DSS), visando avaliar o tipo de comportamento mecânico apresentado por esses materiais. De acordo com (Sarkar et al., 2019), uma amostra de solo pode apresentar comportamentos “Strain Hardening”, “Strain Softening” e “Quasi steady state”. A Figura 4-10 representa de forma gráfica os comportamentos mecânicos “*Strain hardening*”, “*Strain Softening*” e “*Quasi-Steady-State*”, para solos granulares.

Assim, no comportamento de “*Strain hardening*” é possível verificar um ponto de transformação de fase (PT), no qual o material de solo atinge um valor de pico de resistência ao cisalhamento, e, após uma certa estabilização do valor desta tensão de cisalhamento, o mesmo passa a aumentar, caracterizando uma nova tendência dilatante ao comportamento mecânico do material.

No comportamento “*Strain Softening*” é possível observar a mobilização do ângulo de atrito no pico da resistência de cisalhamento (importante recordar que o ensaio DSS foi realizado na condição não drenada), ocorrendo, após este pico, a ruptura da amostra. Em uma grande maioria de ensaios executados em amostras de solos, o comportamento “*Strain Softening*” pode ser observado. Assim, tomando como referência o pico da curva, um valor máximo de tensão de cisalhamento pode ser definido, referente a um determinado valor de deformação cisalhante. Dessa forma, é possível traçar as envoltórias de rupturas dos materiais.

Segundo os autores (Sarkar et al., 2019), para ensaios não drenados, o comportamento de “*Quasi-Steady State*” (QSS) pode ser encontrado, conforme apresentado pela Figura 4-10 a qual apresenta possibilidades de comportamento de um material de solo granular em gráfico de tensão cisalhante versus deformação, e também no gráfico de trajetória de tensões. De acordo com (Sarkar, Goudarzy, & König, 2019), o comportamento QSS é largamente considerado um comportamento real de um material, do que um fenômeno induzido por meio de um ensaio de laboratório.

Por meio da Figura 4-10, é possível perceber que se pode ter três comportamentos a partir do aumento da deformação axial: escoamento parcial (QSS), sem escoamento (PT), e escoamento

total (liquefação). Para que ocorra o escoamento, ou liquefação, o valor da tensão desviadora, ou tensão de cisalhamento, passa a decair, após atingir o pico, até que se encontre um estado de estabilidade (“*steady state*”), característico do comportamento “*strain softening*”. É possível também notar um outro tipo de comportamento, quando, após o início da redução de valores da tensão desviadora, o material atinja o estado de “*Quasi-Steady State*” (QSS), e, após este ponto, a tensão cisalhante volta a aumentar, trazendo então um comportamento de escoamento ou liquefação parcial ao material. Já para as condições onde não há escoamento, ou seja, não há liquefação, é notável um ponto de transformação de fase (PT), o qual evidencia-se uma mudança da tendência contrátil para uma tendência dilatante do material. Observando o ponto de QSS no gráfico de tensão octaédrica p' versus tensão cisalhante ou desviadora q (trajetória de tensões efetivas), percebe-se que houve uma significativa geração de poropressão até se atingir o ponto de “*Quasi-Steady State*”, apresentando até este ponto um comportamento contrátil, e, após este ponto, o material dilatou. Dessa forma, pode-se dizer que o comportamento de “*Quasi-Steady State*” é um comportamento intermediário entre o comportamento dito “*Strain hardening*”, onde observa-se o PT, e o “*Strain Softening*”, onde observa-se somente o comportamento contrátil e a liquefação do material.

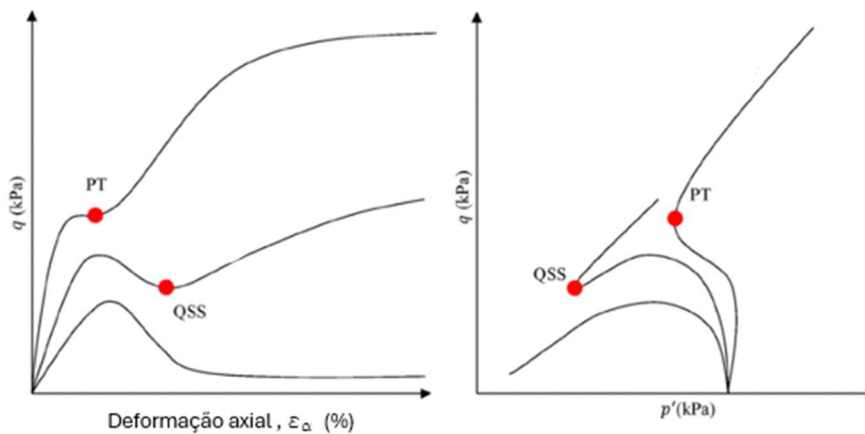


Figura 4-10 – Ilustração dos diferentes comportamentos mecânicos associados a um solo, destacando o comportamento “*Quasi-Steady State*”, identificado como “QSS”, em ambos os gráficos de tensão cisalhante versus deformação, à esquerda, e o gráfico de trajetória de tensões, à direita. Fonte : modificado por (Sarkar et al., 2019)

A Figura 4-11 apresenta os resultados das curvas de tensão de cisalhamento versus deformação cisalhante, para as tensões axiais ensaiadas de 50, 100 e 200 kPa, já a Figura 4-12 apresenta os resultados de tensão X deformação para as tensões axiais de 400 e 800 kPa, , para ambas as amostras deformadas reconstituídas (amostras ADRMC) e indeformadas (amostras AIMC) da pista teste medianamente compactada (vale ressaltar que não foi possível concluir o ensaio para a tensão axial de 400 kPa para a amostra deformada reconstituída, devido a um problema técnico do aparelho DSS).

É importante destacar que a deformação máxima cisalhante foi fixada em 30%, para fins de conclusão do ensaio. Observa-se que esta definição apresentou ser razoável para o comportamento mecânico do material, uma vez que próximo aos 30% de deformação todas as curvas já alcançam uma ligeira estabilização, sugerindo que as amostras já atingiram o pico da sua tensão cisalhante, na qual todo o ângulo de atrito já se encontra mobilizado. Uma vez que o tempo

Também é possível perceber, de forma nítida que, para a tensão axial máxima de 800 kPa, ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas apresentaram tensões cisalhantes de pico em deformações bastante similares, entre 18 e 19%, sugerindo uma equiparação entre os resultados. Para as tensões axiais inferiores, de 50 a 200 kPa, é perceptível o alcance de pico da tensão cisalhante logo nos primeiros estágios de deformação, entre 0,5 e 1,0%, observando após este ponto uma queda no valor da tensão cisalhante, demonstrando um comportamento “*Strain Softening*” para as tensões axiais inferiores.

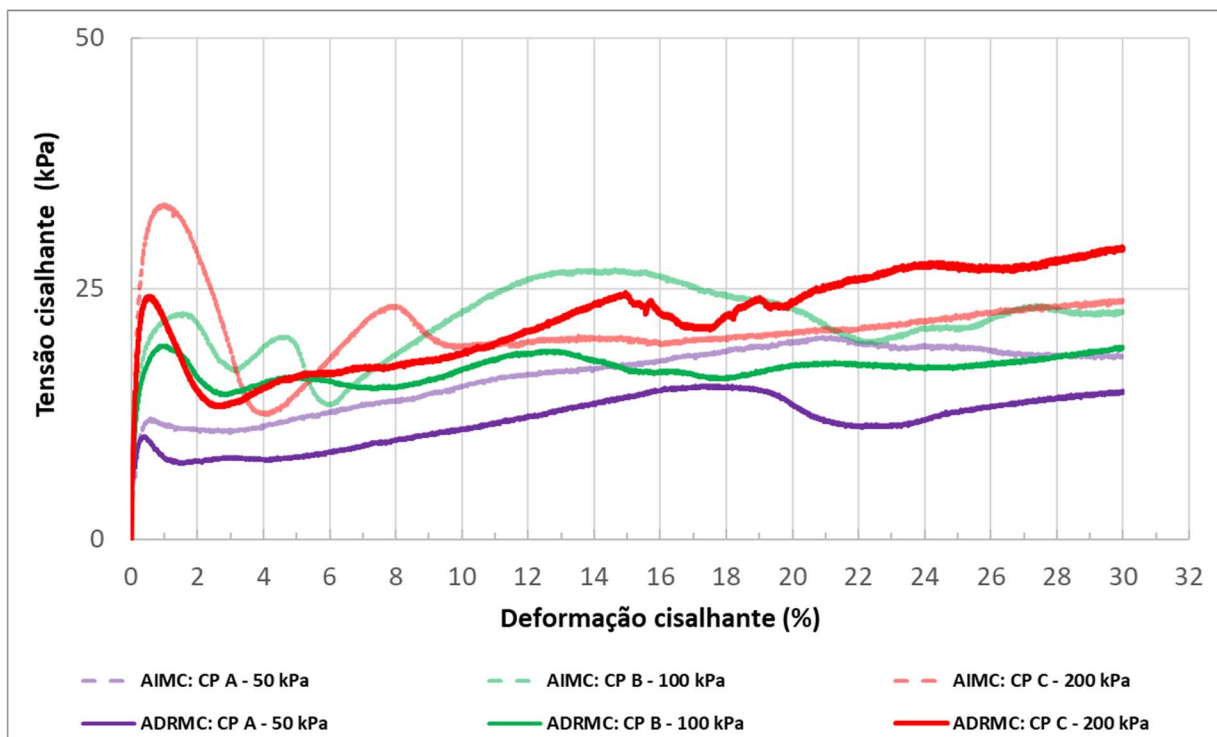


Figura 4-11 – Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste medianamente compactada (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 50, 100 e 200 kPa

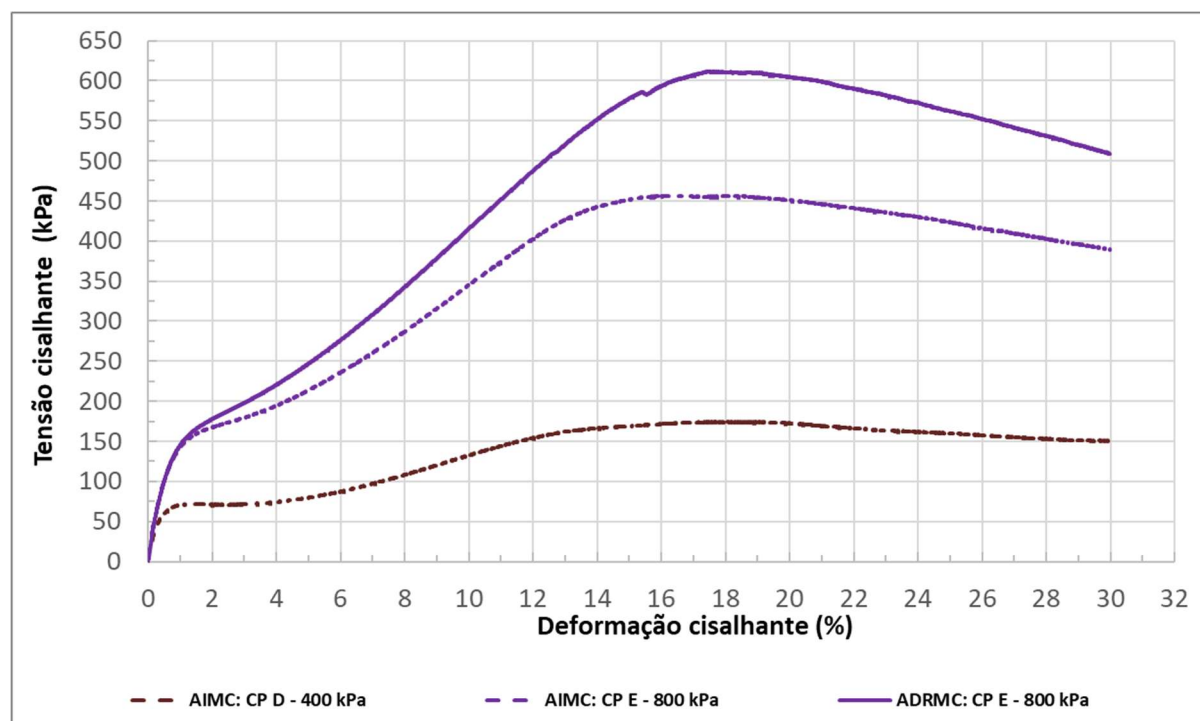


Figura 4-12 - Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste medianamente compactado (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 400 e 800 kPa

A Figura 4-13 apresentam as trajetórias de tensões obtidas para as tensões axiais ensaiadas (50, 100, 200, 400 e 800 kPa), para ambas as amostras deformadas reconstituídas (amostras ADRMC) e indeformadas (amostras AIMC) da pista teste medianamente compactada. A Figura 4-14 apresenta os mesmos resultados em função da tensão vertical normalizada. A partir dos resultados apresentados, observa-se que o material, no início do ensaio, obteve um ganho de excesso de poro-pressão, perceptível pela tendência das curvas em caminharem para a esquerda do gráfico, apresentando um certo comportamento contrátil. Porém, observa-se também o alcance do ponto de “*Quasi-Steady State*”, evidente para as tensões axiais de 400 e 800 kPa, como notado por (Bellaver Corte, Consoli, & Festugato, 2019), o qual a partir deste ponto tem-se uma mudança no comportamento mecânico da amostra, apresentando um comportamento dilatante do material. Neste estágio, todo o excesso de poro-pressão é dissipado, aumentando desta forma o valor da tensão efetiva da amostra.

É importante notar que o comportamento “*Quasi-Steady State*” é notável para todas as tensões axiais aplicadas para o ensaio, mesmo as mais inferiores de 50 a 200 kPa. Além disso, é factível observar que há uma similaridade na trajetória de tensões para a amostra deformada reconstituída e a amostra indeformada, inclusive no ponto de “*Quasi-Steady State*”, o qual se apresenta bastante similar para ambas as amostras, sugerindo que a técnica de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” foi fidedigna com a condição de campo.

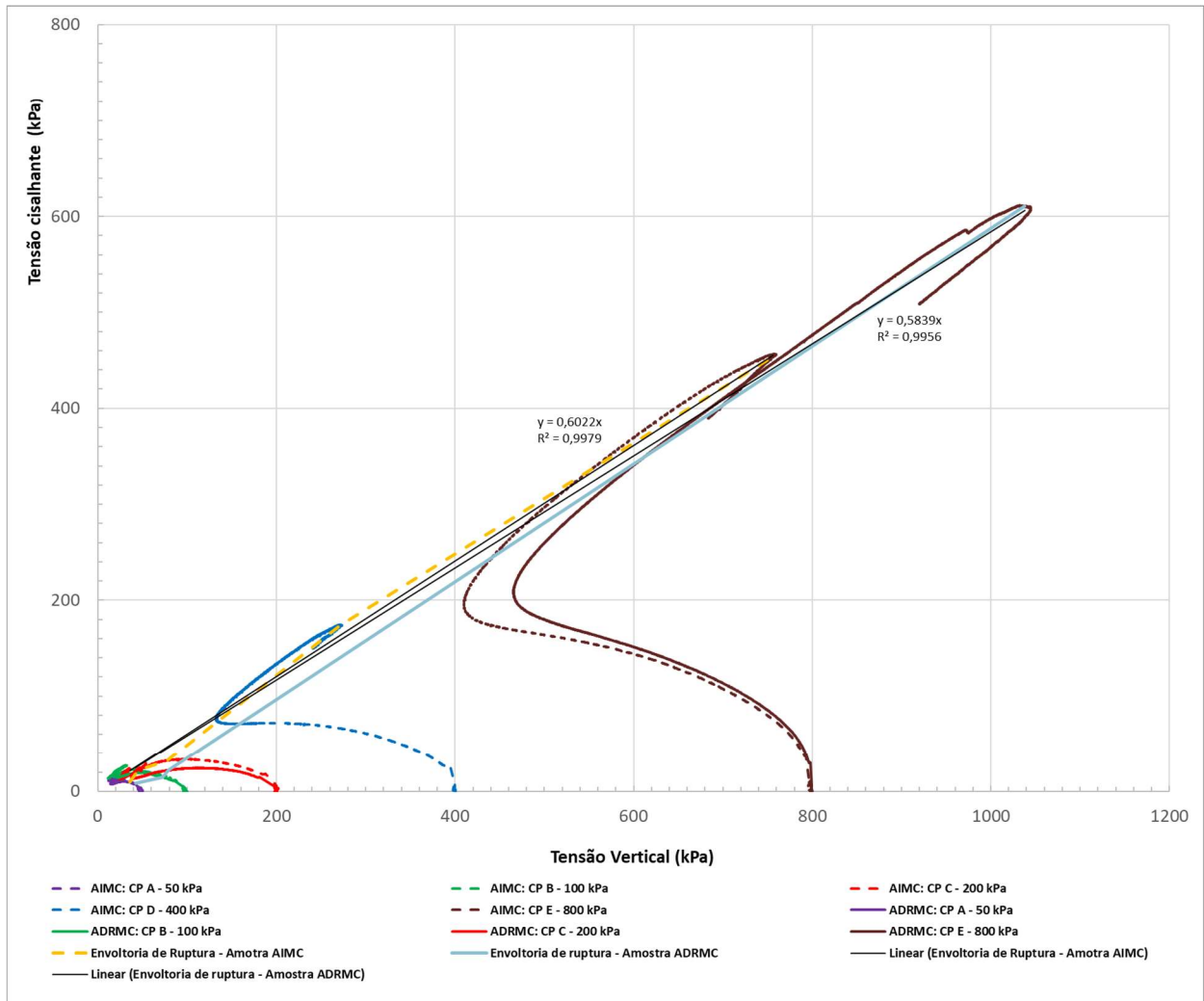


Figura 4-13 – Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho medianamente compactado (deformada reconstituída e indeformada)

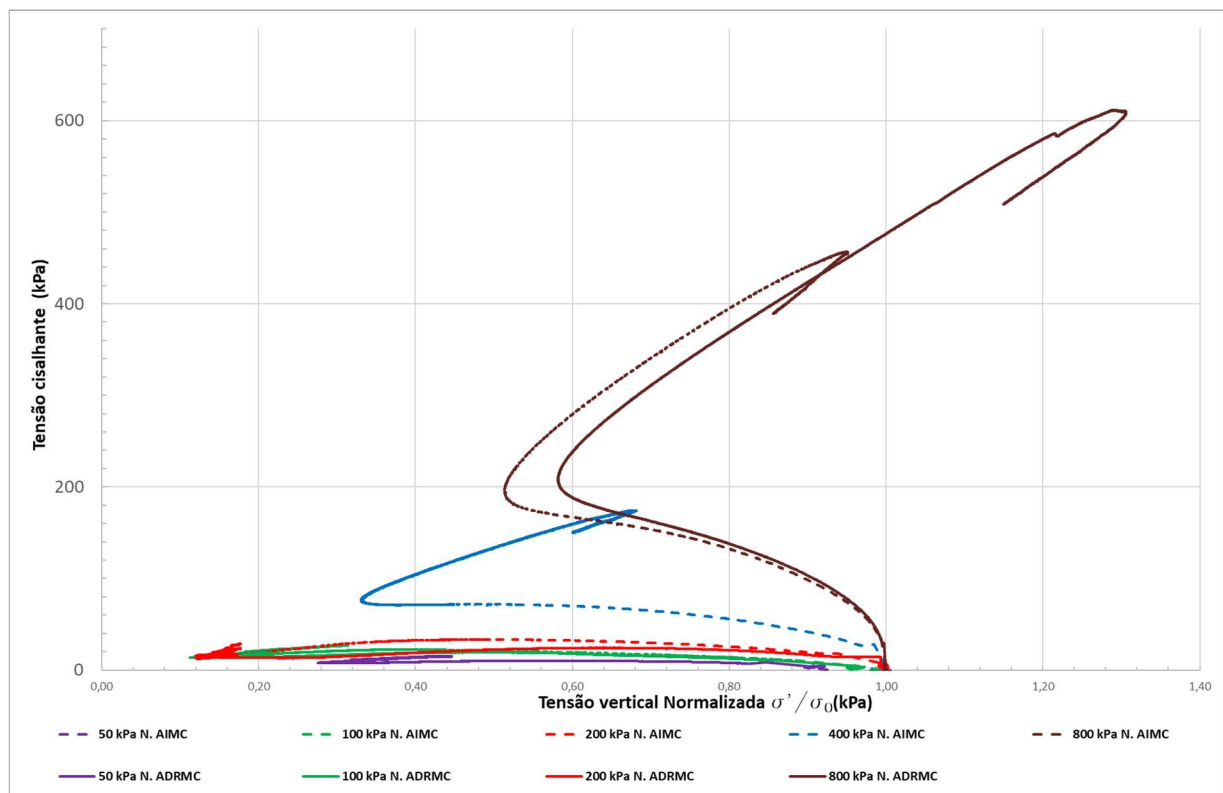


Figura 4-14 - Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho medianamente compactado (deformada reconstituída e indeformada), em função da tensão vertical normalizada

A partir dos valores de deformação cisalhante referentes ao pico de mobilização do ângulo de atrito observado na Figura 4-11, para cada tensão axial ensaiada, determinou-se o referente valor de tensão cisalhante e tensão vertical de cada corpo de prova ensaiado, visando desta forma traçar a envoltória de ruptura das amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, e assim determinar os parâmetros geotécnicos da amostra. A Tabela 4-2 apresenta os resultados de tensão cisalhante e tensão vertical para as respectivas deformações cisalhantes de pico, para a amostra indeformada da pista teste medianamente compactada (amostra AIMC). Na Tabela 4-3, o grau de compactação é referente a energia Proctor Normal, obtido em campo anteriormente a coleta do bloco.

Tabela 4-2 – Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra AIMC

Tensão Axial (kPa)	Deformação cisalhante (%)	Tensão cisalhante (kPa)	Tensão vertical (kPa)	Grau de Compactação	Índice de Vazios após adensamento
50	0,25	9,84	36,08	100%	0,610

100	1,00	21,80	45,55	100%	0,640
200	1,50	31,92	77,14	100%	0,625
400	18,00	173,94	271,65	100%	0,618
800	19,00	454,13	756,35	100%	0,624

A partir dos resultados definidos na Tabela 4-2, foi possível traçar a envoltória de ruptura da amostra indeformada da pista teste medianamente compactada (AIMC), apresentada pela Figura 4-13. Objetivando definir os parâmetros geotécnicos a partir da envoltória de ruptura, traçou-se uma linha de tendência linear referente a envoltória, obtendo desta forma a equação da envoltória. Observa-se que o valor de “R²” obtido está bem próximo de 1,00 (0,9979), indicando que a linearização da curva da envoltória está correta e representativa. A equação de Mohr – Coulomb para a envoltória de ruptura pode ser definida como sendo representado pela: Eq (Equação 4.4-3). :

$$\tau = c' + \sigma'_v \operatorname{tg}(\phi) \quad (4.3)$$

Equação 4.4-3

Em que:

- τ é equivalente a tensão de cisalhamento, em kPa;
- c' é equivalente a coesão efetiva do material, em kPa;
- σ'_v é equivalente a tensão vertical efetiva, em kPa
- ϕ é o ângulo de atrito do material analisado, em graus.

Para fins de determinação da coesão do material, optou-se por cruzar a linha de tendência com o ponto (0,0) do gráfico, uma vez que coesões negativas e/ou superiores a zero para o rejeito filtrado arenoso ensaiado iria representar um valor de coesão aparente. É factível afirmar que para este tipo de material, tem-se o valor de coesão igual a 0 kPa.

Desta forma, foi possível determinar o ângulo de atrito de pico para a amostra indeformada coletada na pista teste medianamente compactada. A Tabela 4-3 apresenta estes resultados.

Tabela 4-3 – Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra AIMC

Equação da linha de tendência ($y=ax$)	Valor de "a"	Ângulo de atrito em radianos	Ângulo de atrito em graus
$y=0,6022x$	0,602	0,54	31,05

A Tabela 4-4 apresenta os resultados de tensão cisalhante e tensão vertical para as respectivas deformações cisalhantes de pico, para a amostra deformada reconstituída referente a pista teste medianamente compactada (amostra ADRMC). Na Tabela 4-5, o grau de compactação é referente a energia Proctor Normal, o qual foi obtido em laboratório para preparação da amostra deformada reconstituída por meio do método de “*Moist Tamping*”.

Tabela 4-4 - Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra ADRMC

Tensão Axial (kPa)	Deformação cisalhante (%)	Tensão cisalhante (kPa)	Tensão vertical (kPa)	Grau de Compactação Proctor Normal	Índice de vazios após adensamento
50	0,10	8,20	42,28	100 %	0,643
100	0,25	14,60	72,41	100 %	0,641
200	1,00	21,92	78,87	100 %	0,643
800	18,00	610,51	1037,96	100 %	0,642

A partir dos resultados definidos na Tabela 4-4, foi possível traçar a envoltória de ruptura da amostra deformada reconstituída referente a pista teste medianamente compactada (ADRMC), apresentada pela Figura 4-13. Para definir os parâmetros geotécnicos a partir da envoltória de ruptura, definiu-se a linha de tendência linear referente a envoltória, obtendo desta forma a equação da reta. O valor de “R²” obtido se encontra próximo a 1,00 (0,9956), indicando que a linearização da curva da envoltória está correta e representativa.

A partir da equação da reta indicada, utiliza-se o mesmo procedimento descrito para a amostra AIMC, determinando o ângulo de atrito de pico da amostra, de acordo com a Eq (Equação 4.4-3). Como se trata do mesmo material ensaiado, assume-se um valor de coesão igual a 0 kPa , representado na Figura 4-13 pela interseção da linearização da envoltória de ruptura pela origem do gráfico.

Assim, determinou-se o ângulo de atrito de pico para a amostra deformada reconstituída coletada na pista teste medianamente compactada. A Tabela 4-5 apresenta estes resultados.

Tabela 4-5 - Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra ADRMC

Equação da linha de tendencia (y=ax)	Valor de "a"	Ângulo de atrito em radianos	Ângulo de atrito em graus
$y = 0,5839x$	0,584	0,53	30,28

Ao se comparar os resultados de ângulo de atrito de pico para a amostras indeformada (31,05°) e a amostra deformada reconstituída (30,28°), para a pista teste medianamente compactada, nota-se que os valores estão relativamente bem similares, indicando que o método de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” conseguiu representar de forma fidedigna os resultados apresentados pela amostra indeformada. Apesar do ângulo de atrito ser influenciado pelas condições de moldagem e organização dos grãos, uma vez que todas as amostras comparadas foram submetidas as mesmas tensões de confinamento (50,100, 200, 400 e 800 kPa), a comparação entre resultados se torna plausível.

A Figura 4-15 apresentam os resultados das curvas de tensão de cisalhamento versus deformação cisalhante obtidas por meio do ensaio de cisalhamento direto simples, para as referidas tensões axiais ensaiadas de 50, 100 e 200 kPa. A Figura 4-16 apresenta os resultados de tensão de cisalhamento X deformação para as tensões de 400 e 800 kPa, em ambas as amostras deformadas reconstituídas (amostras ADRC) e indeformadas (amostras AIC) referentes a pista teste compactada.

Seguindo as mesmas premissas adotadas para o ensaio executado com as amostras coletadas na pista teste medianamente compactada, a deformação máxima de cisalhamento foi estabelecida em 30%, para fins de conclusão do ensaio. Nota-se também que esta definição é factível para o comportamento mecânico do material, uma vez que alcançando os 30% de deformação todas

as curvas definidas já atingem uma certa estabilização, sugerindo que as amostras chegaram ao pico da sua tensão cisalhante, na qual todo o ângulo de atrito já se encontra mobilizado.

Analisando a Figura 4-16 , é perceptível que, para as tensões axiais de 400 e 800 kPa, ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas apresentaram tensões cisalhantes de pico em deformações bastante similares, estando entre 10 e 12% para a o corpo de prova submetido a tensão axial de 400 kPa e 20 e 24% para 800 kPa, sugerindo uma similaridade entre os resultados. Já para as tensões axiais inferiores, de 50 a 200 kPa, tem-se o alcance de pico da tensão cisalhante logo nos primeiros estágios de deformação, entre 0,25 e 2,0%.

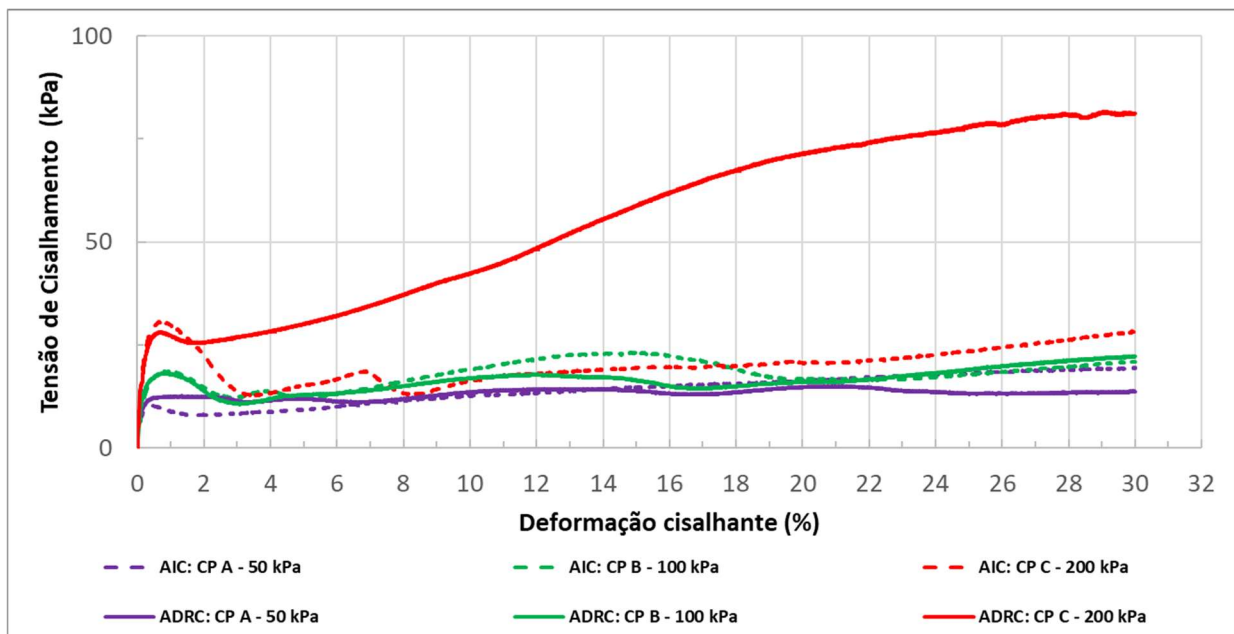


Figura 4-15 - Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste compactada (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 50, 100 e 200 kPa.

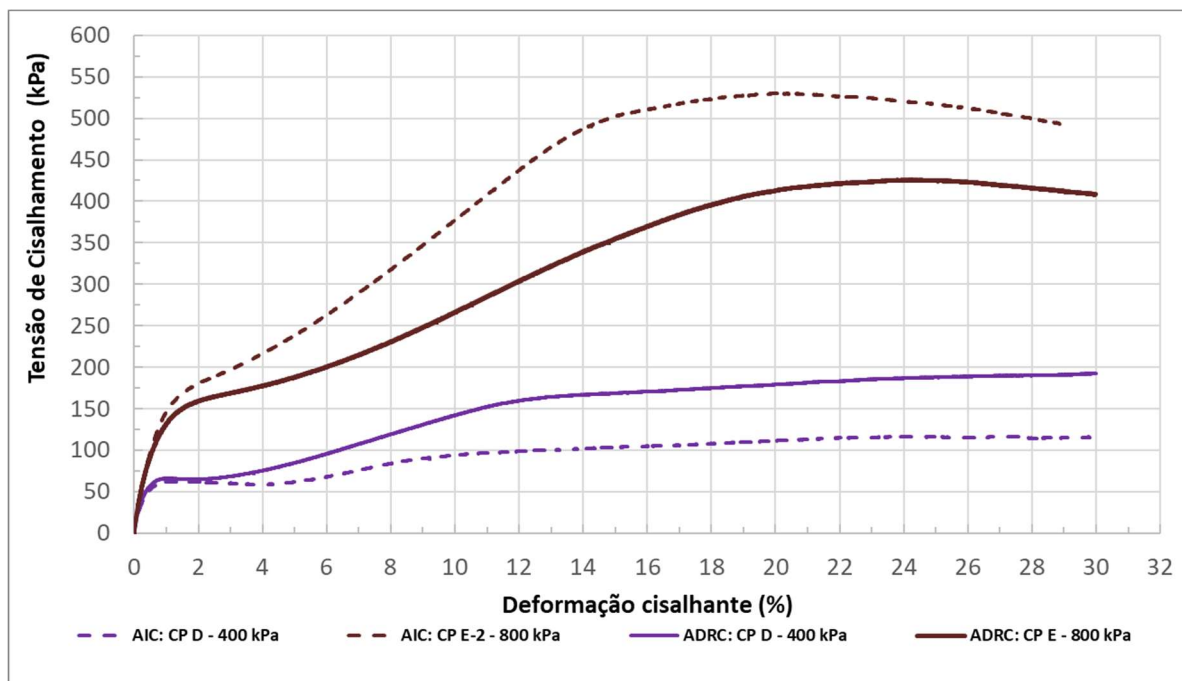


Figura 4-16 - Curvas tensão cisalhante (kPa) X deformação cisalhante (%), ensaio DSS, para amostras coletadas na pista teste compactada (deformada reconstituída e indeformada), para tensões axiais de 400 e 800 kPa.

A Figura 4-17 mostram as trajetórias de tensões obtidas para as tensões axiais ensaiadas (50, 100, 200, 400 e 800 kPa), para ambas as amostras deformadas reconstituídas (amostras ADRC) e indeformadas (amostras AIC), referentes a pista teste compactada, e a Figura 4-18 apresenta os mesmos resultados em função da tensão vertical normalizada. De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que houve a geração de excesso de poro-pressão nos primeiros estágios do ensaio, o que é visível pelo comportamento das curvas em deslocarem para a esquerda do gráfico, apresentando um comportamento contrátil. Contudo, nota-se o atingimento do ponto de “*Quasi-Steady State*”, evidente no gráfico para as tensões axiais de 200, 400 e 800 kPa. A partir deste ponto há uma mudança no comportamento mecânico da amostra, onde a mesma passa a apresentar um comportamento dilatante do material, uma vez que neste estágio do ensaio todo o excesso de poro-pressão é dissipado, elevando o valor da tensão efetiva do rejeito filtrado arenoso ensaiado.

Nota-se que o comportamento “*Quasi-Steady State*” é perceptível para todas as tensões axiais executadas durante o ensaio, mesmo as mais inferiores de 50 e 100 kPa. Assim como no ensaio performedo com as amostras coletadas na pista medianamente compactada, tem-se também, para as amostras coletadas na pista compactada, uma equidade na trajetória de tensões para a amostra deformada reconstituída e a amostra indeformada, inclusive na localização do ponto

de “*Quasi-Steady State*”, indicando que a técnica de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” aparenta ser fiel com a condição representada em campo.

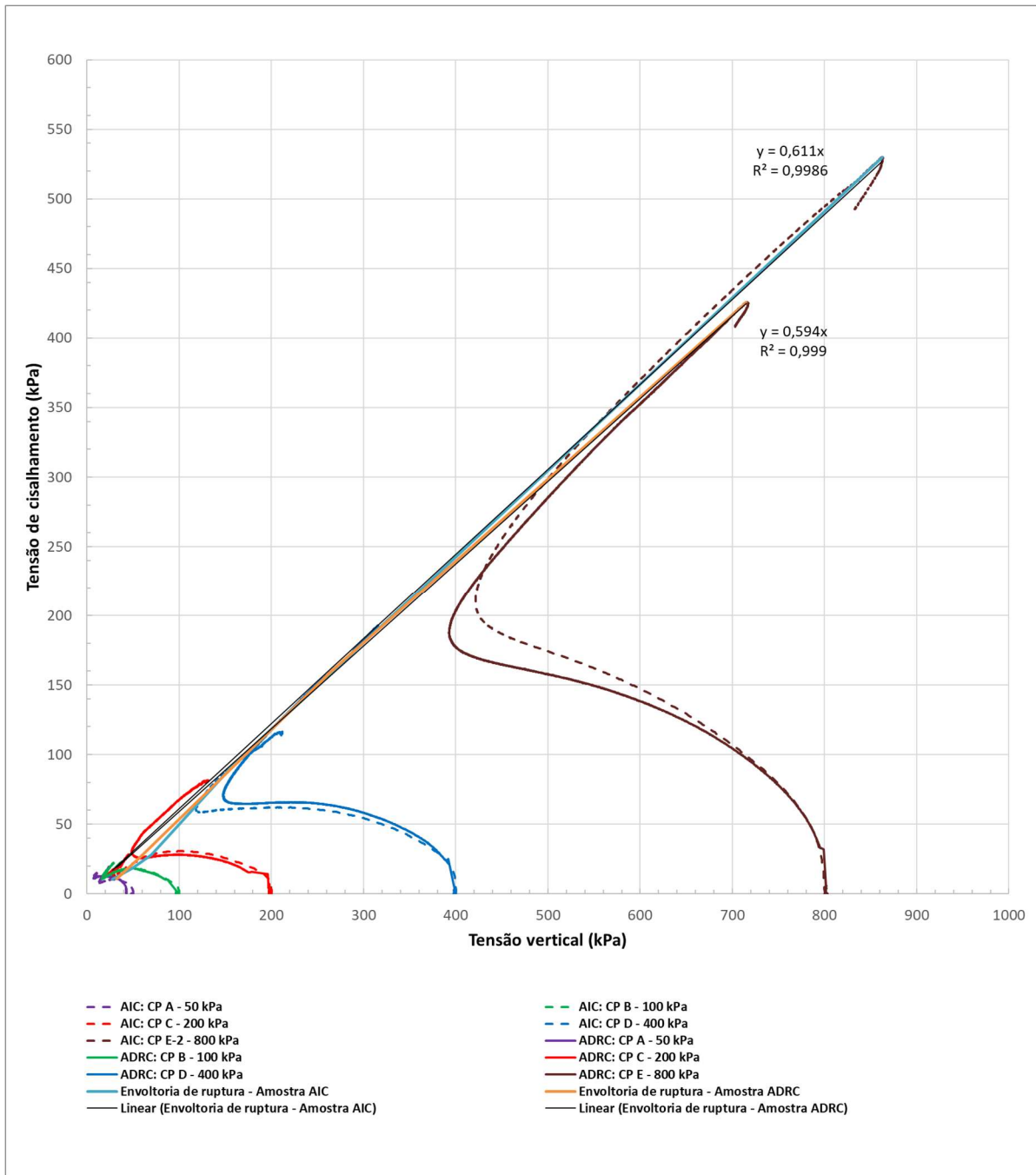


Figura 4-17 - Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho compactado (deformada reconstituída e indeformada)

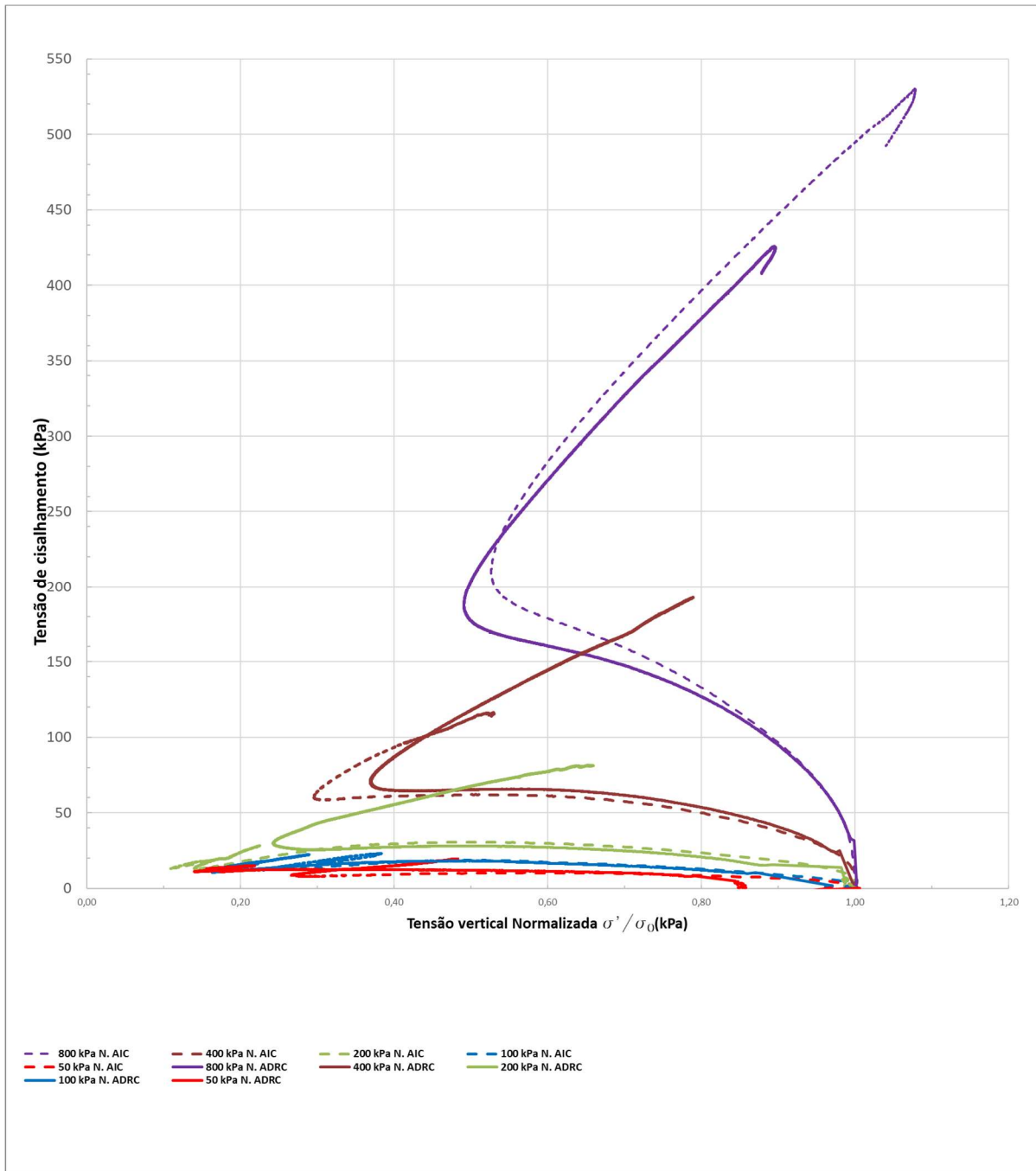


Figura 4-18 - Trajetória de tensões, ensaio DSS, para as amostras coletadas no trecho compactado (deformada reconstituída e indeformada), em função da tensão vertical normalizada

Tendo como referência os valores de deformação de cisalhamento referentes ao pico de mobilização do ângulo de atrito obtidos por meio da Figura 4-15, para cada tensão axial testada, determinou-se o referente valor de tensão cisalhante e tensão vertical de cada corpo de prova, sendo então possível traçar a envoltória de ruptura das amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, empregando a mesma lógica adotada previamente para as amostras analisadas da pista teste medianamente compactada. A Tabela 4-6 mostra os resultados de tensão

cisalhante e tensão vertical para as respectivas deformações cisalhantes de pico, primeiramente para a amostra indeformada da pista teste compactada (amostra AIC). Na Tabela 4-7, o grau de compactação é referente a energia Proctor Normal, obtido em campo anteriormente a coleta do bloco.

Tabela 4-6 - Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra AIC

Tensão Axial (kPa)	Deformação cisalhante (%)	Tensão cisalhante (kPa)	Tensão vertical (kPa)	Grau de Compactação Proctor Normal	Índice de vazios após adensamento
50	0,50	10,28	27,60	100 %	0,635
100	1,00	18,54	49,06	100 %	0,617
200	1,30	28,06	70,13	100 %	0,625
400	10,00	93,74	160,77	100 %	0,631
800	20,00	529,80	862,41	100%	0,645

Pelos resultados definidos na Tabela 4-6, foi possível traçar a envoltória de ruptura da amostra indeformada referente a pista teste compactada (AIC), mostrada na Figura 4-17. Seguindo os mesmos procedimentos adotados para as amostras da pista teste medianamente compactada, definiu-se a linha de tendência linear referente a envoltória, obtendo a equação representativa da reta. O valor de “R²” foi de 0,9986, estando próximo a 1,00, indicando que a linearização da curva da envoltória está correta e representativa.

A partir da equação da reta indicada, determinou-se o ângulo de atrito de pico da amostra, de acordo com a Eq (Equação 4.4-3). Assumiu-se como premissa um valor de coesão igual a 0 kPa, representado na Figura 4-17 pela interseção da linearização da envoltória de ruptura pela origem do gráfico.

Portanto, determinou-se o ângulo de atrito de pico para a amostra indeformada coletada na pista teste compactada. A Tabela 4-7 apresenta estes resultados.

Tabela 4-7 - Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra AIC

Tabela 4-8

Equação da linha de tendência (y=ax)	Valor de "a"	Ângulo de atrito em radianos	Ângulo de atrito em graus
y=0,611x	0,611	0,55	31,42

A Tabela 4-9 apresenta os resultados de tensão cisalhante e tensão vertical para as respectivas deformações cisalhantes de pico, primeiramente para a amostra deformada reconstituída da pista teste compactada (amostra ADRC). Na Tabela 4-10, o grau de compactação é referente a energia Proctor Normal, o qual foi obtido em laboratório para preparação da amostra deformada reconstituída por meio do método de “*Moist Tamping*”

Tabela 4-9 - Deformação cisalhante de pico, para cada tensão axial ensaiada, e os respectivos valores de tensão cisalhante e tensão vertical – Amostra ADRC

Tensão Axial (kPa)	Deformação cisalhante (%)	Tensão cisalhante (kPa)	Tensão vertical (kPa)	Grau de Compactação Proctor Normal	Índice de vazios após adensamento
50	0,25	10,94	32,33	100 %	0,646
100	1,00	18,01	43,92	100 %	0,646
200	2,00	25,58	56,90	100 %	0,643
400	12,00	159,34	264,51	100 %	0,642
800	24,00	425,41	714,96	100%	0,645

Por meio dos resultados definidos na Tabela 4-9, definiu-se a envoltória de ruptura da amostra deformada reconstituída referente a pista teste compactada (ADRC), mostrada na Figura 4-17. Posteriormente, definiu-se a linha de tendência linear referente a envoltória, obtendo a equação representativa da reta. O valor de “R²” foi de 0,9990, estando muito próximo a 1,00, indicando que a linearização da curva da envoltória está correta e representativa.

A partir da equação da reta indicada, determinou-se o ângulo de atrito de pico da amostra, de acordo com a Eq (Equação 4.4-3). Assumiu-se como premissa um valor de coesão igual a 0 kPa ,

representado na Figura 4-17 pela interseção da linearização da envoltória de ruptura pela origem do gráfico.

Determinou-se por fim o ângulo de atrito de pico para a amostra deformada reconstituída coletada na pista teste compactada. A Tabela 4-10 apresenta estes resultados.

Tabela 4-10 - Definição do ângulo de atrito de pico mobilizado a partir da envoltória de ruptura – Amostra ADRC

Equação da linha de tendência ($y=ax$)	Valor de "a"	Ângulo de atrito em radianos	Ângulo de atrito em graus
$y=0,594x$	0,594	0,54	30,71

Ao se comparar os resultados de ângulo de atrito de pico para a amostra indeformada ($31,42^\circ$) e a amostra deformada reconstituída ($30,71^\circ$), para a pista teste compactada, nota-se que os valores estão relativamente bem próximos, indicando que o método de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” apresenta dados similares aos resultados apresentados pela amostra indeformada, nas condições de campo.

A Tabela 4-11 apresenta um resumo com todos os resultados de ângulo de atrito de pico para todas as amostras ensaiadas, deformadas reconstituídas e indeformadas, nas pistas testes medianamente compactada e compactada. É possível observar uma similaridade entre os resultados apresentados. Além disso, percebe-se que os valores de ângulo de atrito obtidos para as amostras coletadas na pista teste compactada são ligeiramente superiores aos valores obtidos para as amostras coletadas na pista teste medianamente compactada, o que é condizente com a condição de vibração imposta pelo rolo compactador na pista teste compactada.

Tabela 4-11 – Tabela resumo com os resultados de ângulo de atrito de pico mobilizado para as amostras ensaiadas no ensaio DSS

Amostra ensaiada	Ângulo de atrito de pico ($^\circ$)
AIMC	31
ADRC	30,7
AIC	31,4
ADRC	30,7

De acordo com a pesquisa feita por (Bellaver Corte, Consoli, & Festugato, 2019), observa-se que os valores de ângulo de atrito obtidos por meio de ensaios de cisalhamento simples direto

com amostras da areia de Osorio são ligeiramente inferiores aos valores de ângulo de atrito resultados de ensaios triaxiais realizados com o mesmo material, da ordem de no máximo, 5,7%. Nos ensaios de cisalhamento direto simples, obteve-se o valor de 35° para o ângulo de atrito. Já nos ensaios triaxiais, o valor encontrado foi de 35.9° e 37°. Este dado corrobora com o resultado dos ensaios de cisalhamento direto simples executados nesta pesquisa.

4.4. ENSAIOS PARA ANÁLISE DA FABRIC

4.4.1. MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

A fim de se analisar a *fabric* do rejeito filtrado arenoso e entender como os grãos estão orientados, a sua forma, distribuição e características morfológicas, foram geradas imagens eletrônicas pela técnica de microscopia eletrônica por varredura (MEV), para ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, referentes às pistas testes medianamente compactada e compactada (amostras AIC, AIMC, ADRC e ADRMC).

Para cada tipo de amostra ensaiada, foram retiradas quatro imagens MEV. A escala gráfica definida pela Hitachi, fabricante, e representativa para cada imagem é apresentada na base de cada imagem, no canto direito inferior, onde é possível observar o valor em micrometros para cada escala,, com o objetivo de se analisar um cenário geral relativo à orientação dos grãos, e também um cenário com um maior nível de detalhamento para a distribuição e características dos grãos e seus vazios.

Em todas as imagens eletrônicas geradas, os grãos definidos pela coloração cinza escura representam as frações de quartzo presentes no rejeito filtrado de flotação ensaiado, enquanto os grãos que possuem coloração mais clara podem representar diferentes minerais presentes no rejeito de flotação, como Quartzo, Feldspatos, Anfibólios, Biotita, Muscovita, Caulinita, Óxidos de Manganês e Gibbsita, sendo majoritariamente definidos por óxidos de ferro. As regiões escuras ou negras nas imagens representam os vazios da amostra. O detalhamento mineralógico obtido por meio da técnica de QEMSCAN é apresentado na sequência, após a explanação sobre as imagens MEV.

Por fim, é importante ressaltar que todas as imagens eletrônicas estão orientadas de tal maneira que o topo das amostras está sempre orientado para cima, ou seja, na porção superior da imagem. Consequentemente, a porção inferior da imagem representa a base da amostra.

A Figura 4-19 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra AIC. Nota-se uma distribuição homogênea e de tamanho uniforme entre os grãos de quartzo e óxidos de ferro, na qual os grãos aparentam estarem mais organizados na base das amostras (porção inferior). Os grãos de quartzo possuem um formato mais arredondado e por vezes angular. Nota-se também que alguns óxidos de ferro estão acomodados e conectados com alguns grãos de quartzo. Os vazios entre os grãos aparentam estar bem distribuídos dentro do espaço analisado, de forma uniforme e homogênea. A linha representada pela cor azul apresenta a dimensão aproximada de 250 micrometros para o vazio representado. Já a linha verde apresenta a dimensão aproximada de 150 micrometros para o maior grão representado pela figura, utilizando a escala gráfica apontada pela Hitachi no canto direito inferior da imagem.

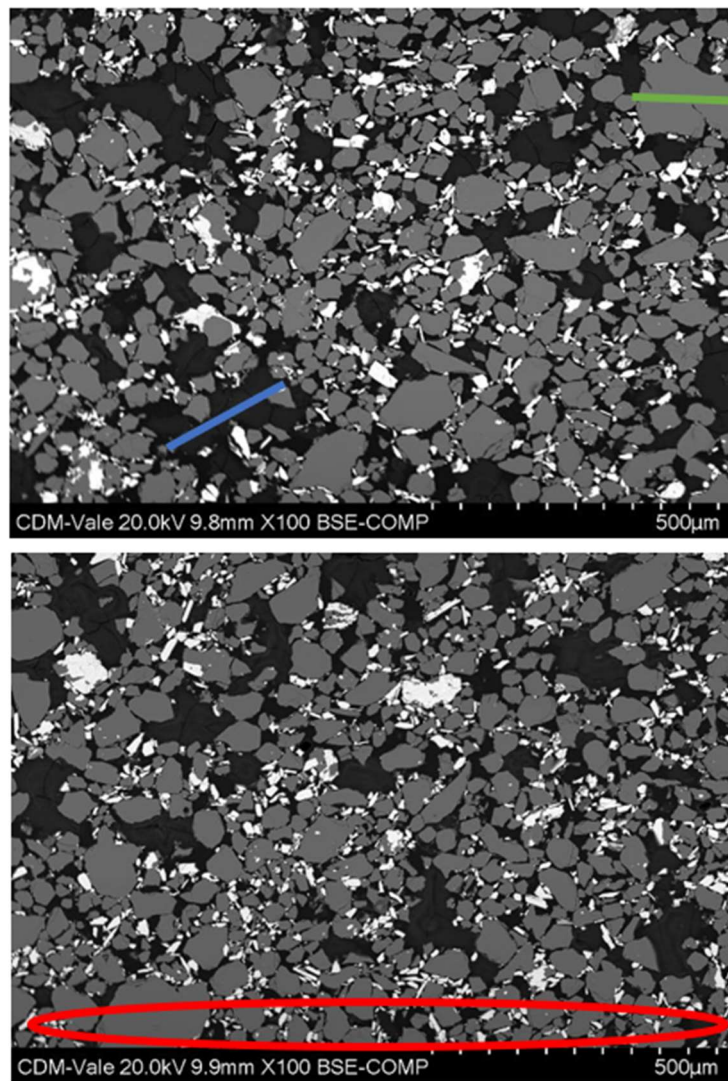


Figura 4-19 – Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIC

A Figura 4-20 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra AIC.. As imagens apresentam alguns grãos de quartzo de formato pontiagudo e delgado, além de ser possível identificar grãos de quartzo com pequenas trincas. Apesar das trincas sugerirem uma possível quebra dos grãos, é importante destacar que os rejeitos filtrados são materiais produzidos na usina de beneficiamento mineral, a qual passa por diversas etapas de cominuição das partículas do minério, dentre outras etapas importantes para a produção dos produtos oriundos do minério de ferro. Assim, existe uma possibilidade que estas trincas tenham sido formadas ao longo do processo de produção do rejeito e filtragem do mesmo, anterior à disposição do mesmo na pista teste. Para que seja melhor investigado a origem das pequenas fissuras, é recomendado que, futuramente, se faça ensaios MEV em diversas etapas do processo de beneficiamento do minério e consequente geração do rejeito. Em termos de medição dos grãos, é possível observar, pela linha azul, um vazão de aproximadamente 140 micrometros, e pela linha verde, a dimensão do maior grão de aproximadamente 160 micrometros, utilizando a escala gráfica apontada pela Hitachi no canto direito inferior da imagem.

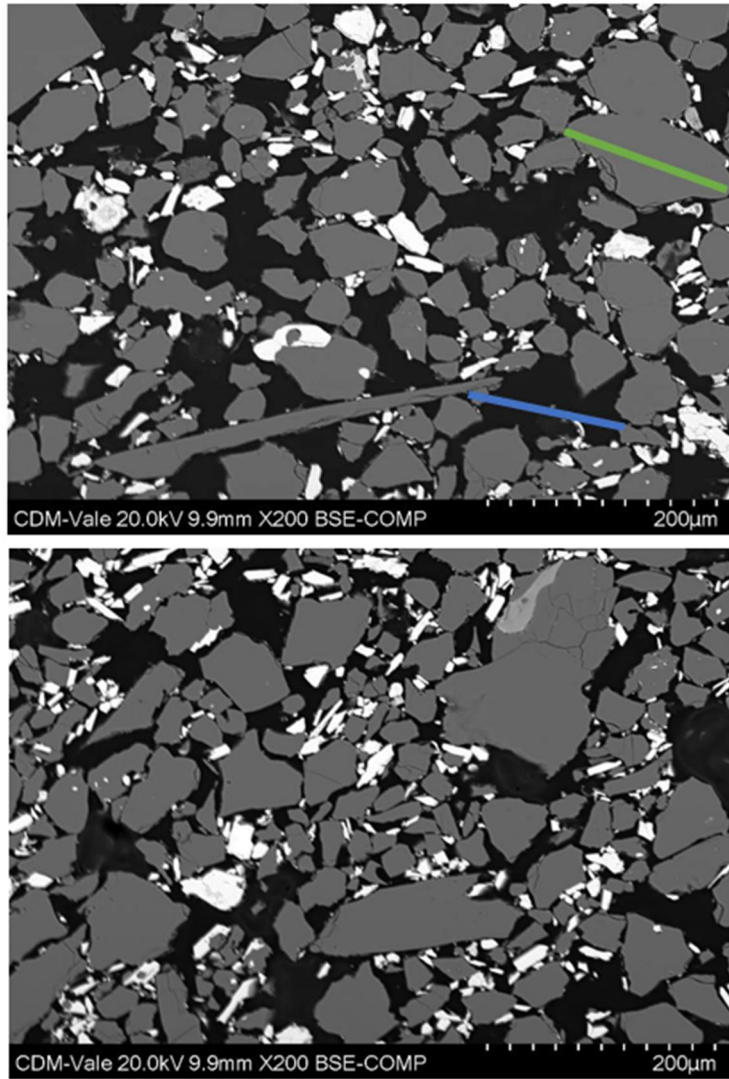


Figura 4-20 – Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIC

A Figura 4-21 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra ADRC.. Observa-se com precisão o formato arredondado dos grãos de quartzo e a presença de óxidos de ferro entre os grãos de quartzo ou conectadas com os mesmos. Da mesma forma que identificado nas imagens da amostra AIC, a base das amostras aparenta trazer grãos mais organizados e bem distribuídos em relação ao topo.

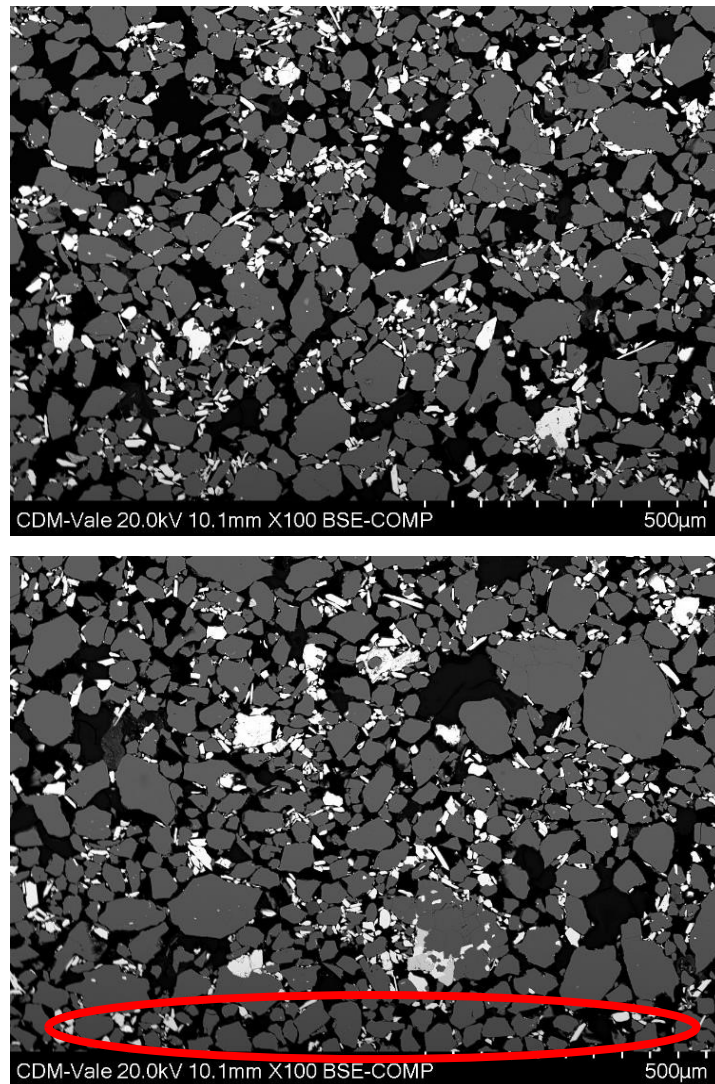


Figura 4-21 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRC

A Figura 4-22 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra ADRC. Nesta imagem, assim como na Figura 4-20, identifica-se alguns grãos de quartzo com a presença de pequenas fissuras, sugerindo que as fissuras não foram geradas pelo método de extração do bloco indeformado ou devido ao método de reconstituição da amostra deformada “*Moist Tamping*”, mas sim pelo processo de beneficiamento do minério de ferro, conforme já explanado. Elas também indicam que o método de reconstituição da amostra deformada “*Moist Tamping*” apresentou imagens similares àquelas definidas para a amostra indeformada, para a pista teste compactada, não alterando dessa forma a fabric do material se comparado com a sua condição de campo.

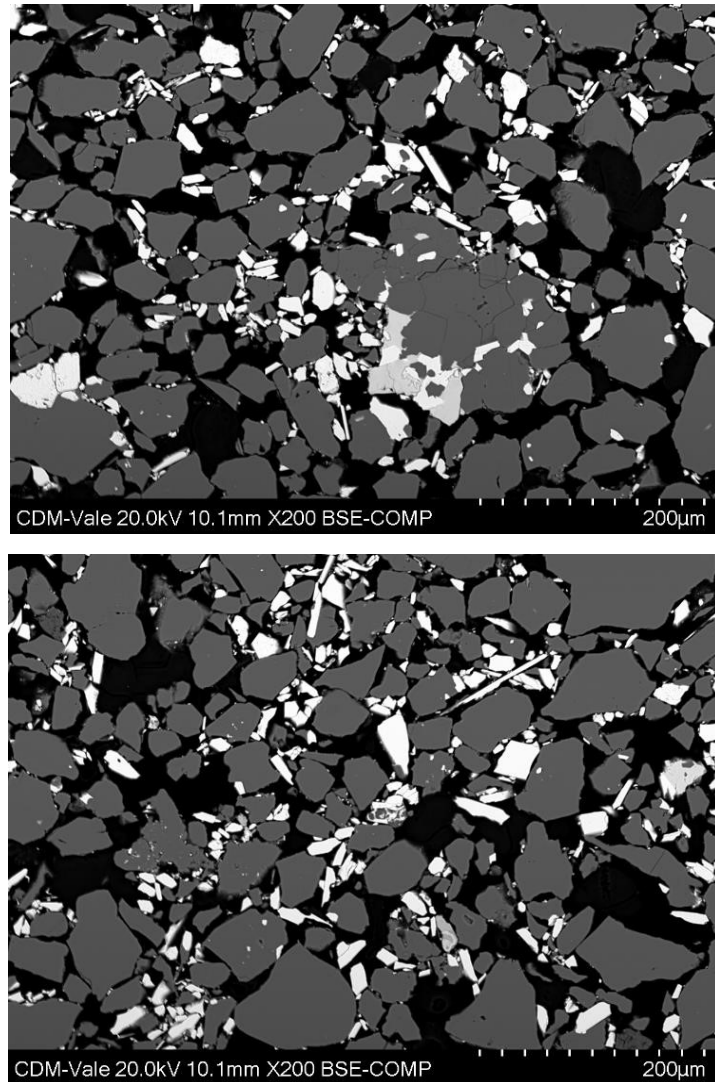


Figura 4-22 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRC

A Figura 4-23 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra AIMC. Em comparação com as imagens geradas para a amostra coletada na pista teste compactada, é possível avaliar que os grãos presentes na imagem da Figura 4-23 possuem um maior range de diferentes diâmetros, sendo então relativamente mais heterogênea. Por outro lado, da mesma forma que já identificado nas demais imagens, os grãos de quartzo possuem formato arredondado, com os grãos de óxido de ferro bem distribuídos no espaço amostral da imagem.

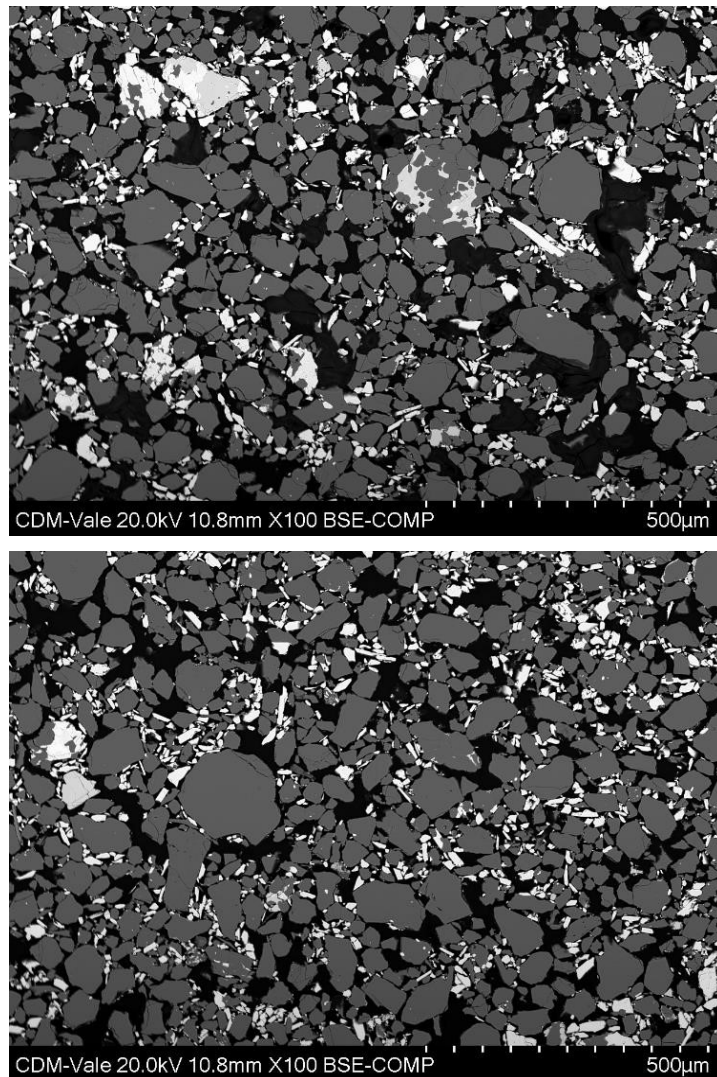


Figura 4-23 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIMC

A Figura 4-24 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra AIMC. Nestas imagens também é possível notar algumas fissuras presentes em certos grãos de quartzo, assim como observado nas imagens referentes a amostra indeformada coletada na pista teste compactada. Observa-se o formato angular para determinados grãos de quartzo.

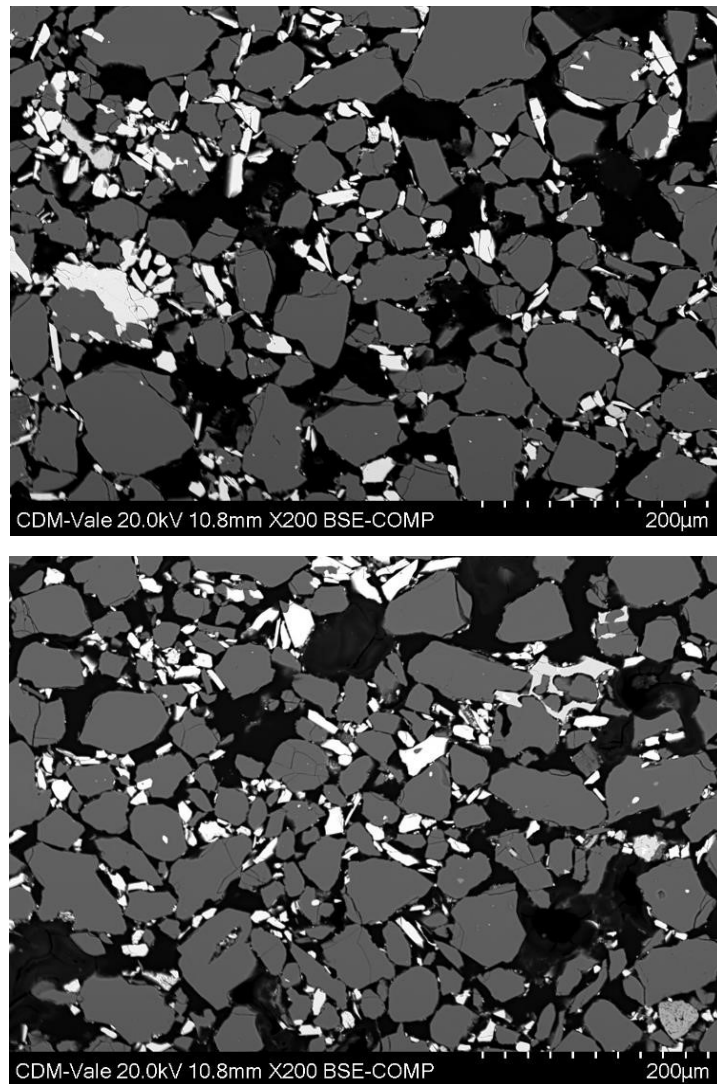


Figura 4-24 – Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra AIMC

A Figura 4-25 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra ADRMC. Da mesma maneira identificada na análise da imagem referente a amostra indeformada da pista teste medianamente compactada, as imagens da Figura 4-25 apresentam uma maior distribuição dos vazios/poros, e conseqüentemente vazios/poros de menor dimensão, se comparado com as imagens relativas às amostras deformadas reconstituídas da pista teste compactada.

A Figura 4-26 apresenta um comparativo entre as imagens geradas para as amostras deformadas reconstituídas ensaiadas para as distintas pistas teste, sendo possível observar esta diferença na distribuição dos vazios ou poros na amostra. No que tange o formato, esfericidade, angularidade orientação, estes materiais apresentam similaridade entre si.

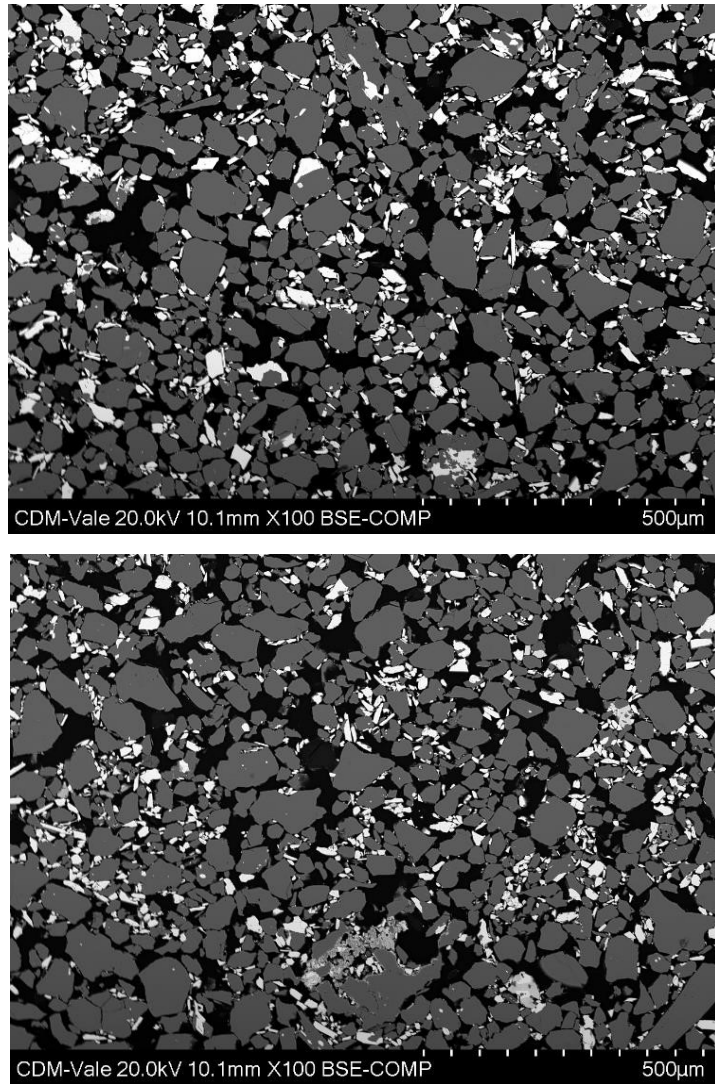


Figura 4-25 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRMC

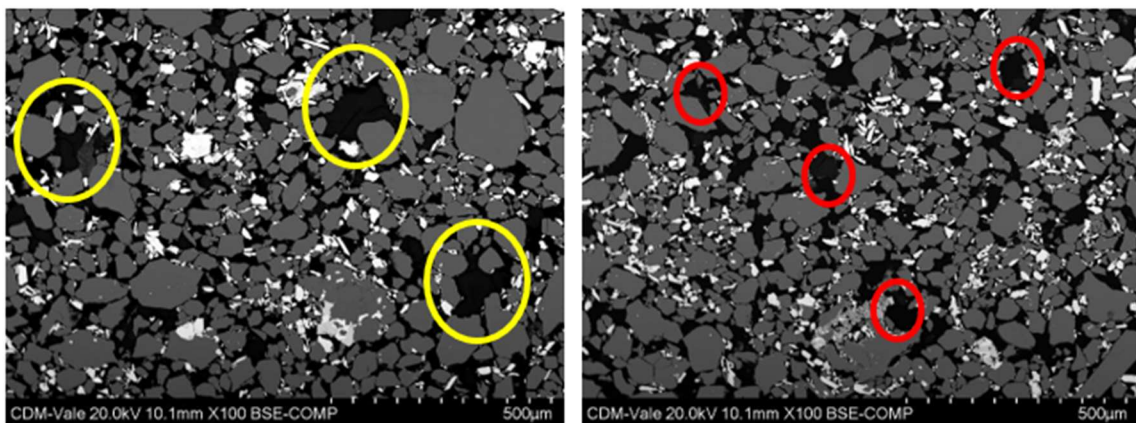


Figura 4-26- Comparativo entre as imagens geradas para a amostra ADRC, à esquerda, e amostra ADRMC, à direita,.

A Figura 4-27 apresenta duas imagens geradas pela técnica MEV para a amostra ADRMC. Nota-se a presença de algumas fissuras nos grãos de quartzo, apesar de estarem em menor evidência. A distribuição dos óxidos de ferro se assemelha as demais imagens apresentadas. O formato e diâmetro dos grãos de quartzo estão ligeiramente localizados em um mesmo range àqueles apresentados nas imagens relativas a amostra indeformada da pista teste medianamente compactada, sugerindo que o método de reconstituição “*Moist Tamping*” não alterou de maneira branda a fabric do material em relação ao seu estado inicial de campo, representado pela amostra indeformada.

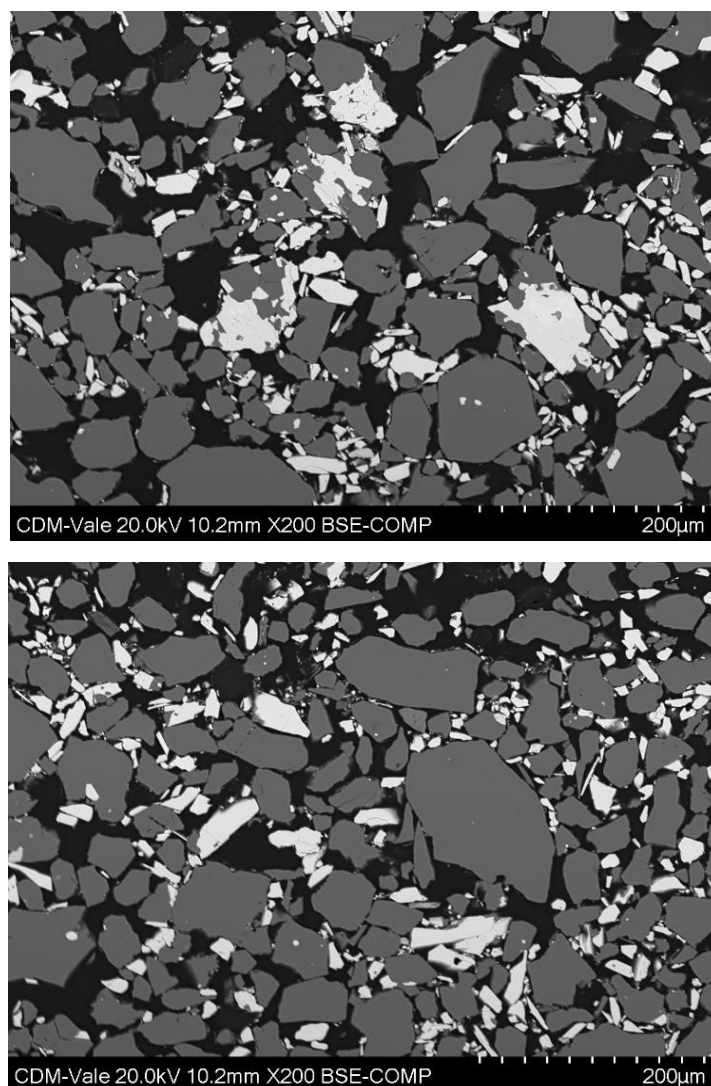


Figura 4-27 - Imagem gerada a partir de ensaio MEV. Amostra ADRMC

A Figura 4-28 apresenta um comparativo entre uma imagem de amostra deformada reconstituída (à esquerda) e uma imagem da amostra indeformada (à direita), referente à pista

teste medianamente compactada.. Observa-se que a distribuição dos vazios e seus respectivos tamanhos, destacados pelos círculos vermelhos para a amostra reconstituída, e amarelo para a amostra indeformada, deu-se de forma similar entre as duas imagens. É possível observar também uma similaridade no que tange a angularidade das partículas de quartzo e a distribuição homogênea das duas imagens em relação a hematita e demais óxidos de ferro.

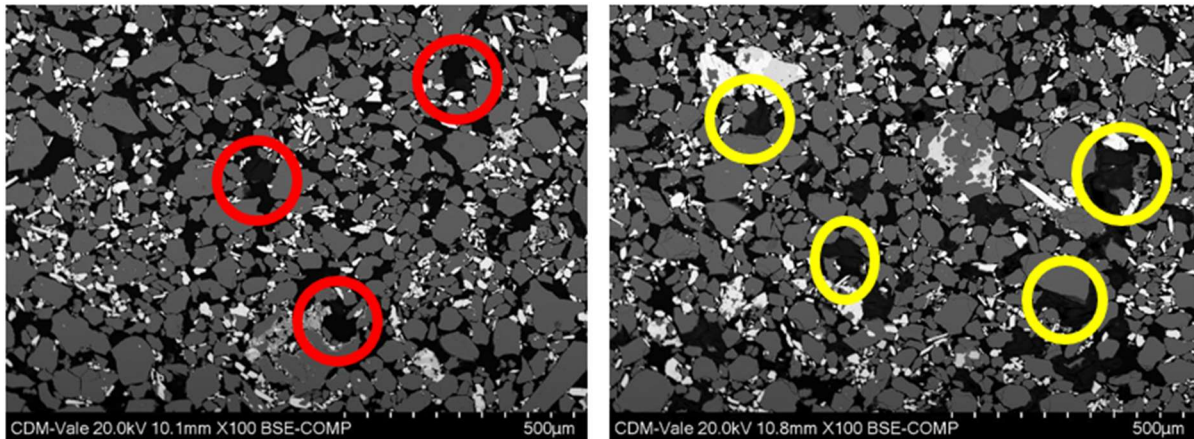


Figura 4-28 – Comparativo entre imagem de amostra deformada reconstituída (à esquerda) e indeformada (à direita), pista teste medianamente compactada

A Figura 4-29 apresenta um comparativo entre uma imagem de amostra deformada reconstituída (à esquerda) e uma imagem da amostra indeformada (à direita), referente à pista teste compactada.. Observa-se que a distribuição dos vazios e seus respectivos tamanhos, destacados pelos círculos vermelhos para a amostra reconstituída, e amarelo para a amostra indeformada, também aconteceu de maneira bastante similar entre as duas imagens. É possível também observar também uma similaridade no que tange a angularidade das partículas de quartzo e a distribuição homogênea das duas imagens em relação a hematita e demais óxidos de ferro.

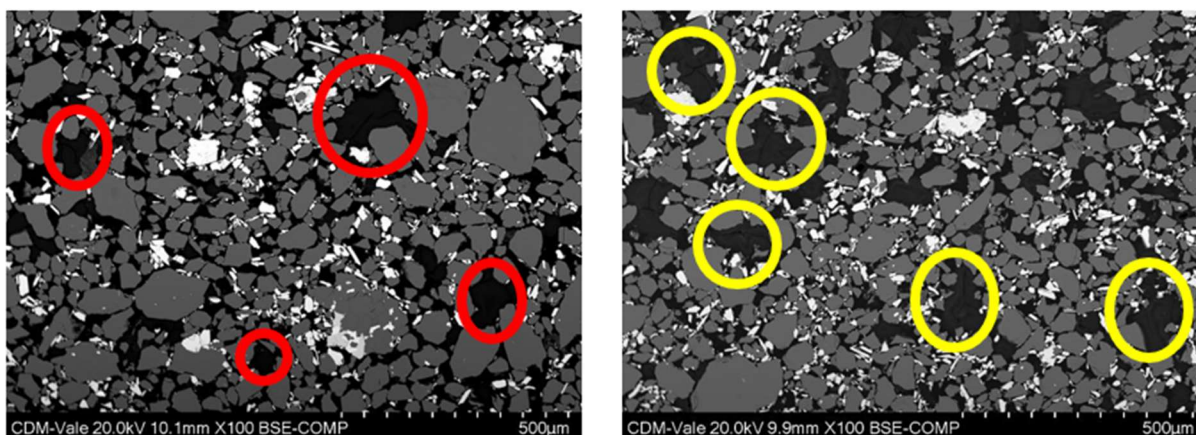


Figura 4-29 Comparativo entre imagem de amostra deformada reconstituída (à esquerda) e indeformada (à direita), pista teste compactada

A Figura 4-30 e a Figura 4-31 apresentam a distribuição mineralógica atribuída a amostra AIC, definida pela técnica QEMSCAN, também utilizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo MEV FEI Inspect F50, onde foram geradas as imagens eletrônicas apresentadas entre as Figuras 43 e 50.

No detalhe apresentado pela Figura 4-31, é possível identificar em coloração amarelada, a caulinita, já em coloração magenta tem-se a representação da goethita. As partículas identificadas pela cor laranja representam o quartzo, e àquelas de coloração marrom, seriam os óxidos de ferro. Todos os minerais identificados são esperados de serem encontrados em um rejeito oriundo do beneficiamento do minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero, dado a geologia local e a origem do minério de ferro na lavra do itabirito friável.



Figura 4-30 – Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIC

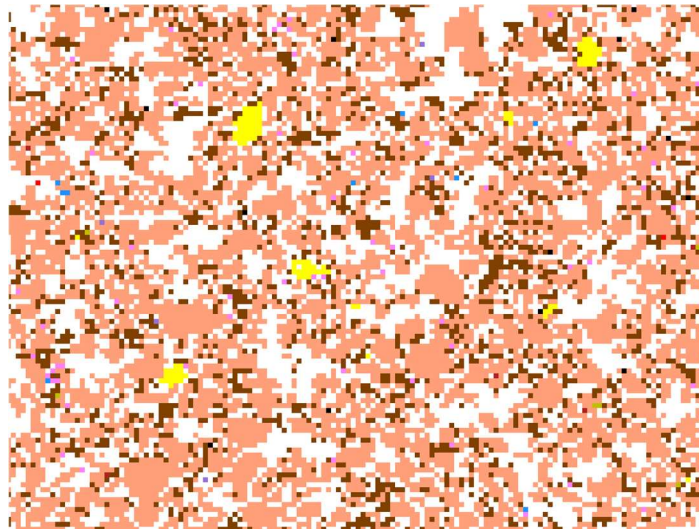


Figura 4-31 – Detalhe- Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIC

A Figura 4-32 e a Figura 4-33 apresentam a distribuição mineralógica atribuída a amostra AIMC, definida pela técnica QEMSCAN. No detalhe apresentado pela Figura 4-33, além dos minerais já identificados na análise da Figura 4-31 nota-se também , na coloração verde clara, a muscovita, ,na coloração azulada, a gibbsita, e na coloração avermelhada os feldspatos, em extremas pequenas frações ou quantidades, quando comparadas aos outros minerais já representados.



Figura 4-32 – Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIMC

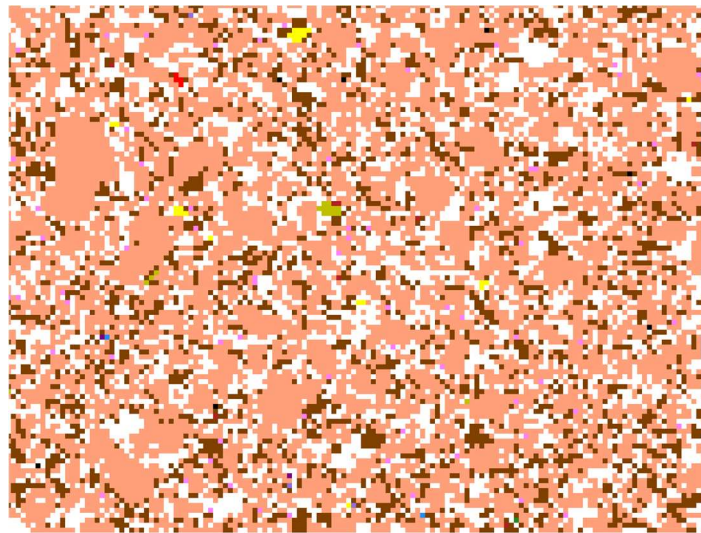


Figura 4-33 Detalhe - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra AIMC

A Figura 4-34 e a Figura 4-35 apresentam a distribuição mineralógica atribuída a amostra ADRC, definida pela técnica QEMSCAN. No detalhe apresentado pela Figura 4-35, além dos minerais já identificados na análise da Figura 4-31 nota-se também, na coloração verde escura os anfíbólios cálcicos, em pequenas frações ou quantidades, quando comparadas aos outros minerais já representados.



Figura 4-34 – Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRC

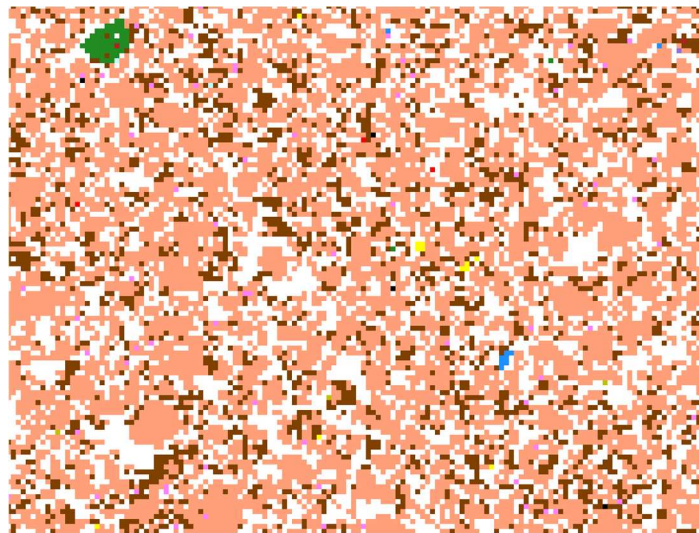


Figura 4-35 Detalhe - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRC

A Figura 4-36 e a Figura 4-37 apresentam a distribuição mineralógica atribuída a amostra ADRC, definida pela técnica QEMSCAN. No detalhe apresentado pela Figura 4-37 é possível observar todos os minerais descritos nas demais imagens mineralógicas das demais amostras ensaiadas.

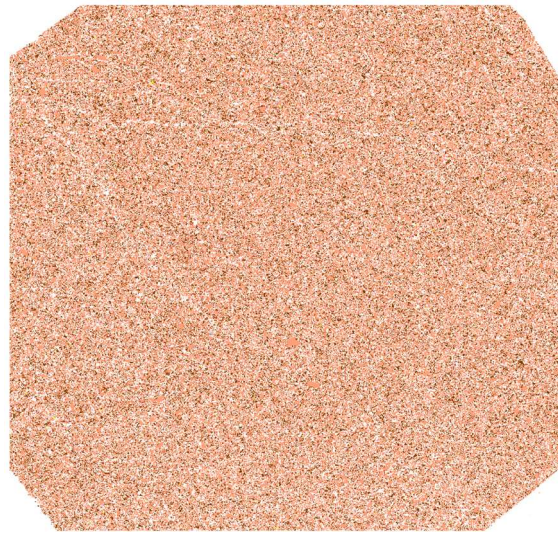


Figura 4-36 - Visão Geral - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRMC

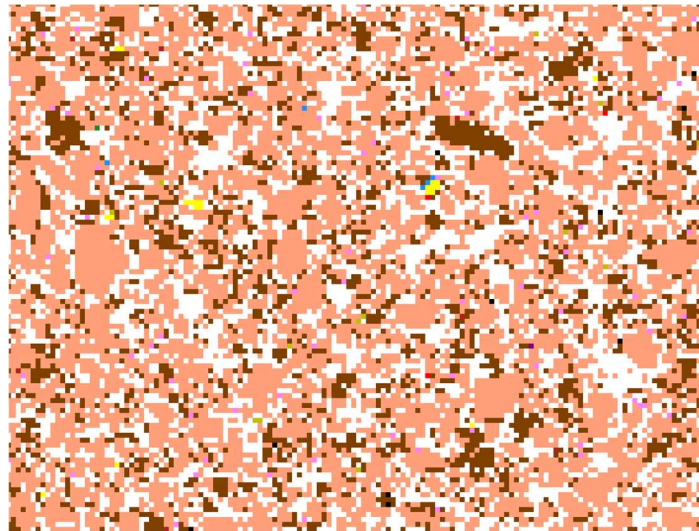


Figura 4-37 - Detalhe - Imagens Mineralógicas – Técnica QEMSCAN – Amostra ADRMC

A Tabela 4-12 apresenta um resumo de todos os minerais encontrados nas imagens mineralógicas de todas as amostras ensaiadas. Além de observar a homogeneidade da distribuição mineralógica em todas as amostras, conclui-se que o quartzo é o silicato de maior presença em todas as amostras, com uma média de 64,04% em distribuição de massa. Em segunda posição tem-se a distribuição dos óxidos de ferro, apresentando uma média em relação a todas as amostras ensaiadas de 34,73% de distribuição de massa. Os demais minerais possuem pequenas frações distribuídas ao longo do espaço amostral ensaiado.

Tabela 4-12 – Distribuição em massa dos minerais nas amostras ensaiadas

Minerais	Amostra (% em massa)	Amostra AIC	Amostra AIMC	Amostra ADRC	Amostra ADRMC
Silicatos	Quartzo	63,41	63,06	64,95	64,75
	Feldspatos ₁	0,03	0,03	0,03	0,03
	Anfibólios ₂	0,02	0,01	0,02	0,01
	Biotita	0,05	0,05	0,05	0,05
	Muscovita	0,07	0,06	0,06	0,07
	Caulinita	0,19	0,16	0,14	0,13
	Text goeth-caul ₃	0,85	0,83	0,69	0,69
Óxidos	Óxidos de Fe	35,21	35,59	33,95	34,17
	Óxidos de Mn	0,06	0,11	0,01	0,02
	Gibbsita	0,03	0,02	0,04	0,01
Outros	Outras fases ⁴	0,08	0,08	0,08	0,08

1 série dos plagioclásios

2 anfibólios cálcicos, série da actinolita

3 goethita em intercrescimento micrométrico com caulinita

4 clorita, zircão, anatásio, crandalita e outros

A Figura 4-38 apresenta a distribuição da massa, em porcentagem, dos materiais para as quatro amostras ensaiadas. Por meio da análise dos resultados, é possível concluir que as amostras são extremamente homogêneas entre si, apresentando variações muito pequenas na distribuição dos minerais, como apresentado pela Tabela 4-12. Este fato evidencia o rigor na coleta das amostras, assim como nos resultados dos ensaios de granulometria, mostrando que as amostras deformadas de cada pista teste foram coletadas em locais próximos às amostras indeformadas. Além disso, evidencia-se que o material disposto da pista teste medianamente compactada é praticamente idêntico ao material disposto na pista teste compactada, garantindo que a construção da pista teste foi realizada com o mesmo material, oriundo do mesmo ciclo de produção de rejeito filtrado proveniente da usina de filtragem da mina do Pico. É importante ressaltar que as interfaces minerais que se originaram do minério de ferro, existentes entre os óxidos de ferro e o quartzo, são primeiramente advindos de uma rocha. Para se romper e quebrar estas interfaces é necessário uma alta fonte de energia, que não é aplicada pela passagem do rolo compactador na camada ou do próprio peso do trator de esteira.

Além disso, como tons distintos na figura indicam os diferentes minerais presentes nas amostras, é possível observar que a distribuição dos tons nas quatro amostras ensaiadas, AIC, AIMC, ADRC e ADRMC é praticamente a mesma, indicando uma similaridade na distribuição mineralógica entre elas. Isto pode inicialmente indicar que a *fabric*, em termos de distribuição mineralógica, não foi alterada entre as amostras reconstituídas em laboratório e amostras indeformadas.

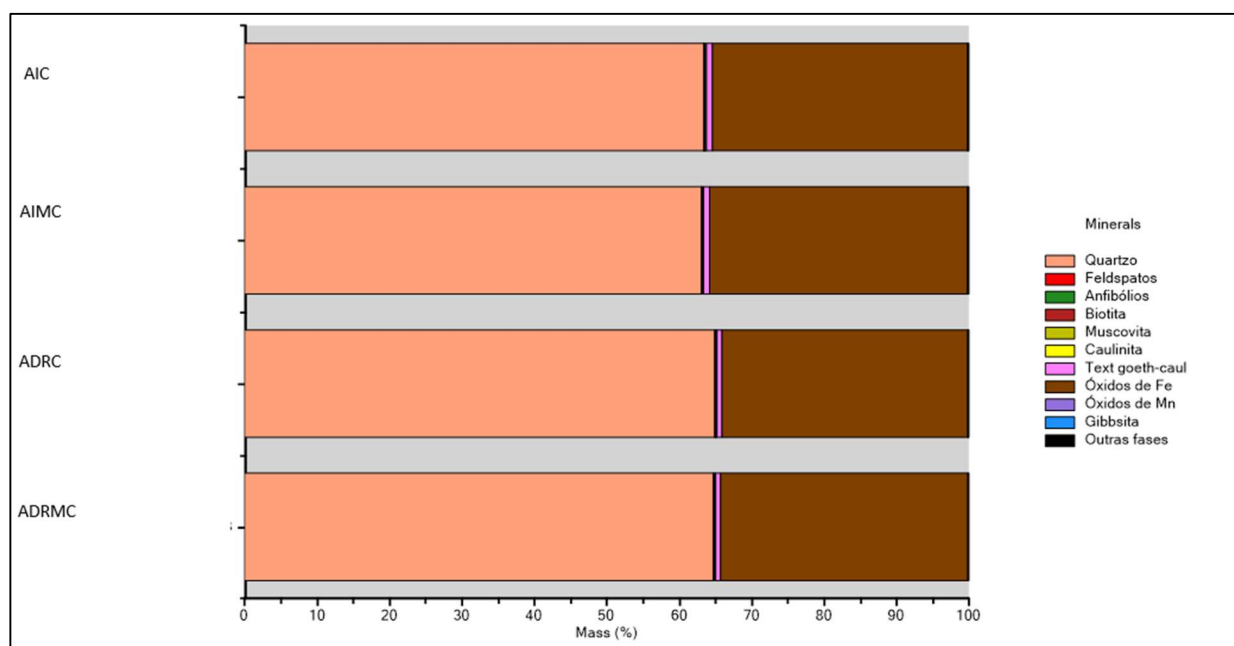


Figura 4-38 Distribuição da massa, em porcentagem, dos minerais nas amostras ensaiadas

4.4.2. POROSIMETRIA POR ADSORÇÃO DE NITROGÊNIO (BET)

Foram realizados ensaios de porosimetria por adsorção de nitrogênio (técnica BET), para ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, referentes às pistas testes medianamente compactada e compactada (amostras AIC, AIMC, ADRC e ADRMC), com o objetivo de se tentar determinar o volume de poros de cada amostra, bem como a frequência do diâmetro dos poros presentes em cada amostra analisada.

Além dessas informações, o ensaio de porosimetria por adsorção de nitrogênio fornece também o valor da superfície específica dos grãos, o diâmetro médio dos poros, e o diâmetro máximo encontrado dos poros.

A Tabela 4-13 apresenta os resultados dos ensaios para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas coletadas na pista teste compactada. Já a Tabela 4-14 fornece os resultados dos

ensaios para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas coletadas na pista teste medianamente compactada.

Tabela 4-13 – Resultado do ensaio de Porosimetria por Adsorção de Nitrogênio, em amostras reconstituídas e indeformadas coletadas na pista teste compactada

Amostra	Abreviação Amostra	Superfície específica BET (m ² /g)	Diâmetro médio dos poros (nm)	Volume total de poros (cm ³ /g)	Diâmetro máximo dos poros (nm)
Amostra deformada reconstituída trecho compactado	ADRC	2,2	3,6	2,7E-03	48,9
Amostra indeformada-trecho compactado	AIC	2,3	3,6	2,7E-03	48,2

Tabela 4-14 - Resultado do ensaio de Porosimetria por Adsorção de Nitrogênio, em amostras reconstituídas e indeformadas coletadas na pista teste medianamente compactado

Amostra	Abreviação Amostra	Superfície específica BET (m ² /g)	Diâmetro médio dos poros (nm)	Volume total de poros (cm ³ /g)	Diâmetro máximo dos poros (nm)
Amostra deformada reconstituída-trecho medianamente compactado	ADRCM	2,3	3,6	2,7E-03	55,9
Amostra indeformada-trecho medianamente compactado	AIMC	2,2	3,6	2,7E-03	44,7

A partir dos resultados alcançados pelo ensaio para determinar o volume total acumulado de poros, correlacionando o mesmo com os diâmetros de poros identificados até que se alcançasse o volume total de poros, foi possível determinar os gráficos de volume acumulado de poros, em porcentagem, versus o diâmetro dos grãos, para todas as amostras ensaiadas.

Assim, a Figura 4-39 apresenta o gráfico de volume acumulado de poros em função do diâmetro para as amostras coletadas na pista teste compactada, e a Figura 4-40 mostra gráfico de volume acumulado de poros em função do diâmetro para as amostras coletadas na pista teste medianamente compactada.

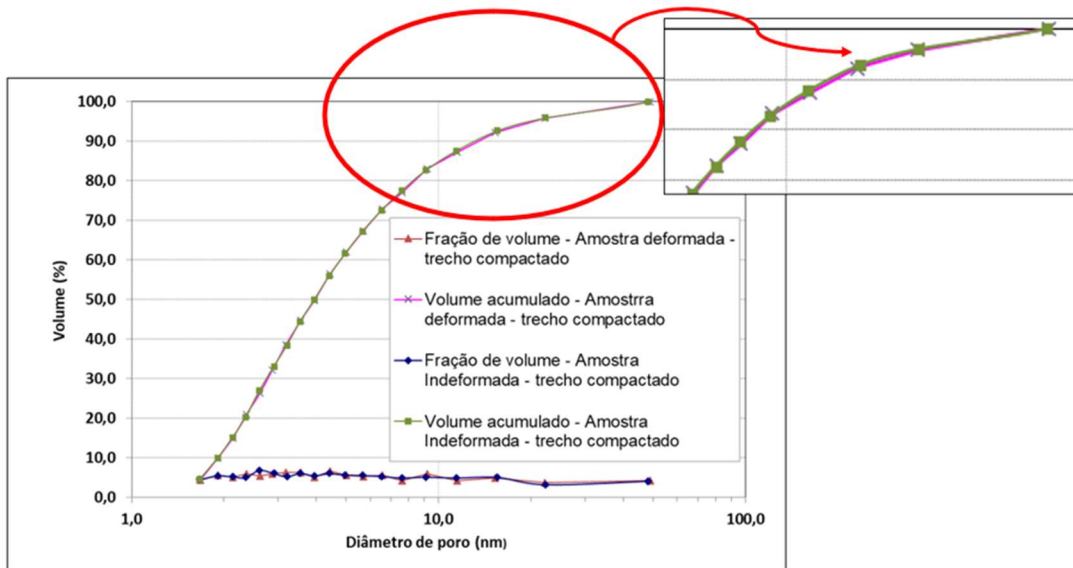


Figura 4-39 – Curva de volume acumulado e fração de volume para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, relativas ao trecho compactado (amostras AIC e ADRC)

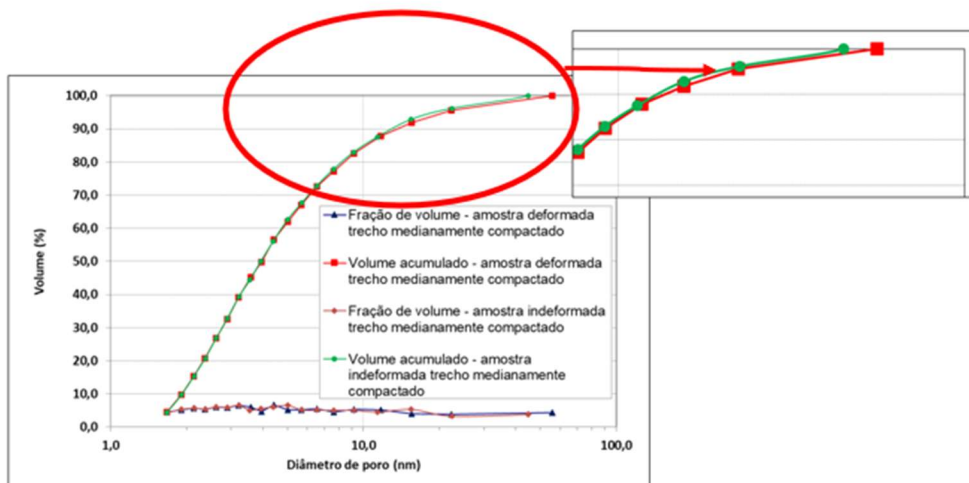


Figura 4-40 - Curva de volume acumulado e fração de volume para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, relativas ao trecho medianamente compactado (amostras AIMC e ADRMC)

A partir da análise dos gráficos apresentados pela Figura 4-39 e pela Figura 4-40, é identificado um resultado peculiar, chamando a atenção para a sensibilidade da técnica empregada em medir o tamanho e volume dos poros das amostras de rejeito filtrado de flotação: as curvas apresentadas para o volume acumulado de poros versus diâmetro dos grãos para ambas as amostras coletadas na pista teste compactada e medianamente compactada estão praticamente

sobrepostas, sendo possível observar somente ao final do ensaio, acima dos 90% de volume acumulado, uma muito pequena diferença entre os valores de volume de poros, destacado na imagem com um zoom da curva.

A partir destes resultados e com o objetivo de investigar a sensibilidade do ensaio para o tipo de amostra ensaiada (rejeito filtrado de flotação, caracterizado como silte-arenoso), foi determinada a frequência do volume acumulado dos poros e a frequência do diâmetro dos poros, para as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas de ambas as pistas testes medianamente compactadas e compactadas.

Após o cálculo das referidas frequências, destaca-se que ambas as frequências de volume acumulado dos poros e dos diâmetros dos poros resultaram em resultados idênticos para todas as amostras ensaiadas, o que é representado, respectivamente, pela Figura 4-41 e a Figura 4-42.

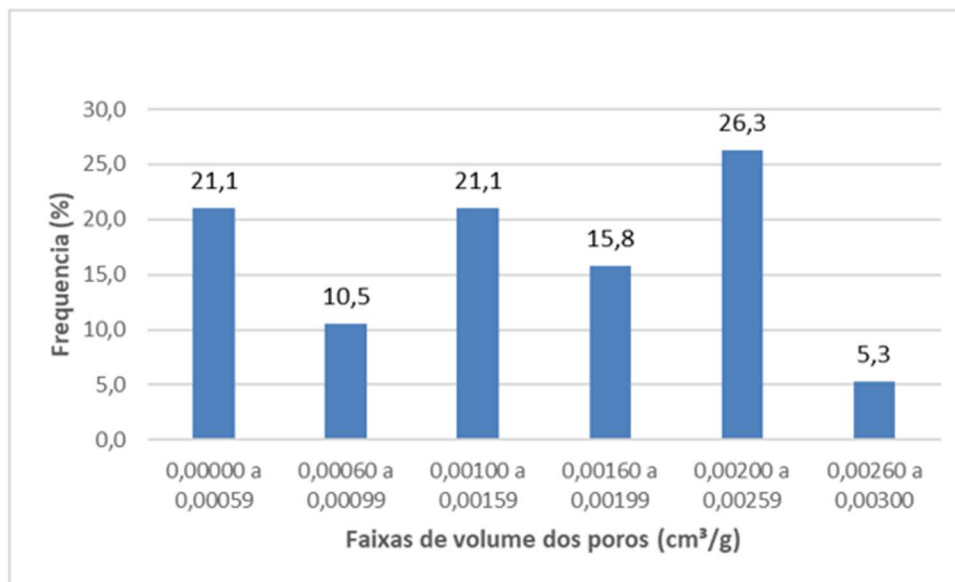


Figura 4-41 – Frequência relativa ao volume acumulado dos poros – Rejeito filtrado arenoso

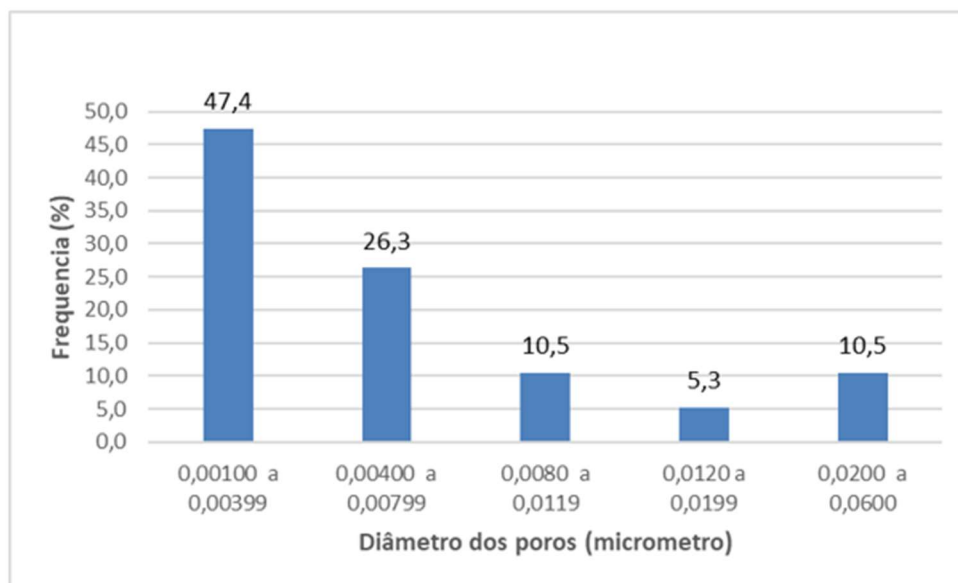


Figura 4-42 - Frequência relativa ao diâmetro determinado para os poros – Rejeito filtrado arenoso

De posse de todos os resultados apresentados, conclui-se que a sensibilidade da técnica de adsorção por nitrogênio para determinar o volume dos poros (vazios) das amostras de rejeito filtrado de flotação não é significativa.

Por outro lado, um dado importante de se observar é o resultado também praticamente idêntico para a superfície específica medida para todas as amostras ensaiadas, de aproximadamente $2,3 \text{ m}^2/\text{g}$. Este dado evidencia que as amostras coletadas em ambas as pistas testes são homogêneas e uniformes, se tratando do mesmo material. Uma vez que o equipamento utilizado para realizar o ensaio de porosimetria foi programado para executar os quatro estágios do ensaio identificados na Figura 3-20, pode-se afirmar que após a conclusão do estágio 1 e 2, os quais foram medidas as superfícies específicas das amostras, o ensaio avançou para os estágios 3 e 4, onde foi determinado o volume acumulado de poros.

Uma outra forma de se confirmar a execução completa do ensaio é por meio da verificação da isoterma de adsorção e dessorção de nitrogênio gerada no ensaio, representada pela Figura 4-43. É importante ressaltar que todas as isotermas das quatro amostras ensaiadas tiveram comportamento praticamente idênticos. Como é possível verificar na Figura 4-43, a isoterma atinge a adsorção máxima do nitrogênio, ocorrendo posteriormente a dessorção do gás, o que é evidenciado pela verificação da ocorrência da histerese na curva de adsorção/dessorção.

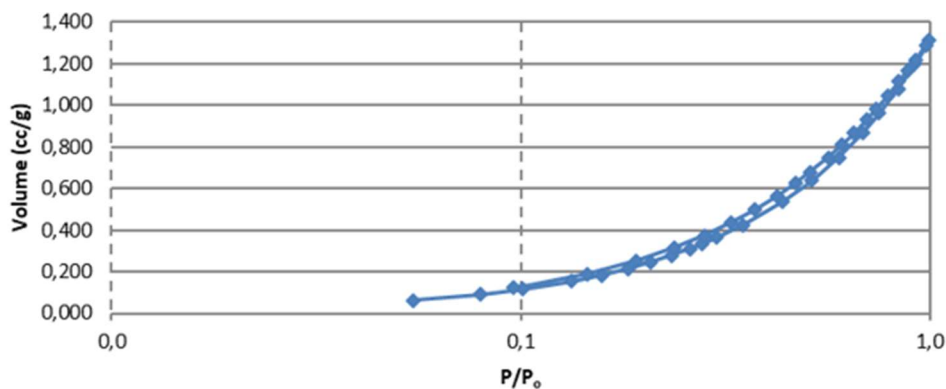


Figura 4-43 – Isoterma de adsorção / dessorção de Nitrogênio

Portanto, como os resultados de superfície específica são bastante similares, além da similaridade entre os resultados de volume total de poros das amostras, pode-se inferir que as moléculas de nitrogênio se concentraram na adsorção dos poros pertencentes às partículas dos grãos das amostras, não preenchendo os espaços vazios entre os grãos. Para que as moléculas de nitrogênio preenchessem os espaços vazios entre as partículas, era necessário que os mesmos estivessem fechados. Com os espaços vazios não estando fechados, as moléculas de nitrogênio não conseguem localizar uma cavidade para preencher, não sendo possível então determinar o volume dos poros referentes aos vazios da amostra.

Por fim, pode-se concluir que o ensaio de porosimetria por adsorção de nitrogênio mediu o volume de poros pertencentes às partículas dos grãos das amostras, e não os vazios localizados entre os grãos, evidenciados pela região negra das imagens eletrônicas MEV. Essa hipótese corrobora com o resultado praticamente idêntico de volume dos poros para as quatro amostras ensaiadas, uma vez que se analisou amostras homogêneas.

5. CONCLUSÕES

Neste último capítulo, discorre-se sobre as conclusões oriundas a partir dos resultados obtidos referentes aos ensaios conduzidos, para esta pesquisa experimental. Foi possível verificar a moldagem dos corpos de prova por meio do método “*Moist Tamping*”, visando reconstituir amostras deformadas coletadas em campo no laboratório, para execução da campanha de ensaios geotécnicos, além da preparação de corpos de prova oriundos de blocos indeformados coletados em campo. As amostras deformadas e indeformadas foram coletadas em duas pistas teste distintas, sendo uma medianamente compactada, na qual foi utilizada somente o peso do trator de esteira, e outra paralela a primeira, compactada com o uso de rolo compactador vibratório. Esta pesquisa teve como objetivo principal a avaliação do método de reconstituição de corpo de prova denominado “*Moist Tamping*” em amostras deformadas coletadas em campo, com a intenção de analisar se este fornece resultados de ensaios especiais similares àqueles performados com amostras indeformadas coletadas em pistas testes de um empilhamento de rejeito filtrado de minério de ferro. O método de “*Moist Tamping*” foi escolhido para preparação das amostras reconstituídas uma vez que, apesar de ser um método bastante difundido em pesquisas e trabalhos com solos e outros materiais, existem poucos estudos que avaliam a efetividade desse método em reproduzir de maneira confiável o comportamento mecânico de amostras de rejeito previamente compactadas em campo, ou seja, em relação as amostras indeformadas. O desenvolvimento desta pesquisa se limitou a análises referentes a amostras do rejeito filtrado arenoso oriundo do processo de beneficiamento mineral de minério de ferro. Demais materiais devem ser analisados em pesquisas futuras.

O programa experimental incluiu a realização de ensaios de caracterização completa do rejeito filtrado de flotação, sendo realizados os ensaios de granulometria por peneiramento e a laser, além de limites de Atterberg, densidade real dos grãos e compactação Proctor Normal. Posteriormente, para a avaliação do comportamento mecânico do material, foram realizados ensaios de adensamento uniaxial, ensaio de cisalhamento direto simples estático. Por fim, foram realizados ensaios para avaliação da *fabric* do material, sendo conduzidos ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) e porosimetria por adsorção de nitrogênio. Importante destacar o controle de umidade a qual foram submetidas as amostras indeformadas, visando não perder a umidade das amostras antes de ser executados os ensaios. Todos os ensaios foram realizados com ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, para ambas as pistas testes medianamente compactada e compactada.

As conclusões apresentadas destacam a importância e a relevância da pesquisa, com base nos resultados mostrados e definidos nos capítulos precedentes:

- As amostras deformadas e indeformadas coletadas apresentaram resultados de caracterização completa bastante similares, indicando a homogeneidade e uniformidade das amostras;
- Em relação aos resultados do ensaio de adensamento uniaxial, a amostra deformada reconstituída pelo método de *Moist Tamping* apresentou um comportamento ligeiramente menos compressível se comparado com o resultado obtido para a amostra indeformada, que representa a condição de campo. Isto pode ser observado pela variação entre o de índice de vazios normalizado no primeiro estágio de carregamento, e o valor do índice de vazios normalizado para o último estágio de descarregamento, o qual se deu uma pequena diferença para as amostras ensaiadas, para ambas as pistas teste medianamente compactada e compactada. Os valores obtidos para as tensões de pré adensamento também foram distintos para a amostra deformada reconstituída e a amostra indeformada;
- Analisando os resultados do ensaio de Cisalhamento Direto Simples Estático (DSS), ao se comparar os resultados de ângulo de atrito de pico para a amostra indeformada e a amostra deformada reconstituída, para ambas as pistas teste medianamente compactada e compactada, é possível notar que os valores estão relativamente bem próximos, indicando que o método de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” conseguiu representar de forma fidedigna os resultados apresentados pela amostra indeformada, nas condições de campo;
- Para ambas as pistas teste medianamente compactada e compactada, o resultado do ensaio de DSS apresentou uma equidade na trajetória de tensões para a amostra deformada reconstituída e a amostra indeformada, inclusive na localização do ponto de “*Quasi-Steady State*”, indicando que a técnica de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” aparenta ser fidedigna com a condição representada em campo, analisando o comportamento mecânico da amostra;
- Após as tentativas para realização do ensaio de cisalhamento direto simples cíclico, foi possível concluir que é de suma importância a definição correta e assertiva do módulo de rigidez do material, objetivando atingir resultados confiáveis de modelos tensão cisalhante versus deformação e tensão cisalhante versus tensão vertical efetiva;

- Os resultados gerados pelas imagens eletrônicas por meio do MEV sugerem uma similaridade entre a *fabric* da amostra deformada reconstituída e a amostra indeformada coletadas em ambas as pistas testes executadas. Foi possível observar uma certa diferença na organização e distribuição dos tamanhos dos grãos quando comparado os resultados da amostra deformada reconstituída entre as pistas testes medianamente compactada e compactada;
- Além de observar a homogeneidade da distribuição mineralógica em todas as amostras, conclui-se que o quartzo é o silicato de maior presença, seguido dos óxidos de ferro. Os demais minerais possuem pequenas frações distribuídas ao longo do espaço amostral ensaiado;
- O ensaio de MEV não permite a diferenciação dos minerais presentes na amostra (entre as hematitas, óxidos de ferro e demais minerais encontrados). Somente o quartzo pode ser identificado e diferenciado dos demais minerais. Apesar disso, o ensaio permite mesurar de forma quantitativa o tamanho dos grãos e dos vazios. Maiores detalhamentos nas dimensões dos grãos devem ser obtidos através de ensaios de tomografia e microtomografia, que ficam como sugestões para trabalhos futuros.
- Pode-se concluir que o ensaio de porosimetria por adsorção de nitrogênio mediu o volume de poros intrínsecos às partículas dos grãos das amostras, e não os vazios localizados entre os grãos, como identificados pela região mais escura nas imagens eletrônicas geradas pelo MEV. Esta hipótese corrobora com o resultado praticamente idêntico de volume dos poros para as quatro amostras ensaiadas, uma vez que se analisou amostras homogêneas.
- Por meio da análise da *fabric* é possível estabelecer um padrão entre a distribuição mineralógica das amostras ensaiadas, porém, a distribuição e tamanho dos grãos, analisadas pelo ensaio MEV, se mostraram eficazes em comparar amostras compactadas e medianamente compactadas, apresentando certa diferença na organização dos grãos.
- A comparação entre os resultados obtidos pelas amostras coletadas na pista teste medianamente compactada e compactada teve como objetivo analisar a condição menos densa apresentada pela pista medianamente compactada, versus uma condição densa representada pela pista compactada. Esta comparação visou analisar a organização dos grãos nas duas condições, e também observar se existiria uma mudança significativa no comportamento mecânico monotônico das duas condições. O ensaio de adensamento

mostrou um comportamento similar para as duas pistas, assim como os resultados de cisalhamento direto simples, que também apresentaram comportamento semelhante nas duas pistas testes analisadas.

Em suma, o método de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” se mostrou aplicável para a representação da condição de campo das amostras ensaiadas, quando avaliado o comportamento por carregamento mecânico monotônico, por meio do ensaio DSS. Porém, ao se avaliar a compressibilidade do material, foi identificada uma pequena diferença nos resultados. A análise da *fabric* do material para ambas as pistas testes mostrou que as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas obtiveram as mesmas características. Quando comparado os resultados da amostra deformada reconstituída entre as pistas testes medianamente compactada e compactada, uma diferença na organização dos grãos é observada.

Analisando as diferenças observadas nos resultados apresentados pelas amostras reconstituídas em laboratório, comparada com as amostras indeformadas, é necessário elencar alguns fatores que podem distorcer os resultados obtidos pelas amostras que foram reconstituídas. Primeiramente, nota-se que o valor de densidade seca alvo e umidade geotécnica obtidos no ensaio de compactação de Proctor Normal, realizado com as amostras deformadas, é ligeiramente inferior se comparado com a densidade de compactação *in situ* das amostras indeformadas. Importante ressaltar que durante o método de preparação da amostra deformada, foi utilizado os valores obtidos no ensaio de compactação. Este fator, além da aplicação do número de camadas para preenchimento do cilindro, pode influenciar nos resultados principalmente no que tange a organização dos grãos.

Além deste ponto, é relevante destacar o histórico de tensões efetivas a qual o bloco indeformado estava submetido em campo, após a conclusão da pista teste, comparado com a ausência de histórico de tensões dos corpos de prova reconstituídos, já que foram moldados em laboratório. Esta lacuna de tensões efetivas, características de materiais normalmente adensados, podem mascarar resultados dos ensaios de compressibilidade (como foi notado uma diferença no ensaio de adensamento), se comparados com o histórico de tensões a qual foi submetida a amostra indeformada, sendo classificada como um material pré adensado.

Ao longo da execução da campanha experimental no laboratório, foram identificadas oportunidades de condução de novos ensaios e análises com o mesmo material previamente ensaiado, visando analisar o comportamento mecânico cíclico das amostras, e também o comportamento não monotônico das mesmas, se estivessem submetidas a tensões em diferentes

planos e orientações, como em ensaios triaxiais. Não obstante, por razões de indisponibilidade de equipamentos no laboratório e tempo hábil para a pesquisa, não foi possível iniciar os novos ensaios sugeridos. Deste modo, cita-se algumas sugestões para pesquisas futuras, visando aprofundar o conhecimento e dar sequência aos estudos sobre a aplicabilidade do método de reconstituição de amostra “*Moist Tamping*” na representação da condição de campo do rejeito filtrado de flotação de minério de ferro, e suas características mecânicas:

- Realizar ensaios triaxiais isotrópicos e anisotrópicos, nas condições drenadas e não drenadas, objetivando comparar os parâmetros geotécnicos obtidos por meio dos ensaios entre as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas;
- Realizar ensaios triaxiais drenados e não drenados com congelamento do índice de vazios para determinação da Linha de Estados Críticos com ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas, para avaliação do comportamento do estado crítico das amostras, e a aplicação no modelo de Cam-Clay para a análise e comparação da superfície de plastificação do material;
- Realizar a sequência dos ensaios de cisalhamento direto simples cíclico, buscando definir de maneira precisa o módulo de rigidez do material, visando obter resultados confiáveis e realistas, para ambas as amostras deformadas reconstituídas e indeformadas;
- Executar ensaios de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) a partir de amostras oriundas do processo de geração do rejeito de flotação, em diversas etapas do processo de beneficiamento, visando avaliar a morfologia e fabricação dos grãos durante o processo de formação dos rejeitos, até a etapa final de filtragem e disposição na pilha de rejeitos;
- Realizar ensaio de porosimetria utilizando a adsorção ou intrusão de outro elemento químico, adequado para as características do rejeito de flotação ensaiado;
- Analisar e executar outros métodos de reconstituição de amostras deformadas, como Pluviação a ar e a água, para verificar a aplicabilidade na representação da condição de campo da amostra.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT. (1991). Solo - Controle de Compactação pelo método de Hilf. NBR ISSO 12102. Rio de Janeiro: 14 p.
- ABNT. (2016). Solo - Análise granulométrica de solos. NBR ISSO 7181. Rio de Janeiro, 7 p.
- ABNT. (2016). Solo - Determinação do Limite de Liquidez - Método de Ensaio. NBR ISSO. 6459. Rio de Janeiro, 54.
- ABNT. (2016). Solo - Determinação do Limite de Plasticidade - Método de Ensaio NBR ISSO. 7180. Rio de Janeiro, 54.
- ABNT. (2017). Grãos que passam na peneira 4,88mm - Determinação da Massa específica - Método de ensaio. NBR ISSO 6508. Rio de Janeiro, 54.
- ABNT. (2020). Solo - Ensaio de adensamento unidimensional. NBR ISSO 16853. Rio de Janeiro, 16 p.
- ABNT. (2020). Solo — Ensaio de compactação. NBR ISSO 7182. Rio de Janeiro, 9p.
- Aguiar, M. (2012). *Fundações - Estudos Geotécnicos - Investigação, Instrumentação e Monitoramento Geotécnico*. Instituto Brasileiro de Educação Connuada INBEC.
- Alves, P. (2020). Empilhamento De Rejeito Filtrado: A Expansão De Uma Alternativa Para Substituição De Barragens. *Dissertação de mestrado, pós graduação em Engenharia Mineral, UFOP*, p. 116 p. .
- American Society For Testing And Materials. (2017). Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils ASTM D6528-17. West Conshohocken, Pennsylvania.
- Ávila, I., Crnkovic, P., & Milioli, F. (2010). Metodologia Para o Estudo da Porosidade de Dolomita em Ensaio de Sulfatação Interrompida . *Quim. Nova.*, pp. 1732-1738.
- Bellaver Corte, M., Consoli, N., & Festugato, L. (2019). Shear Strength of a Sand Under Plane Strain Conditions. *XVI PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE)*, pp. pp. 56-64.
- Boxil, L. (march de 2016). The Impact Of Fabric And Surface Characteristics On The Engineering. Vancouver, British Columbia, Canada.
- Brandão, M. R. (2019). *Modelagem Hidrodinâmica Uni E Bidimensional Aplicada Ao Rompimento Da Barragem Do Fundão Em Mariana/Mg*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Cappellaro, C. (2019). *The Influence of Fines Content, Fabric and Layered Structure on the Undrained Cyclic Behaviour of Christchurch Sandy Soils*. University of Canterbury.

- Carraro, J., & Prezzi, M. (2007). A New Slurry Based Method of preparation of specimens of Sand Containing Fines. pp. Geotechnical Testing Journal, Vol. 31, Nº 1.
- Casagrande, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review. *Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. pp. 79-133.
- Corrêa, M. (2018). Impacto Da Reconstituição De Amostras De Laboratório Na Avaliação Do Potencial De Liquefação Em Depósitos De Rejeito. Ouro Preto, Brasil: 180 f.
- Corrêa, M. (2018). *Impacto Da Reconstituição De Amostras De Laboratório Na Avaliação Do Potencial De Liquefação Em Depósitos De Rejeito. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Ouro Preto*. Ouro Preto. 183 p.
- da Fonseca, A., Cordeiro, D., Molina-Gómez, F., Besenzon, D., Fonseca, A., & Ferreira, C. (2022). The mechanics of iron tailings from laboratory tests on reconstituted samples collected in post-mortem Dam I in Brumadinho. *Soils and Rocks*, pp. 1-20 p.
- de Souza, M., de Oliveira, A., Bezerra, A., Varela, G., & Mendes, L. (Maio de 2023). Disposição de Rejeito por Empilhamento como Alternativa para Barragens de Montante: uma Revisão de Literatura. *Sexto Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade*, pp. 1-6.
- Energia, M. D. (2021). *Plano Nacional de Mineração 2030 Geologia, Mineração e Transformação Mineral*. Brasília.
- Fernandes, F. C. (2018). *Ensaio De Coluna Ressonante Ede Bender Elements Para Medidas De Modulos Cisalhantes Em Caulim*. Rio de Janeiro.
- Freire, A. S. (2022). Influência Do Teor De Finos No Comportamento Geomecânico De Um Rejeito De Minério De Ferro Do Quadrilátero Ferrífero. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil: 139 f.
- Jefferies, M., & Been, K. (2016). *Soil Liquefaction. A Critical State Approach, Second Edition*. CRC Press. 712 p.
- Kerce, J. (14 de Junho de 2024). *Gas Adsorption Theory. The MicroReport*. Fonte: Micromeritics: <https://www.micromeritics.com/particle-testing/library/>
- La Rochelle, P., Leroueil, S., & Tavenas, F. (1986). A technique for long-term storage of clay samples. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 602-605.
- Ladd, R. S. (1978). *Preparing Test Specimens Using Undercompaction*.
- Lade, P. V. (2016). *Triaxial Testing of Soils*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Lopes, M. M. (2021). *Influência Dos Parâmetros De Compactação E Da Estabilização De Um Rejeito De Minério De Ferro Com Polímero*. Brasília, DF, Brasil.
- M, S., & Kim, J. (2013). Behavior of marine silty sand subjected to long term cyclic loading. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. pp 2399-2402.

- Mangabeira, A. P. (2009). *Avaliação Do Efeito Da Porosidade Nas Etapas De Beneficiamento De Minério De Ferro Da Samarco*. Belo Horizonte.
- Marçal de Souza, G. (2020). *Proposta de Metodologia para Lavra de Barragens de Rejeitos de Ferro Construídas pela Técnica de Aterro Hidráulico*. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- Materiais, L. d. (2024). *Certificado amostra deformada rejeito filtrado trecho compactado*. Nova Lima.
- Materials, A. S. (2019). Standard Test Method for Consolidated Undrained Cyclic Direct Simple Shear Test under Constant Volume with Load Control or Displacement Control. D8296-19.
- Milonas, J. (2006). Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico. *Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília.* , p. 168 p.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*.
- Montemezzo, R. (2005). *Estudo Comparativo de Ensaios de Compressão Confinada em Argilas e Areias Saturadas Utilizando o Ensaio CRS. Dissertação de mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 146 p. .
- Neves, E. M. (2016). *Mécanica dos Estados Críticos: solos saturados e não saturados*. IST Press.
- Oliveira, S. (2022). Influência do Estado de Tensão na Obtenção dos Parâmetros de Estado Crítico de Rejeitos Filtrados de Minério de Ferro. *Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.*, p. 82 p.
- Perera, M., & Priyankara, N. (2023). Shear Strength Characteristics of Municipal Solid Waste. *Engineer*, pp. pp37-49.
- Raghunandan, M., Juneja, A., & Benson Hsiung, B. (2012). Preparation of Reconstituted Sand Samples in the Laboratory. *International Journal of Geotechnical Engineering.* , pp. 125-131. <http://dx.doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.01.125-131>.
- Reid, D., Simms, P., Siva Sivathayalan, S., Fanni, R., & Fourie, A. (27 de Outubro de 2022). The “air dried” specimen reconstitution technique – review, refinements, and applications. p. 13.
- Ruchkys, U., & Machado, M. (2012). Oficinas de sensibilização para conservação de sítios geológicos do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Terrae Didatica*, pp. 247-33 p.
- Sanchez, M. (2023). Short-Course Title: Soil Mechanics - Fundamentals & Applications. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Santos, R. (2022). Estudo de Filtragem de um Rejeito de Flotação Visando o Empilhamento a Seco. *Trabalho de Conclusão de Curso Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais*, p. 71.

- Sarkar, D., Goudarzy, M., & König, D. (12 de June de 2019). An interpretation of the influence of particle shape on the mechanical behavior of granular material. *Springer Nature*, pp. 1-24.
- Silva, C. (2018). Ensaio De Adensamento Com Deformação Controlada (CrS): Desenvolvimento De Uma Ferramenta Para Análise E Interpretação Dos Resultados. *Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa.*, p. 103 p.
- Souza, H. A. (2021). *Análise do Comportamento Geotécnico de um Rejeito de Minério de Ouro no Estado Crítico*. Ouro Preto.
- Stringer, M., Cubrinovski, M., & Haycock, I. (2016). Experience with gel-push sampling in New Zealand. *Australian Geomechanics Society*, pp. 577-582.
- Vaid, Y., & Sivathayalan, S. (2000). Fundamental Factors Affecting Liquefaction Susceptibility of Sands. *Can. Geotech. J.*, pp. pp. 592-606.
- Vaid, Y., Sivathayalan, S., & Stedman, D. (1999). Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand. *Geotech. Test. J.*, pp. Vol. 22, No. 3, pp. 187–196.
- Viana da Fonseca, A., Soares, M., & Fourie, A. (2015). Cyclic DSS tests for the evaluation of stress densification effects in liquefaction assessment. pp. pp 1 - 28.
- Wang, G., & Wei, J. (2016). Microstructure evolution of granular soils in cyclic mobility. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Wei, J., & Wang, G. (2016). Evolution of fabric anisotropy in cyclic liquefaction of sands. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, pp. 1640005 - 1 - 15 .
- Zlatovic, S., & Ishiara, K. (1997). Normalized Behavior of Very Loose Non Plastic Soils: Effects of Fabric. pp. Soils Found., Vol. 37, N° 4, pp. 44-56.