

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**ANDRÉ LINS MACHADO COELHO**

**INFLUÊNCIA DA OXIDAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITOS  
DE MINÉRIO DE FERRO**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C672i  
2023  
Coelho, André Lins Machado, 1974-  
Influência da oxidação no comportamento mecânico de  
rejeitos de minério de ferro / André Lins Machado Coelho. –  
Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (136 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2023.

Referências bibliográficas: f. 134-136.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.468>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Barragens de rejeitos. 2. Minérios de ferro. 3. Oxidação.  
4. Cisalhamento dos solos - Resistência - Testes. 5. Quadrilátero  
Ferrífero (MG). I. Marques, Eduardo Antônio Gomes, 1965-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
III. Título.

CDD 22. ed. 627.8

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

**ANDRÉ LINS MACHADO COELHO**

INFLUÊNCIA DA OXIDAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITOS  
DE MINÉRIO DE FERRO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

VIÇOSA - MINAS GERAIS

**ANDRÉ LINS MACHADO COELHO**


**INFLUÊNCIA DA OXIDAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITOS  
DE MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques


APROVADA: 18 de dezembro de 20223

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 **ANDRÉ LINS MACHADO COELHO**  
Data: 15/08/2024 21:13:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

André Lins Machado Coelho

Documento assinado digitalmente  
 **EDUARDO ANTONIO GOMES MARQUES**  
Data: 15/08/2024 21:57:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Eduardo Antonio Gomes Marques

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Ivana, por seu apoio, amor e companheirismo ao longo destes anos. Sua perseverança e dedicação são uma fonte constante de inspiração. Palavras não são suficientes para expressar minha gratidão.

Ao meu filho, Rodrigo, por ser a maior fonte de inspiração que tenho em minha vida e com quem aprendo uma nova lição a cada dia.

Aos meus pais (*in memoriam*), pelo mais sincero amor. Seu esforço incansável para ver seus filhos realizarem seus sonhos, desde as lições em casa até os ensinamentos que ficam na memória, são a base do que sou hoje.

Agradeço aos meus irmãos, pelo exemplo em minha vida, pois auxiliaram muito no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Um agradecimento especial ao professor Dr. Eduardo Marques pela paciência, orientação e contribuições inestimáveis para este trabalho. Sua influência na minha trajetória acadêmica e profissional é indelével.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, por estarem ao meu lado e oferecerem apoio nos momentos desafiadores, com um agradecimento especial à Sara Rodrigues, cuja auxílio no desenvolvimento dos ensaios de laboratório foi crucial no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos técnicos do laboratório de mecânica dos solos da UFV.

Aos professores e funcionários do PPGEC da UFV, obrigado por enriquecerem minha formação acadêmica e profissional com seu ensino e orientação.

Aos técnicos do LMS-UFV, em especial ao Lucas, por me auxiliar com os testes de oxidação forçada.

E, por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para esta jornada, meu sincero muito obrigado.

## RESUMO

COELHO, André Lins Machado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2023. **Influência da Oxidação no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Ferro.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Com a intenção de aprofundar a compreensão sobre os impactos ambientais e de segurança relacionados ao armazenamento de rejeitos de minério de ferro, esta dissertação explora como a oxidação afeta suas propriedades geomecânicas. Através de uma metodologia experimental rigorosa, que incluiu análises de caracterização granulométrica, testes de compressão triaxial e estudos microestruturais, este trabalho investiga a interação complexa entre oxidação e comportamento mecânico dos rejeitos. Os resultados evidenciam que a oxidação altera significativamente tanto as propriedades físicas quanto mecânicas dos rejeitos. Foi observado que amostras oxidadas demonstram uma diminuição na resistência ao cisalhamento, com um aumento correspondente na concentração de ferro, sugerindo que a oxidação contribui para a alteração da microestrutura dos rejeitos. Especificamente, os testes de resistência revelaram que o ângulo de atrito interno diminuiu com a oxidação, enquanto o intercepto coesivo apresentou variações menos previsíveis. Além disso, as análises microestruturais, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), confirmaram as mudanças na composição química, especialmente um enriquecimento em ferro nos rejeitos oxidados. Estas descobertas têm implicações profundas para a gestão de rejeitos de minério de ferro, sugerindo que a oxidação pode comprometer a estabilidade a longo prazo dos depósitos de rejeitos. Este estudo conclui que é essencial considerar a oxidação nas estratégias de manejo de rejeitos, enfatizando a necessidade de desenvolver métodos de mitigação que abordem as transformações químicas e mecânicas induzidas pela oxidação. Dessa forma, esta pesquisa oferece contribuições significativas para o campo da geotecnia e gestão de rejeitos, propondo uma nova perspectiva sobre como a oxidação influencia a estabilidade de rejeitos de minério de ferro. Além de avançar no entendimento científico, os resultados fornecem uma base sólida para futuras investigações e para o desenvolvimento de práticas de manejo mais seguras e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Minério de ferro. Quadrilátero Ferrífero. Características físicas. Ensaios triaxiais. Oxidação.

## ABSTRACT

COELHO, André Lins Machado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, december, 2023. **Influence of Oxidation on the Mechanical Behavior of Iron Ore Tailings.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

With the intention of deepening the understanding of the environmental and safety impacts related to the storage of iron ore tailings, this dissertation explores how oxidation affects their geomechanical properties. Through a rigorous experimental methodology, which included granulometric characterization analyses, triaxial compression tests, and microstructural studies, this work investigates the complex interaction between oxidation and the mechanical behavior of tailings. The results show that oxidation significantly alters both the physical and mechanical properties of the tailings. It was observed that oxidized samples demonstrate a decrease in shear strength, with a corresponding increase in iron concentration, suggesting that oxidation contributes to the alteration of the tailings' microstructure. Specifically, the strength tests revealed that the internal friction angle decreased with oxidation, while the cohesive intercept showed less predictable variations. Furthermore, microstructural analyses, using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), confirmed the changes in chemical composition, especially an enrichment in iron in the oxidized tailings. These findings have profound implications for the management of iron ore tailings, suggesting that oxidation can compromise the long-term stability of tailings deposits. This study concludes that it is essential to consider oxidation in tailings management strategies, emphasizing the need to develop mitigation methods that address the chemical and mechanical transformations induced by oxidation. In this way, this research offers significant contributions to the field of geotechnics and tailings management, proposing a new perspective on how oxidation influences the stability of iron ore tailings. Besides advancing scientific understanding, the results provide a solid foundation for future investigations and for the development of safer and environmentally responsible management practices.

Keywords: Iron ore. Quadrilátero Ferrífero. Index properties. Triaxial test. Oxidation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Histórico de produção de minério de ferro no Brasil e no mundo. ....	19
Figura 3.2 – Maiores produtores de minério de ferro em 2022. ....	19
Figura 3.3 – Curva granulométrica de duas amostras de rejeitos. ....	21
Figura 3.4 – Carta de plasticidade de Casagrande. ....	23
Figura 3.5 – Correção de área do ensaio triaxial. ....	37
Figura 3.6 – Tensões do ensaio triaxial. ....	39
Figura 3.7 – Tensões do ensaio triaxial. ....	40
Figura 3.8 – Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb. ....	42
Figura 3.9 – Diagrama $s'-t$ (MIT). ....	44
Figura 3.10 - Diagrama $p'-q$ (Cambridge) ....	45
Figura 3.11 – Determinação dos parâmetros de resistência através da linha $k_f$ . ....	46
Figura 3.12 – Critérios de ruptura para solos. ....	49
Figura 3.13 – Gráficos a serem gerados a partir de dados obtidos em ensaio triaxial CIU. (a) Tensão Desviadora x Deformação Axial; (b) Variação da Poropressão x Deformação Axial; (c) Razão de Tensões x Deformação Axial; (d) Diagrama $s' x t$ ; (e) Parâmetro A de Skempton x Deformação Axial. ....	52
Figura 4.1 – Abertura de poço de inspeção. ....	60
Figura 4.2 – (a) Abertura da praça de trabalho; (b) Início da cravação estática de tubo de PVC. ....	63
Figura 4.3 – (a) Continuidade da cravação estática de tubo de PVC; (b) Finalização da cravação estática de tubo de PVC. ....	64
Figura 4.4 – (a) Utilização de talagarça do topo da amostra; (b) Selagem do topo da amostras com parafina. ....	64
Figura 4.5 – (a) Proteção do topo da amostra com plástico e filme; (b) Separação da base da amostra com fio de aço. ....	65
Figura 4.6 – (a) Acondicionamento das amostras em caixa de madeira; (b) Preenchimento da caixa de madeira com serragem umedecida. ....	65
Figura 4.7 – Amostras deformadas, retiradas em local adjacente às indeformadas. (a) REJEITO_01; e (b) REJEITO_02. ....	67
Figura 4.8 - Amostras deformadas, retirada na saída da planta de filtragem. (a) REJEITO_03. ....	67

Figura 4.9 - Fluxograma da campanha de ensaios a serem realizados nas amostras deformadas e indeformadas.....	71
Figura 4.10 – Peneiramento e homogeneização da amostra “Rejeito-03”.....	75
Figura 4.11 – Moldagem de corpo de prova, a partir de amostra indeformada.....	78
Figura 4.12 – Preparação de amostras reconstituídas.....	79
Figura 4.13 – Preparação da base da célula triaxial.....	80
Figura 4.14 – Fase de adensamento do corpo de prova.....	82
Figura 4.15 – Fase de cisalhamento do corpo de prova.....	83
Figura 5.1 – Curvas granulométricas das amostras ensaiadas.....	87
Figura 5.2 – Curvas granulométricas de rejeitos gerados em empreendimentos minerários do quadrilátero ferrífero.....	88
Figura 5.3 – Massa específica dos grãos de rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.....	90
Figura 5.5 – Limites de consistência de rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.....	91
Figura 5.6 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 01, amostra indeformada, não submetida ao processo de oxidação.....	93
Figura 5.7 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 01, amostra reconstituída, não submetida ao processo de oxidação.....	94
Figura 5.8 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória de pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.....	95
Figura 5.9 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória pós- pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.....	96
Figura 5.10 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 02, amostra indeformada, não submetida ao processo de oxidação.....	97
Figura 5.11 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 02, amostra reconstituída, não submetida ao processo de oxidação.....	98
Figura 5.12 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória de pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.....	99
Figura 5.13 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória pós-pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.....	100
Figura 5.14 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito natural, amostra reconstituída, não submetida ao processo de oxidação.....	101

Figura 5.15 – Trajetórias de tensão rejeito natural – envoltória de pico - amostra não submetida ao processo de oxidação. ....	102
Figura 5.16 – Trajetórias de tensão rejeito natural – envoltória pós- pico- amostra não submetida ao processo de oxidação. ....	103
Figura 5.17 - Amostra de rejeito 01 (a) anterior e (b) posterior ao processo de oxidação forçada. ....	104
Figura 5.18 – Amostra de rejeito 02 (a) anterior e (b) posterior ao processo de oxidação forçada. ....	105
Figura 5.19 - Amostra de rejeito 03 (a) anterior e (b) posterior ao processo de oxidação forçada. ....	106
Figura 5.20 – Resumo dos resultados dos ensaios de EDS para as amostras analisadas. ....	107
Figura 5.21 – Curvas granulométricas rejeito 01. ....	110
Figura 5.22 – Curvas granulométricas rejeito 02. ....	111
Figura 5.23 – Curvas granulométricas rejeito natural. ....	111
Figura 5.24 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 01 oxidado, amostra reconstituída. ....	116
Figura 5.25 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória de pico. ....	117
Figura 5.26 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória pós- pico. ....	118
Figura 5.27 – Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 02 oxidada, amostra reconstituída. ....	119
Figura 5.28 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória de pico. ....	120
Figura 5.29 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória pós-pico. ....	121
Figura 5.30 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 03 oxidado, amostra reconstituída. ....	123
Figura 5.31 – Trajetórias de tensão rejeito 03 – envoltória de pico. ....	124
Figura 5.32 – Trajetórias de tensão rejeito 03 – envoltória pós- pico. ....	125
Figura 5.33 – Comparação entre índices de vazios de diferentes amostras. ....	127
Figura 5.34 – Comparação entre $e_c$ e ângulo de atrito pós-pico. ....	128
Figura 5.35 – Comparação entre concentração de ferro e ângulo de atrito pós-pico. ....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Panorama da produção mineral paraense no cenário nacional por substância produzida (2023). .....	17
Tabela 3.2 - Panorama da mineração paraense no cenário nacional por classe de substância produzida (2023) .....	18
Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios do programa experimental realizado.....	72
Tabela 5.1 – Características físicas das amostras ensaiadas.....	87
Tabela 5.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de resistência realizados. ....	92
Tabela 5.3 – Resumo dos resultados dos ensaios EDS na amostra de rejeito 01. ....	105
Tabela 5.4 – Resumo dos resultados dos ensaios EDS na amostra de rejeito 02. ....	106
Tabela 5.5 – Resumo dos resultados dos ensaios EDS na amostra de rejeito 03. ....	107
Tabela 5.6 – Características físicas das amostras ensaiadas.....	110
Tabela 5.7 – Resumo dos resultados dos ensaios de resistência realizados pós testes de oxidação forçada. ....	114
Tabela 5.8 – Comparação do ângulo de atrito crítico.....	129

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> - Peróxido de hidrogênio

IP – Índice de plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c'$  – intercepto coesivo efetivo

$C_U$  – Coeficiente de uniformidade

$D_{50}$  – Tamanho médio da partícula

$e_0$  – Índice de vazios inicial

$e_c$  - Índice de vazios após adensamento

mm – Milímetros

kPa - Quilo pascal

$\sigma_1, \sigma_3$  – Tensões principais normais

$\phi'$  – Ângulo de atrito efetivo

$\varepsilon_a$  – Deformação axial

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Panorama da mineração de minério de ferro.....	16
3.2. Ensaio de granulometria completa.....	20
3.3. Massa específica dos grãos.....	21
3.4. Limites de consistência.....	23
3.5. Determinação de índice de vazios de amostra.....	24
3.6. Teor de umidade.....	26
3.7. Ensaio triaxial CIU.....	27
3.8. Peróxido de hidrogênio e a oxidação de metais.....	53
3.9. Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia de dispersão de energia (EDS).....	55
3.10. Identificação da oxidação de amostras de rejeito de minério de ferro através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	57
4. METODOLOGIA.....	59
4.1. Coleta de amostras.....	60
4.2. Preparação das amostras.....	74
4.3. Ensaios de caracterização.....	75
4.4. Ensaios de compressão triaxial.....	76
4.5. Oxidação forçada das amostras de rejeito.....	84
5. RESULTADOS.....	85

5.1.	Caracterização física das amostras que não foram submetidas ao processo de oxidação .....	86
5.2.	Ensaio de resistência das amostras que não foram submetidas ao processo de oxidação .....	92
5.3.	Testes de oxidação.....	103
5.4.	Caracterização física das amostras após processo de oxidação.....	109
5.5.	Ensaio de resistência das amostras após testes de oxidação .....	114
6.	CONCLUSÕES.....	131
7.	DIREÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	133
8.	REFERÊNCIAS .....	134

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil, contribuindo significativamente para o PIB nacional. Segundo Jesus e Joaquim (2018), as reservas brasileiras de minério de ferro representam 19,8% das reservas globais. O processo de beneficiamento do minério gera rejeitos que precisam ser gerenciados de forma segura para evitar desastres ambientais, como os ocorridos recentemente com a ruptura de barragens.

Neste contexto, o presente estudo busca entender como a oxidação influencia as propriedades geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro, focando em suas implicações para a estabilidade e segurança das estruturas de disposição de rejeitos. Este entendimento é essencial para o desenvolvimento de práticas de gestão mais seguras e sustentáveis.

Para a extração dos materiais de valor econômico, ocorre o processo de beneficiamento dos minérios, onde os resíduos, ou rejeitos, são gerados. Esses rejeitos, como delineado por Shuttle e Jefferies (2010), são frequentemente alocados em reservatórios ou empilhados. Luz e Lins (2018) esclarecem que são geradas cerca de 0,35 toneladas de rejeitos para cada tonelada de minério de ferro processado.

Contudo, a sociedade voltou seus olhares, com grande preocupação, para as estruturas de disposição de rejeitos, em vista dos recentes eventos catastróficos envolvendo rupturas de barragens. Tais incidentes trouxeram a necessidade imperativa de inovação e avanços tecnológicos na gestão de rejeitos minerais.

O relatório decorrente da ruptura da Barragem Córrego do Feijão destacou o teor elevado de partículas de ferro e sua oxidação como elementos potenciais que influenciam o Índice de Fragilidade (IB) e a fluidez dos rejeitos (Lopes, Roy, 2021). Estes apontamentos sustentam uma discussão crucial acerca da reatividade e estabilidade dos rejeitos, ressaltando a importância de se compreender a resistência destes materiais, bem como sua influência no solo e na qualidade da água. Este entendimento é crucial, uma vez que os minerais mais comumente encontrados nos rejeitos de minério de ferro, como a hematita e a magnetita, tendem a estar associados a elementos reativos como o quartzo e a calcita.

Historicamente, pouca atenção foi dada à possibilidade da oxidação de partículas de ferro influenciar a fragilidade e a resistência dos rejeitos de minério de ferro. Neste contexto, percebe-se uma lacuna significativa no conhecimento sobre o impacto da oxidação das partículas de ferro presentes nos rejeitos de minério de ferro e como essa oxidação pode alterar suas

propriedades geotécnicas, como o ângulo de atrito e a coesão. Essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de práticas de mineração mais seguras e sustentáveis, particularmente em um cenário pós-desastre, onde a busca por soluções de armazenamento de rejeitos mais eficazes se faz premente.

Portanto, este estudo visa preencher esses hiatos ao explorar a influência da mineralogia e da oxidação no comportamento dos rejeitos de minério de ferro, investigando as relações entre esses fatores e os parâmetros geotécnicos dos materiais. Ao aprofundar o entendimento das propriedades intrínsecas dos rejeitos e como elas podem ser alteradas pela oxidação, espera-se contribuir para a melhoria das práticas de gestão de rejeitos, mitigando os riscos e impactos ambientais associados à indústria da mineração e garantindo a estabilidade das estruturas de contenção de rejeitos ao longo de sua vida útil, especialmente considerando os rejeitos reativos (não inertes). Este esforço de pesquisa tem o potencial de abrir novos caminhos para abordagens de mineração mais conscientes e sustentáveis, alinhadas com os princípios do desenvolvimento sustentável.

## **2. OBJETIVOS DA PESQUISA**

### **2.1. Objetivo Geral**

Analisar a influência da oxidação no comportamento geomecânico de rejeitos de minério de ferro.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar a caracterização e índices físicos dos rejeitos a serem estudados, através de ensaios como de granulometria completa, massa específica dos grãos e limites de consistência;
- Determinar dos parâmetros de resistência e do comportamento dos rejeitos, por meio de ensaios triaxiais do tipo CIU<sub>SAT</sub> (ensaio triaxial adensado isotropicamente e não drenado);
- Avaliar a influência do processo de oxidação na caracterização e índices físicos dos rejeitos oxidados, por meio de ensaios como: de granulometria completa, massa específica dos grãos e limites de consistência; e

- Avaliar a influência do processo de oxidação dos parâmetros de resistência e do comportamento dos rejeitos oxidados, por meio de ensaios triaxiais do tipo CIU<sub>SAT</sub> (ensaio triaxial adensado isotropicamente e não drenado).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Panorama da mineração de minério de ferro**

O Brasil ocupa uma posição de destaque entre os maiores produtores de minérios do mundo, com uma produção significativa de ferro, bauxita, cobre, caulim, manganês, níquel, ouro, calcário, entre outros. Esses minérios são amplamente utilizados na construção civil e na indústria de base. Uma parte considerável dessa produção é destinada à exportação, contribuindo positivamente para a balança comercial e impulsionando o Produto Interno Bruto (PIB) tanto dos estados produtores quanto do país como um todo.

A diversidade e riqueza das reservas minerais no país atraem substanciais investimentos no setor, o que resulta em um aumento das receitas municipais através dos royalties e no fortalecimento do mercado de trabalho local. Além disso, essa atividade econômica dinamiza outros setores, como comércio e serviços, especialmente em municípios diretamente influenciados pelos projetos de mineração, como Canaã dos Carajás, Parauapebas e Marabá.

Nos últimos dez anos, a importância da produção mineral no Brasil tem sido evidenciada pela crescente participação do estado na produção nacional de minérios. Em 2018, o país atingiu um pico de 24,6% da produção nacional, mantendo-se acima de 20% de 2016 a 2021. Entre 2014 e 2021, a produção nacional de minérios cresceu 3,7%, com destaque para o aumento de 67,4% na produção de cobre. O Pará contribuiu significativamente para esse aumento, com uma variação positiva de 61,8% na produção de minério de ferro, contrastando com uma redução de 13,2% na produção do mesmo minério em Minas Gerais. Assim, o país continua a consolidar sua posição como um ator importante no setor mineral, com uma contribuição substancial para a economia nacional e uma participação crescente na produção de minérios no mundo.

Para os fins deste estudo, a produção mineral refere-se à atividade de extração e tratamento de minérios, que inclui a soma de minerais metálicos (como ferro, cobre e alumínio), minerais não metálicos (como areia, caulim e sal), minerais energéticos (como carvão mineral e materiais radioativos) e gemas/diamantes. De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), o

Brasil produziu 1,7 bilhão de toneladas de minérios em 2021. Nesse mesmo ano, o estado do Pará foi responsável por 369,4 milhões de toneladas dessa produção, o que corresponde a 21,2% do total nacional.

Tabela 3.1 - Panorama da produção mineral paraense no cenário nacional por substância produzida (2023).

Substância Mineral	Produção (Milhões de toneladas)		Proporção PA/BR (%)
	Brasil	Pará	
Total	1.739,7	369,4	21,2
Ferro	568,4	192,3	33,8
Cobre	99,6	57,4	57,6
Ouro	199,2	55,7	27,9
Alumínio (Bauxita)	46,3	41,4	89,4
Estanho	37,4	6,0	16,0
Rochas (Britadas) e Cascalho	262,2	3,6	1,4
Calcário	169,8	3,3	2,0
Caulim	4,1	2,7	66,3
Níquel	12,5	2,6	21,2
Areia	130,2	2,2	1,7
Manganês	1,9	0,7	38,5
Argilas	52,2	0,5	1,0
Prata	3,2	0,5	15,9
Saibro	16,0	0,2	1,1
Fosfato	39,7	0,1	0,3
Nióbio	15,5	0,1	0,6
Gemas	0,3	0,0	0,1
Outros	6,3	-	-

Fonte: ANM, 2023.

Elaboração: CEEAC/FAPESPA, 2023.

Conforme os dados apresentados na Tabela 3.1, o ferro é a substância mineral mais significativa produzida no Pará. Em 2021, a produção de ferro no estado alcançou 192,3 milhões de toneladas, representando 33,8% da produção total de ferro no Brasil. Em relação à participação nacional das substâncias produzidas no Pará, o alumínio (bauxita) se destacou com a maior contribuição, atingindo 89,4% da produção nacional. Seguiram-se o caulim com 66,3% e o cobre com 57,6%.

A Tabela 3.2 analisou a produção de substâncias minerais por categoria, revelando que a classe dos minerais metálicos é a mais produzida no Brasil. No Pará, a produção de minerais metálicos totalizou 356,8 milhões de toneladas em 2021, correspondendo a 35,9% da produção nacional de substâncias metálicas. Em relação às demais classes de substâncias minerais, a produção do Pará tem uma participação menos expressiva no cenário nacional.

Tabela 3.2 - Panorama da mineração paraense no cenário nacional por classe de substância produzida (2023)

Classe de Substância Mineral	Produção (Milhões de toneladas)		Proporção PA/BR (%)
	Brasil	Pará	
Total	1.739,7	369,4	21,2
Metálicos	994,6	356,8	35,9
Não Metálicos	731,7	12,6	1,7
Gemas e Diamantes	1,5	0,0	0,0
Energéticos	11,9	-	-

Fonte: ANM, 2023.

Elaboração: CEEAC/FAPESPA, 2023.

Assim, pelos dados vemos que o minério de ferro é uma commodity de relevância global, sendo essencial para diversas infraestruturas modernas. O cenário global aponta reservas que se aproximam de 170 bilhões de toneladas (Jesus & Joaquim, 2018). Dentro desse panorama, o Brasil emerge como uma potência mineradora, possuindo cerca de 19,8% dessas reservas (Jesus & Joaquim, 2018).

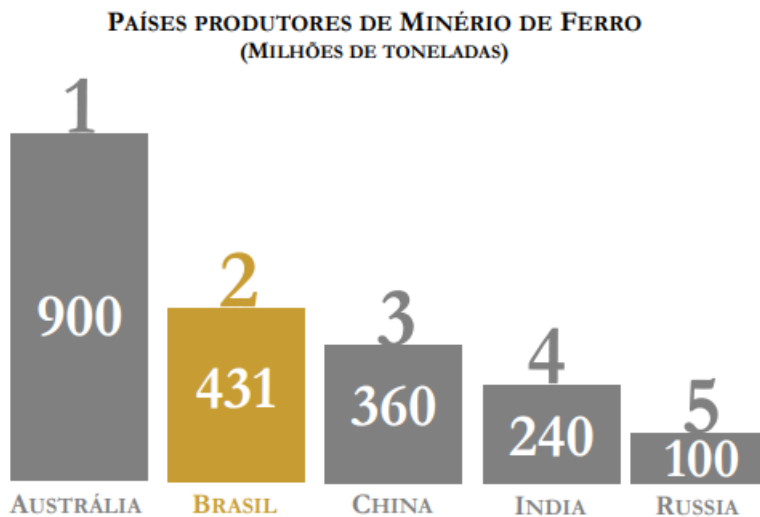
A produção brasileira de minério de ferro tem mostrado um crescimento constante, conforme ilustrado na Figura 3.1, sendo o Brasil o segundo maior produtor de minério de ferro no ano de 2022, com 431 milhões de toneladas, conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.1 – Histórico de produção de minério de ferro no Brasil e no mundo.



Fonte: Adaptado de Boletim do Setor Mineral (2022).

Figura 3.2 – Maiores produtores de minério de ferro em 2022.



Fonte: Adaptado de Boletim do Setor Mineral (2022).

Dentro do território nacional, as regiões mais proeminentes na produção de minério de ferro são o estado do Pará, particularmente em Carajás, e o estado de Minas Gerais, no Quadrilátero Ferrífero.

A maximização do valor do minério extraído é alcançada através de processos de beneficiamento. Este conjunto de técnicas, visa ajustar e melhorar as características granulométricas e mineralógicas dos materiais extraídos.

O beneficiamento resulta inevitavelmente na produção de rejeitos. Para cada tonelada de minério de ferro processada, produz-se, geralmente, em média, 0,35 toneladas de rejeitos (Luz & Lins, 2018). Esses rejeitos, entre outros, possuem composição de areias siltosas, sendo compostos basicamente por quartzo e metais, como hematita e magnetita.

Gerenciar esses rejeitos é vital para garantir a integridade ambiental. Tipicamente, os rejeitos são armazenados em estruturas de armazenamento de rejeitos, cuja concepção e operação devem seguir rígidos padrões de segurança e sustentabilidade (Davies e Rice, 2001; Dixon-Hardy e Engels, 2007).

### **3.2. Ensaio de granulometria completa**

O ensaio de granulometria, um procedimento fundamental na caracterização geotécnica de solos e rejeitos de minério de ferro, desempenha um papel crucial na avaliação do comportamento geotécnico desses materiais. Ao determinar a distribuição do tamanho das partículas, este ensaio fornece percepção valiosa sobre a porosidade, permeabilidade e densidade dos rejeitos, fatores que influenciam diretamente em sua estabilidade e comportamento. Para rejeitos de minério de ferro, cuja granulometria pode variar significativamente dependendo do processo de beneficiamento adotado, entender como as partículas se distribuem é essencial para prever a resposta desses materiais a diferentes condições ambientais e mecânicas.

Este ensaio é executado combinando dois métodos principais: peneiramento e sedimentação. Vamos abordar este ensaio em detalhes com base na norma ABNT NBR 7181 e em outras referências.

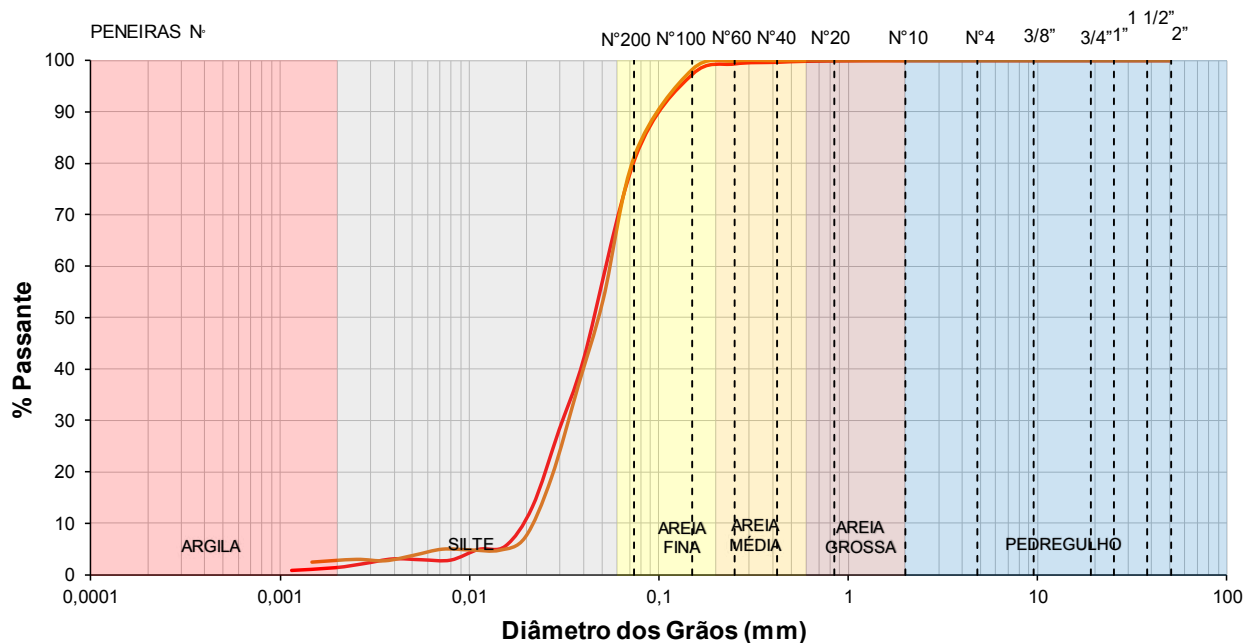
A análise granulométrica é essencial para compreender o comportamento mecânico e hidráulico dos solos, fornecendo informações cruciais sobre sua estrutura e composição (Robin Fell et al., 2005).

Além disso, a análise granulométrica auxilia na interpretação do comportamento geotécnico dos rejeitos de ferro ao identificar a fração granulométrica predominante. Por exemplo, uma

alta proporção de partículas finas pode aumentar a suscetibilidade dos rejeitos à erosão e à instabilidade sob condições de saturação. Por outro lado, uma maior presença de partículas grosseiras pode melhorar a drenagem e reduzir a pressão de poros, contribuindo para a estabilidade geral da estrutura de disposição de rejeitos.

Concluindo, a análise granulométrica, conforme descrito na ABNT NBR 7181, é uma ferramenta indispensável na Geotecnia. Ela permite que engenheiros e geotécnicos entendam a distribuição de tamanhos de partículas no solo, o que é crucial para prever seu comportamento sob diferentes condições de carregamento e ambientais. A seguir, na Figura 3.3, apresenta-se um exemplo de uma curva de distribuição granulométrica de duas amostras de solo.

Figura 3.3 – Curva granulométrica de duas amostras de rejeitos.



Fonte: Autor.

### 3.3. Massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos refere-se à massa por unidade de volume das partículas sólidas do solo e dos rejeitos de minério de ferro, excluindo os vazios e poros existentes entre elas (ABNT NBR 6458, 2016). Normalmente expressa em  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$ , essa medida é um indicativo da mineralogia e da composição do solo. Solos ricos em minerais pesados, como ilmenita ou magnetita, apresentam uma massa específica dos grãos mais alta em comparação com solos predominantemente compostos por quartzo (Briaud, J. L., 2013).

A determinação da massa específica dos grãos é crucial por diversas razões:

- **Caracterização:** Auxilia na caracterização do solo e na distinção entre diferentes tipos de solos. A densidade dos grãos é uma propriedade intrínseca e não é afetada pelo estado ou compactação do solo (Robin Fell et al., 2005).
- **Cálculos Geotécnicos:** A densidade dos grãos é utilizada em vários cálculos geotécnicos, incluindo a determinação da densidade relativa das areias, do índice de vazios do solo e do grau de saturação dos solos (Medzvieckas J. et al., 2004).

No que se refere à importância da relação da massa específica dos grãos e o comportamento geotécnico dos rejeitos de ferro, essa tem um papel fundamental na interpretação do comportamento geotécnico dos rejeitos de minério de ferro. Conhecer a massa específica dos grãos ajuda a prever como os rejeitos irão comportar-se sob diferentes condições de carregamento e ambientais, o que é essencial para garantir a estabilidade das estruturas de disposição de rejeitos.

1. **Estabilidade e Compactação:** Rejeitos com alta massa específica tendem a ser mais estáveis e menos suscetíveis a deslocamentos quando compactados, devido ao seu maior peso específico. Isso é particularmente relevante para rejeitos de minério de ferro, onde a densidade alta pode contribuir para uma melhor compactação e menor risco de liquefação.
2. **Drenagem e Permeabilidade:** A massa específica dos grãos afeta a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade do solo. Rejeitos com menor porosidade, devido à alta densidade dos grãos, têm menor permeabilidade, o que pode influenciar o comportamento hidráulico das barragens de rejeitos e a gestão da água de infiltração.
3. **Resistência ao Cisalhamento:** A resistência ao cisalhamento dos rejeitos está diretamente ligada à densidade dos grãos. Uma massa específica maior indica uma maior resistência intrínseca, o que é vital para a análise de estabilidade de taludes e outras estruturas de contenção.

Concluindo, a determinação da massa específica dos grãos, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6458, é uma etapa fundamental na caracterização geotécnica dos rejeitos de minério de ferro. Ela fornece informações valiosas que influenciam a compreensão e a previsão do

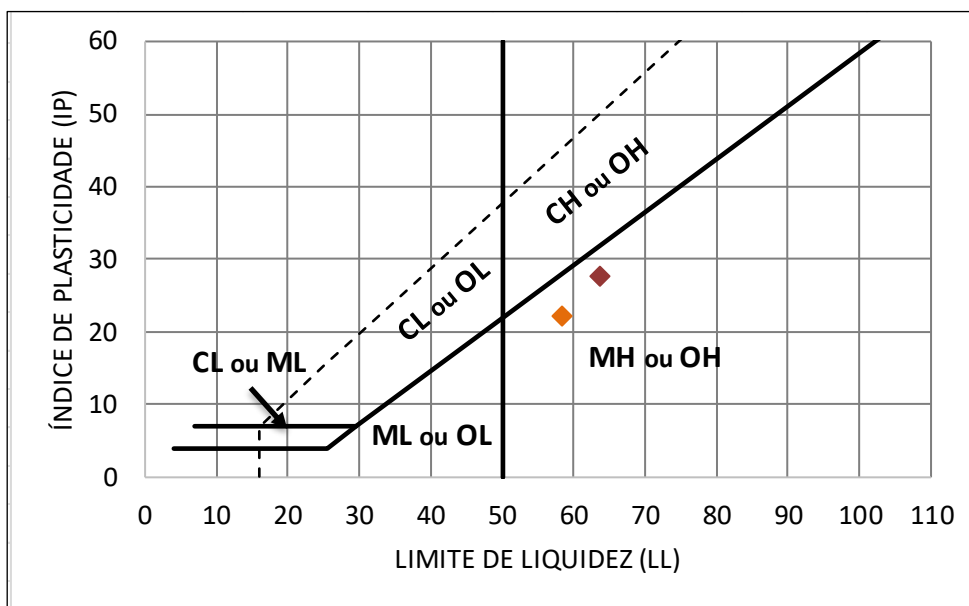
comportamento desses materiais em diversas condições, contribuindo para a segurança e eficiência na gestão dos rejeitos.

### 3.4. Limites de consistência

Os limites de consistência de um solo e de rejeitos de minério de ferro, frequentemente denominados limites de Atterberg, são testes laboratoriais padronizados que caracterizam as propriedades físicas de materiais finos. Estes limites definem os estados de consistência e a transição entre os diferentes estados (líquido, plástico e sólido) de solos coesivos em função do teor de umidade. Os dois limites principais são: limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme determinado pelas normas ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016, respectivamente.

Os valores obtidos para os limites de liquidez e plasticidade são frequentemente usados para calcular o índice de plasticidade (IP), que é a diferença entre LL e LP. O IP fornece uma medida da plasticidade do solo, sendo fundamental para a classificação do solo e para prever seu comportamento sob diferentes condições (Robin Fell et al., 2005). Esses valores também são utilizados em diagramas como o gráfico de plasticidade, proposto por Casagrande, que é uma ferramenta valiosa na classificação e interpretação do comportamento de solos finos (Briaud J. L., 2013), conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Carta de plasticidade de Casagrande.



Fonte: Autor.

No que se refere à importância da relação dos limites de consistência, especialmente os limites de liquidez e plasticidade e o comportamento geotécnico dos rejeitos de minério de ferro, estes são considerados cruciais. Eles fornecem uma visão detalhada sobre as mudanças nas propriedades dos solos em função do teor de água, o que é essencial para a prática geotécnica moderna.

1. **Estabilidade e Resistência:** Rejeitos de minério de ferro com altos índices de plasticidade podem apresentar maior potencial de deformação sob carregamento, influenciando a estabilidade das estruturas de disposição de rejeitos. Solos com alto IP tendem a ser mais compressíveis e menos permeáveis, o que pode afetar sua resistência ao cisalhamento.
2. **Comportamento Sob Variações de Umidade:** A variação do teor de umidade afeta significativamente os limites de consistência dos rejeitos. Em períodos de chuvas intensas, por exemplo, rejeitos com altos limites de liquidez podem se comportar como líquidos, aumentando o risco de deslizamentos e colapsos de barragens.
3. **Previsão de Comportamento:** O índice de plasticidade ajuda a prever o comportamento dos rejeitos sob diferentes condições ambientais. Rejeitos com baixo IP são menos susceptíveis a mudanças volumétricas, enquanto aqueles com alto IP podem sofrer expansões ou contrações significativas, afetando a integridade das estruturas de contenção.

Em resumo, os limites de liquidez e plasticidade são fundamentais para a caracterização de materiais coesivos e têm implicações significativas na geotecnia, desde a classificação do solo até a análise do seu comportamento em obras de engenharia. Eles fornecem uma visão sobre as mudanças nas propriedades do solo com a variação do teor de água e são essenciais para a prática geotécnica moderna. A análise desses limites é vital para entender o comportamento dos rejeitos de minério de ferro e garantir a segurança e a eficiência na gestão dessas estruturas.

### **3.5. Determinação de índice de vazios de amostra**

A determinação do índice de vazios de uma amostra de solo ou de rejeito de minério de ferro é um aspecto crucial na caracterização das propriedades geotécnicas destes materiais,

especialmente quando se trata de amostras indeformadas, as quais mantêm sua estrutura e propriedades *in situ*. O índice de vazios fornece previsões sobre a densidade relativa e a compactação destes materiais, sendo um índice físico fundamental para entender o comportamento mecânico e hidráulico do material. Conforme a norma ABNT NBR 16867, há procedimentos padronizados para determinar o índice de vazios de uma amostra indeformada.

- **Determinação do Índice de Vazios de uma Amostra Indeformada**

O índice de vazios ( $e$ ) é definido como a razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume de sólidos ( $V_s$ ) em uma amostra de solo. Matematicamente, é expresso como:

$$e = \frac{V_s}{V_v} \quad \text{Equação 3-1}$$

Onde:

- $e$  – Índice de vazios;
- $V_s$  – Volume de sólidos, em  $\text{cm}^3$ ;
- $V_v$  – Volume de vazios, em  $\text{cm}^3$ .

O volume de vazios ( $V_v$ ) e volume de sólidos ( $V_s$ ) são determinados por meio de medidas diretas e indiretas da amostra de solo (Das B. M., 1941).

O índice de vazios, assim determinado, oferece informações sobre a estrutura do solo e sua compactação. Valores elevados de índice de vazios indicam solos mais frouxos, enquanto valores baixos indicam solos mais densos. Estes índices são frequentemente correlacionados com propriedades como permeabilidade, resistência ao cisalhamento e compressibilidade do solo (Robin Fell et al., 2005).

Tais valores são fundamentais na engenharia geotécnica, sendo utilizados em análises como a determinação da relação de vazios em diferentes estados (como a relação de vazios crítica) e em estudos sobre a compressibilidade e o comportamento de consolidação dos solos (Briaud J. L., 2013).

Em resumo, o índice de vazios é uma medida essencial da caracterização geotécnica dos solos. A determinação precisa do índice de vazios de amostras indeformadas permite que os engenheiros entendam melhor o comportamento in situ do solo e façam previsões mais precisas sobre seu comportamento sob cargas e condições variadas.

### 3.6. Teor de umidade

O teor de umidade é uma propriedade fundamental dos solos e de rejeitos de minério de ferro que influencia significativamente o comportamento geotécnico do material. Ele é definido como a relação entre o peso da água contida nos vazios do solo e o peso dos sólidos, sendo geralmente expresso em porcentagem (Robin Fell et al., 2005).

- **Método de Determinação:**

A norma ABNT NBR 16097 estabelece o método padrão para determinação do teor de umidade do solo. Esse procedimento envolve a coleta de uma amostra representativa do solo, a determinação do peso úmido, a secagem da amostra até peso constante em estufa e, posteriormente, a determinação do peso seco.

A determinação do teor de umidade é um procedimento básico, mas fundamental, na geotecnia, fornecendo informações cruciais para o entendimento e previsão do comportamento de rejeitos de minério de ferro sob variadas condições.

No que se refere à importância da relação do teor de umidade e o comportamento geotécnico dos rejeitos de ferro, esse valor é vital para várias análises geotécnicas, pois afeta diretamente as propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Aqui estão algumas maneiras pelas quais esse ensaio auxilia na interpretação do comportamento geotécnico dos rejeitos de ferro:

1. **Estabilidade e Resistência:** O teor de umidade influencia diretamente a coesão e a resistência ao cisalhamento dos rejeitos. Rejeitos com altos teores de umidade podem apresentar menor resistência, aumentando o risco de instabilidade nas estruturas de disposição, como barragens de rejeitos.
2. **Comportamento de Compactação:** A umidade ideal é crucial para alcançar a densidade máxima durante a compactação dos rejeitos. Conhecer o teor de umidade permite otimizar os processos de compactação, melhorando a estabilidade e a capacidade de suporte das estruturas.

3. **Propriedades de Permeabilidade:** O teor de umidade afeta a permeabilidade dos rejeitos de minério de ferro. Solos saturados tendem a ter uma menor permeabilidade, o que pode influenciar o fluxo de água através das barragens de rejeitos e a pressão de poros, afetando a estabilidade da estrutura.
4. **Suscetibilidade à Liquefação:** A presença de água nos rejeitos pode aumentar a suscetibilidade à liquefação sob condições de carregamento dinâmico, como durante um terremoto. Ensaio de teor de umidade ajudam a avaliar esse risco, permitindo a implementação de medidas preventivas.
5. **Mudanças Volumétricas:** Alterações no teor de umidade podem causar expansão ou contração nos rejeitos de minério de ferro, afetando a integridade das estruturas de contenção. Conhecer o teor de umidade ajuda a prever e mitigar esses efeitos, garantindo a estabilidade a longo prazo.

Concluindo, a determinação do teor de umidade, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 16097, é uma etapa essencial na caracterização geotécnica dos rejeitos de minério de ferro. Ela fornece informações valiosas para prever o comportamento desses materiais em diversas condições, contribuindo para a segurança e eficiência na gestão das estruturas de disposição de rejeitos.

### 3.7. Ensaio triaxial CIU

O ensaio de compressão triaxial CIU (Consolidado Isotrópico Não Drenado) é um instrumento poderoso na avaliação do comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro, oferecendo uma visão abrangente sobre as propriedades mecânicas destes materiais sob condições de tensões controladas. Mediante a aplicação de tensões confinantes e axiais em amostras de rejeitos, esse ensaio permite determinar parâmetros essenciais como a resistência ao cisalhamento, a deformabilidade e o potencial de liquefação do material, fundamentais na análise de estabilidade de estruturas de disposição de rejeitos.

Para rejeitos de minério de ferro, cuja consistência e comportamento podem ser significativamente afetados pela composição mineralógica e pelo processo de oxidação, o ensaio triaxial CIU ajuda a modelar como esses materiais responderão a diferentes condições de carga e de saturação, essencial para o desenvolvimento de soluções de engenharia seguras e eficazes. Assim, a implementação deste ensaio no estudo dos rejeitos de minério de ferro é vital

para garantir a integridade e a sustentabilidade de projetos de disposição de rejeitos, minimizando os riscos ambientais e melhorando as práticas de gestão de rejeitos.

O ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> é uma metodologia fundamental na Geotecnia, essencial para entender o comportamento dos rejeitos em diferentes condições e influenciar decisões em projetos de engenharia. A preparação cuidadosa da amostra é uma etapa crítica desse ensaio, pois pode afetar significativamente os resultados. Ademais, cuidados devem ser tomadas na preparação inicial do ensaio:

- **Homogeneidade da Amostra:** Garantir que a amostra seja homogênea é essencial para obter resultados consistentes e representativos das condições reais do material. Qualquer variação na composição ou na estrutura interna da amostra pode levar a resultados errôneos sobre a resistência e a deformabilidade do solo.
- **Saturação Adequada:** A saturação correta da amostra é crucial para simular as condições de campo, especialmente para ensaios não drenados. A presença de ar nos poros pode alterar significativamente a resposta do material sob carga, resultando em uma subestimação da resistência ao cisalhamento.
- **Eliminação de Bolhas de Ar:** Bolhas de ar presentes na amostra podem causar inconsistências na medição das deformações e na determinação da poropressão. A presença de ar pode diminuir a precisão dos dados obtidos, comprometendo a confiabilidade dos resultados.
- **Condições de Não Drenagem:** A encapsulação adequada da amostra em uma membrana de borracha e o uso de caps metálicos garantem que as condições de não drenagem sejam mantidas durante o ensaio. Qualquer falha na preparação pode resultar em vazamento de água, afetando as medições de resistência e deformabilidade.
- **Medidas Precisas:** Durante a preparação, medidas precisas de diâmetro, altura, massa, teor de umidade e massa específica são registradas. Esses dados são fundamentais para os cálculos subsequentes e a interpretação dos resultados. Erros nessas medidas podem levar a interpretações incorretas e decisões de engenharia inadequadas.

A preparação cuidadosa da amostra no ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> é indispensável, não apenas para a obtenção de resultados precisos e confiáveis, mas também para garantir que as condições do teste reflitam adequadamente as propriedades dos rejeitos a serem estudados. Um procedimento

de preparação meticoloso assegura a homogeneidade da amostra, a correta saturação desta e a eliminação de bolhas de ar, que podem influenciar a resistência e a compressibilidade do material. Portanto, a integridade da preparação de amostras serve como fundamento para interpretações geotécnicas acuradas, influenciando diretamente o sucesso e a segurança de projetos de engenharia relacionados à disposição e ao manejo de rejeitos de minério de ferro, reforçando a importância de práticas rigorosas de laboratório no campo da Geotecnia.

A preparação começa com a seleção de uma amostra representativa do solo, retirada de uma localização e profundidade específicas. A amostra é então moldada em um formato cilíndrico, com dimensões padronizadas para o ensaio (no caso deste estudo, 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura). Posteriormente, a amostra é encapsulada em uma membrana de borracha para manter as condições de não drenagem, e caps metálicos são adicionados nas extremidades para permitir a aplicação de cargas e medição de deformações (Das B. M., 1941).

Após a preparação, a amostra é montada na célula triaxial, conectando-a às linhas de pressão e posicionando-a entre os pratos superior e inferior do equipamento. É essencial garantir o correto posicionamento dos transdutores de deslocamento e poropressão, se utilizados (Medzvieckas J. et al, 2004). Durante a preparação, registram-se dados cruciais como diâmetro inicial, altura, massa, teor de umidade e massa específica dos solos, fundamentais para cálculos subsequentes e interpretação dos resultados do ensaio.

### **Área inicial do corpo de prova**

A área inicial do corpo de prova pode ser calculada por meio da seguinte equação.

$$A_i = \frac{\pi \times D_i^2}{4} \quad \text{Equação 3-2}$$

Onde:

- $A_i$  – Área inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^2$ ;
- $\pi$  - Constante (3,1416);
- $D_i$  – Diâmetro inicial do corpo de prova, em cm.

### **Volume inicial do corpo de prova**

O volume inicial do corpo de prova pode ser calculado por meio da seguinte equação.

$$V_i = A_i \times h_i$$

Equação 3-3

Onde:

- $A_i$  – Área inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^2$ ;
- $h_i$  - Altura inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}$ ;
- $V_i$  – Volume inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ .

### **Peso específico natural do corpo de prova**

O peso específico natural do corpo de prova pode ser calculado por meio da seguinte equação.

$$\gamma = \frac{M \times 9,81}{V_i}$$

Equação 3-4

Onde:

- $\gamma_n$  – Peso específico natural do corpo de prova, em  $\text{kN/m}^3$ ;
- $M$  - Massa do corpo de prova, em  $\text{g}$ ;
- $V_i$  – Volume inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ .

### **Índice de vazios inicial do corpo de prova**

O índice de vazios inicial do corpo de prova pode ser calculado por meio da seguinte equação.

$$e_i = \frac{\rho}{\gamma_n \times 9,81} \times (1 + W_i) - 1$$

Equação 3-5

Onde:

- $\rho$  – Massa específica dos grãos do corpo de prova, em  $\text{g/cm}^3$ ;
- $\gamma_n$  – Peso específico natural do corpo de prova, em  $\text{kN/m}^3$ ;
- $W_i$  – Teor de umidade inicial do corpo de prova, em %; e
- $e_i$  – Índice de vazios inicial do corpo de prova.

A correta preparação da amostra é crucial para garantir a confiabilidade e precisão dos resultados do ensaio triaxial. Um bom ensaio começa, sem dúvida, com uma amostra bem-preparada (Briaud J. L., 2013).

### **Fase de saturação**

Antes do início do ensaio triaxial, a saturação da amostra é um passo essencial, garantindo que todos os poros estejam completamente preenchidos com água. Este processo é crucial para uma interpretação correta das pressões de poros durante o ensaio. A saturação é geralmente realizada aplicando-se uma pressão controlada de água na amostra, eliminando o ar contido nos poros. A técnica envolve a introdução de água de baixo para cima na célula triaxial, assegurando a remoção de bolhas de ar (Head K H, 1998).

O período necessário para a saturação varia conforme a permeabilidade do solo; solos granulares podem saturar rapidamente, enquanto solos argilosos podem requerer mais tempo (Robin Fell et al., 2005). A verificação do grau de saturação é comumente realizada pelo método de Skempton, utilizando o coeficiente de pressão de poros 'B'. A pressão de saturação aplicada é geralmente mais elevada que a pressão de confinamento subsequente, evitando-se pressões excessivas que possam causar consolidação ou alteração da estrutura do solo (Medzvieckas J. et al, 2004).

Durante a saturação, é importante usar água desaerada e manter constante a temperatura da água e da célula para evitar variações indesejadas na pressão de poros (Briaud J. L., 2013). A saturação adequada é vital para assegurar a confiabilidade dos resultados de pressão de poros durante a fase de ensaio não drenado.

Uma maneira comum de verificar a saturação é pelo método de Skempton, que avalia a variação da pressão de poros em relação à aplicação de uma pequena carga axial, através da determinação do parâmetro B de Skempton (Robin Fell et al., 2005), pela seguinte equação.

$$B = \frac{\Delta\sigma}{\Delta u}$$

Equação 3-6

Onde:

- $B$  é o parâmetro de Skempton.
- $\Delta u$  é a variação da pressão de poros.
- $\Delta \sigma$  é a variação da pressão total aplicada.

É importante mencionar que o valor de  $B$  varia entre 0 e 1,0. Para solos totalmente saturados sob condições de compressão isotrópica,  $B$  é geralmente próximo de 1,0, o que indica que quase toda a pressão aplicada é transferida para a água nos poros do solo. Em outras palavras, a pressão de poros aumenta quase que integralmente com o aumento da pressão total aplicada.

A fase de saturação é uma etapa meticulosa e vital no ensaio triaxial. A saturação adequada é crucial para medir corretamente a resistência ao cisalhamento e as respostas de deformação dos rejeitos, especialmente em situações não drenadas onde a presença de água influencia a poropressão e, por consequência, a estabilidade do material.

### **Fase de consolidação**

A fase de consolidação no ensaio triaxial é crucial para definir as condições iniciais de tensão e estrutura do solo antes da aplicação da carga axial. O principal objetivo dessa etapa é estabilizar a amostra sob uma pressão de confinamento específica, aplicando uma pressão hidrostática que leva à redução do volume do corpo de prova devido à expulsão de água dos poros (Das B. M., 1941). Durante este processo, a pressão é aplicada uniformemente em todas as direções, assegurando uma consolidação isotrópica (Head K H, 1998).

É essencial monitorar o volume de água expelido da amostra durante a consolidação, usando dispositivos como buretas. A quantidade de água liberada e a alteração do volume do corpo de prova indicam o grau de consolidação (Robin Fell et al., 2005). A duração da consolidação varia de acordo com o tipo de solo; solos argilosos podem requerer um tempo mais longo para consolidar completamente, enquanto solos granulares tendem a consolidar mais rapidamente (Briaud J. L., 2013).

Após alcançar um estado adequado de consolidação, a saída de água geralmente diminui ou para. Em certos casos, um período específico é estipulado para considerar a consolidação como completa, mesmo que ainda ocorra alguma saída de água (Medzvieckas J. et al, 2004).

Durante a consolidação, é fundamental manter condições constantes, como temperatura e pressão de confinamento, e assegurar que a amostra permaneça saturada para evitar variações nas condições de umidade (Das B. M., 1941). A variação de volume do corpo de prova é medida para calcular grandezas iniciais importantes.

A deformação volumétrica do corpo de prova, após a fase de adensamento, pode ser calculada com base na equação.

$$\varepsilon_{v_c} = \frac{\Delta v_c}{v_i} \quad \text{Equação 3-7}$$

Onde:

- $\varepsilon_{v_c}$  – Deformação volumétrica da fase de consolidação, em %;
- $\Delta v_c$  - Variação volumétrica da fase de consolidação, em  $\text{cm}^3$ ;
- $V_i$  – Volume inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ .

### **Altura final do corpo de prova após consolidação**

A altura final do corpo de prova, após da fase de consolidação, pode ser calculada com base na seguinte equação.

$$h_c = h_i \times \left(1 - \left(\frac{1}{3} \times \frac{\varepsilon_{v_c}}{100}\right)\right) \quad \text{Equação 3-8}$$

Onde:

- $h_c$  – Altura do corpo de prova após fase de consolidação, em cm;
- $h_i$  - Altura inicial do corpo de prova, em cm;
- $\varepsilon_{v_c}$  – Deformação volumétrica da fase de consolidação, em %.

### **Área final do corpo de prova após consolidação**

A área final do corpo de prova, após da fase de consolidação, pode ser calculada por meio da seguinte equação.

$$A_c = A_i \times \left(1 - \left(\frac{2}{3} \times \frac{\varepsilon_{v_c}}{100}\right)\right) \quad \text{Equação 3-9}$$

Onde:

- $A_c$  – Área do corpo de prova após fase de consolidação, em  $\text{cm}^2$ ;
- $A_i$  - Área inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^2$ ;
- $\varepsilon_{v_c}$  – Deformação volumétrica da fase de consolidação, em %.

### **Volume final do corpo de prova após consolidação**

O volume final do corpo de prova, após da fase de consolidação, pode ser calculada com base na seguinte equação.

$$V_c = V_i - \Delta v_c \quad \text{Equação 3-10}$$

Onde:

- $V_c$  – Volume do corpo de prova após fase de consolidação, em  $\text{cm}^3$ ;
- $V_i$  - Volume inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ ;
- $\Delta v_c$  - Variação volumétrica da fase de consolidação, em  $\text{cm}^3$ .

### **Índice de vazios final do corpo de prova após consolidação**

O índice de vazios final do corpo de prova, após da fase de consolidação, pode ser calculado com base na seguinte equação.

$$e_f = e_i - \left(\frac{\Delta v_c}{V_i} \times (1 + e_i)\right)$$

Equação 3-11

Onde:

- $e_f$  – Índice de vazios do corpo de prova, após fase de consolidação;
- $\Delta v_c$  - Variação volumétrica da fase de consolidação, em  $\text{cm}^3$ ;
- $V_i$  – Volume inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$
- $e_i$  – Índice de vazios inicial do corpo de prova.

A fase de consolidação prepara o espécime para o subsequente ensaio de cisalhamento, garantindo que ele esteja em um estado de tensão conhecido e controlado. Isso permite uma interpretação mais clara e precisa dos resultados do ensaio de cisalhamento.

### **Fase de cisalhamento**

A fase de cisalhamento é a etapa central do ensaio triaxial, crucial para avaliar o comportamento de cisalhamento do solo e determinar parâmetros como resistência ao cisalhamento e deformabilidade do material. Após as fases de saturação e consolidação, o corpo de prova é submetido a uma carga axial com a pressão de confinamento mantida constante. Durante esta fase, são monitorados e registrados os deslocamentos verticais e, se aplicável, as poropressões (Head K H, 1998).

O ponto de pico na curva tensão-deformação indica a resistência máxima ao cisalhamento da amostra. Além disso, a inclinação inicial da curva pode fornecer informações sobre a rigidez do solo (Robin Fell et al., 2005). Após atingir o pico, a amostra pode exibir um comportamento de amolecimento ou endurecimento, que é essencial para entender a resposta do solo em condições extremas (Briaud J. L., 2013).

Os dados obtidos são frequentemente representados em gráficos de tensão-deformação, e a realização de ensaios em diferentes pressões de confinamento permite traçar uma envoltória de ruptura, como a linha de Mohr-Coulomb, para determinar parâmetros como o intercepto coesivo e o ângulo de atrito do material (Das B. M., 1941). É importante notar que em solos argilosos, especialmente em ensaios não drenados (CIU), a poropressão gerada pode influenciar

significativamente a resistência ao cisalhamento, sendo usada para interpretar o comportamento do solo (Medzvieckas J. et al, 2004). As variáveis registradas durante a fase de cisalhamento incluem deslocamento vertical, força axial e poropressões. A partir destas leituras, somadas com as informações iniciais e após a fase de consolidação do corpo de prova, podemos obter mais resultados da fase de cisalhamento, sendo:

### **Deformação axial**

A deformação axial do corpo de prova, durante a fase de cisalhamento, pode ser calculada por meio da seguinte equação.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta_H}{h_c \times 100} \times 100 \quad \text{Equação 3-12}$$

Onde:

- $\varepsilon_a$  – Deformação axial durante a fase de cisalhamento, em %;
- $\Delta_H$  - Deslocamento vertical durante a fase de cisalhamento, em mm;
- $h_c$  – Altura do corpo de prova após fase de consolidação, em cm;

### **Força axial corrigida**

A força axial corrigida aplicada ao corpo de prova, durante a fase de cisalhamento, pode ser calculada com base na seguinte equação.

$$F_{corr} = F \times k \quad \text{Equação 3-13}$$

Onde:

- $F_{corr}$  – Força axial corrigida aplicada ao corpo de prova, durante a fase de cisalhamento, em kgf;
- $F$  - Força axial corrigida aplicada ao corpo de prova, registrada em mm;

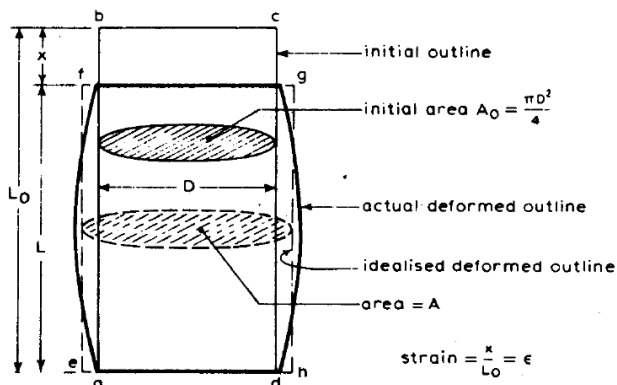
- $k$  – Constante a ser aplicada, sendo no caso da pesquisa de 0,1654 para tensões confinantes de 100 kPa e 200 kPa e de 0,30024 para tensões confinantes de 400 kPa e 800 kPa.

### Área corrigida

Quando um corpo de prova cilíndrico é comprimido por uma carga axial, seu comprimento diminui em relação ao seu comprimento inicial, o que é a deformação axial ( $\epsilon_a$ ). No ensaio não drenado (CIU), não é permitida a perda de água pelo corpo de prova, e estando o solo completamente saturado, considera-se tanto os grãos do solo como a água contida entre estes como incompressíveis, permanecendo, desta forma, o volume do espécime inalterado. Desta forma, o volume perdido com a perda de altura (deformação axial) deve aparecer em um aumento do diâmetro do corpo de prova. Esta é a razão para o “embarrigamento” do corpo de prova.

O aumento do diâmetro gera um aumento da área da seção transversal do corpo de prova, com uma conseqüente redução da tensão vertical. Desta forma uma correção, conhecida como “área corrigida”, deve ser aplicada na obtenção da tensão desviadora, como demonstrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Correção de área do ensaio triaxial.



Fonte: Adaptado de Head K H (1994).

A área transversal corrigida do corpo de prova, durante a fase de cisalhamento, pode ser calculada com base na seguinte equação.

$$A_{corr} = \frac{A_i}{1-\varepsilon_a} \quad \text{Equação 3-14}$$

Onde:

- $A_{corr}$  – Área corrigida do corpo de prova, durante a fase de cisalhamento, em  $\text{cm}^2$ ;
- $\varepsilon_a$  – Deformação axial do corpo de prova, durante a fase de cisalhamento, em %;
- $A_i$  – Área inicial do corpo de prova, em  $\text{cm}^2$ .

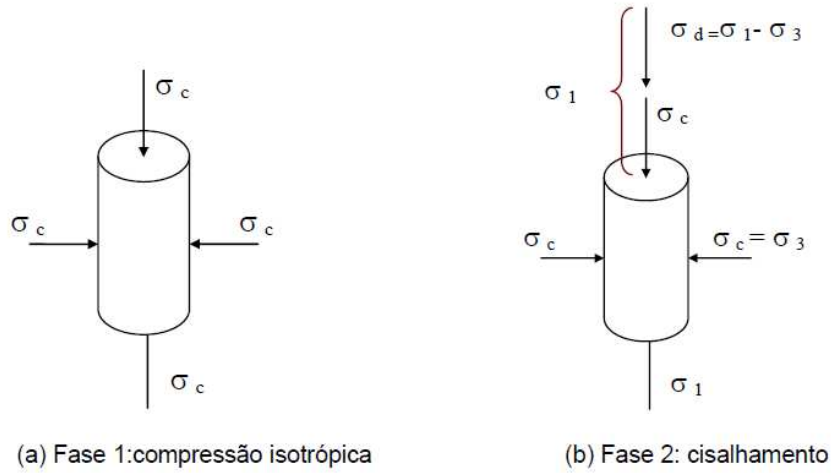
Caso a deformação for expressa axial em porcentagem, a equação acima, deve ser escrita da seguinte maneira.

$$A_{corr} = \frac{100 \times A_i}{100 - \varepsilon_a} \quad \text{Equação 3-15}$$

### **Tensão desviadora**

No ensaio triaxial CIU uma amostra cilíndrica de solo é submetida a condições controladas de tensão, sendo a tensão de confinamento e a tensão axial ou desviadora (Medzvieckas J. et al, 2004), conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 – Tensões do ensaio triaxial.



Fonte: Adaptado de Gerscovich D. (2010).

Conforme descrito por Robin Fell et al. (2005), a tensão desviadora, pode ser definida pela seguinte equação.

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

Equação 3-16

Onde:

- $\sigma_d$  – Tensão desviadora, em kPa;
- $\sigma_1$  – Tensão principal, em kPa;
- $\sigma_3$  – Tensão secundária, em kPa.

### Poropressão

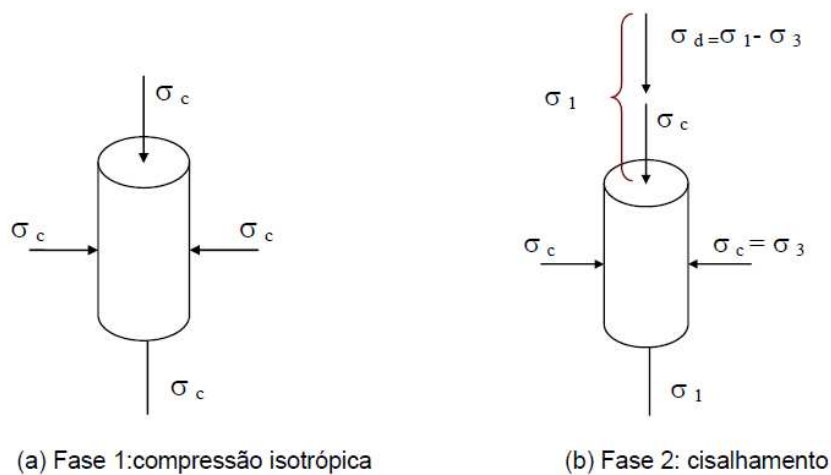
Nos ensaios triaxiais adensados e não drenados (CIU) não é permitida a saída de água do corpo de prova, uma vez que a válvula de drenagem é mantida fechada, durante o ensaio. Uma vez que o corpo de prova foi completamente saturado previamente, não há variação de volume durante a fase de cisalhamento.

Entretanto, com o aumento das tensões cisalhantes, devido ao carregamento axial realizado, ocorre um aumento das poropressões, e, conseqüentemente, uma diferença entre as tensões efetivas e tensões totais (HEAD K. H., 1998). O ensaio deve ser realizado com uma velocidade que permita a equalização das variações das poropressões no corpo de prova quando a ruptura for atingida. Uma vez que as poropressões são medidas na base do corpo de prova, se a velocidade do ensaio for muito alta, tais medidas não serão representativas das condições da porção medial do corpo de prova, onde as tensões cisalhantes são mais significantes (HEAD K. H., 1998).

### Tensão principal efetiva

Como apresentado na Figura 3.7, a tensão principal ( $\sigma_1$ ) é a soma da tensão confinante ( $\sigma_3$ ) com a tensão desviadora ( $\sigma_d$ ), no caso de tensões totais. Já no caso de tensões efetivas, deve se descontar das tensões totais, as poropressões medidas durante a fase de cisalhamento.

Figura 3.7 – Tensões do ensaio triaxial.



Fonte: Adaptado de Gerscovich D. (2010).

Desta forma a tensão principal efetiva, pode ser definida pela seguinte equação.

$$\sigma'_1 = \sigma_3 + \sigma_d - u$$

Equação 3-17

Onde:

- $\sigma_d$  – Tensão desviadora total, em kPa;
- $\sigma'_1$  – Tensão principal efetiva, em kPa;
- $\sigma_3$  – Tensão secundária total, em kPa;
- $u$  – Poropressão, em kPa;

### **Tensão secundária efetiva**

Analogamente, a tensão secundária efetiva ( $\sigma'_3$ ) é igual à tensão confinante ( $\sigma_3$ ) subtraída da poropressão ( $u$ ).

Desta forma a tensão secundária efetiva, pode ser definida pela seguinte equação.

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Equação 3-18

Onde:

- $\sigma'_3$  – Tensão secundária efetiva, em kPa;
- $\sigma_3$  – Tensão secundária total, em kPa;
- $u$  – Poropressão, em kPa;

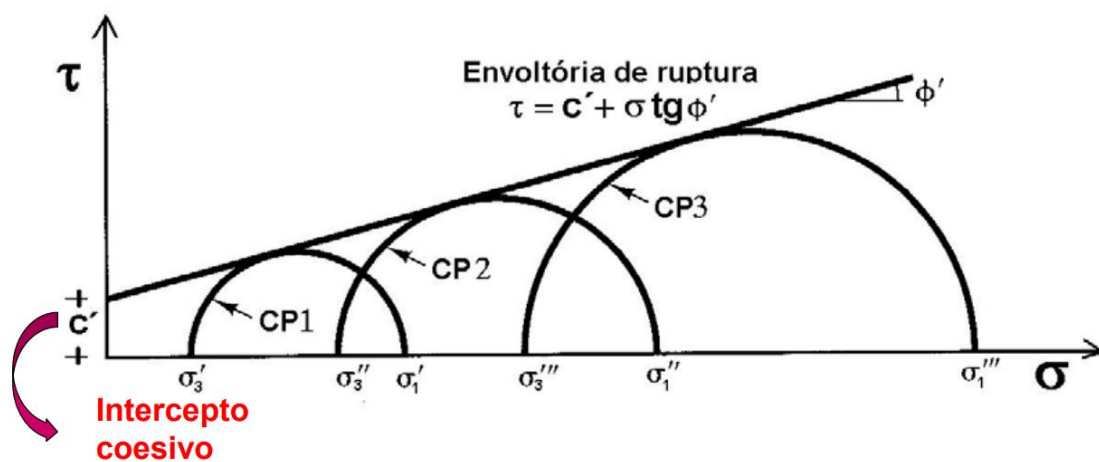
### **Envoltória de resistência**

As trajetórias de tensão e a envoltória de resistência são fundamentais para entender o comportamento de cisalhamento dos solos e determinar os parâmetros geotécnicos críticos, como o ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo. Aqui está uma descrição detalhada destes componentes com base nas referências fornecidas:

Envoltória de Resistência: A envoltória de resistência é uma linha (ou curva) que representa as combinações máximas de tensões normais e de cisalhamento que um solo pode suportar sem falhar.

- Em termos práticos, a envoltória é formada pelos pontos de tangência dos Círculos de Mohr que representam a resistência máxima do solo em diferentes pressões de confinamento (Das B. M., 1941).
- A linha mais comumente usada para representar a envoltória de resistência é a linha de Mohr-Coulomb, conforme Figura 3.8.

Figura 3.8 – Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb.



Fonte: Adaptado de Douglas M. A. Bittencourt: Notas de aula.

Tem-se então que a resistência, segundo a envoltória de Mohr-Coulomb, é formada por duas parcelas, sendo uma dependente da tensão normal (ângulo de atrito) e a outra não (intercepto coesivo).

A envoltória de Mohr-Coulomb, pode ser definida pela seguinte equação.

$$\tau = c + \sigma' \tan(\varphi) \quad \text{Equação 3-19}$$

Onde:

- $\tau$  – Resistência ao cisalhamento, em kPa;
- $c$  – Intercepto coesivo, em kPa;
- $\varphi$  – Ângulo de atrito, em graus;

- $\sigma'$  – Tensão normal efetiva, em kPa.

#### **Determinação dos Parâmetros de Resistência:**

- Coesão ( $c$ ): Este parâmetro é o intercepto da envoltória de resistência com o eixo de cisalhamento ( $\tau$ ). Em outras palavras, representa a resistência ao cisalhamento do solo na ausência de tensão normal.
- Ângulo de Atrito Interno ( $\phi$ ): Representa a inclinação da envoltória de resistência. É determinado medindo o ângulo entre a envoltória e o eixo de tensão normal (Medzvieckas J. et al, 2004).

#### **Considerações Adicionais:**

O ensaio triaxial fornece uma série de círculos de Mohr, cada um representando um estado diferente de tensão. A envoltória de resistência é uma ferramenta essencial para determinar a capacidade de carga de um solo sob diferentes condições (Robin Fell et al., 2005).

Para solos não coesivos, como areias, a coesão efetiva é muitas vezes considerada zero, e a resistência é governada principalmente pelo ângulo de atrito interno.

#### **Trajetórias de tensão**

Durante o ensaio triaxial, a amostra é submetida a diferentes níveis de tensão. As trajetórias de tensão representam as combinações de tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) atuantes na amostra ao longo do ensaio (Robin Fell et al., 2005).

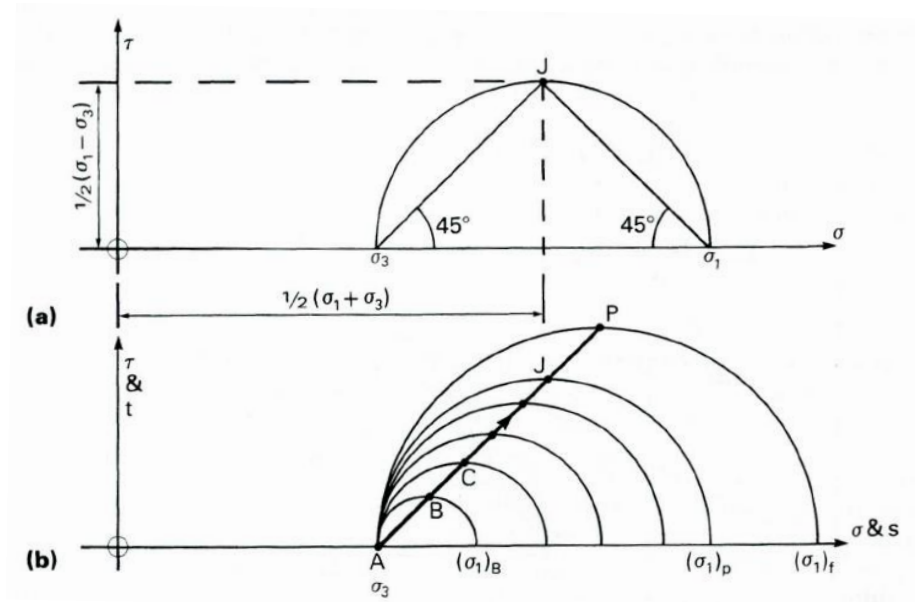
No espaço bidimensional, as trajetórias de tensão são comumente representadas nos Círculos de Mohr. A cada incremento de carga ou deformação, um novo círculo de Mohr é formado, e a trajetória é a linha que conecta os centros desses círculos (HEAD K. H., 1998).

O entendimento das trajetórias de tensão e das envoltórias de resistência pode ser facilitado utilizando diferentes representações gráficas. Em geotecnia, duas abordagens amplamente reconhecidas são os diagramas  $p'-q$  e  $s'-t$ . Cada uma dessas abordagens oferece uma perspectiva única sobre o comportamento de tensão-deformação do solo.

### Diagrama $s'-t$ (MIT):

Este diagrama é frequentemente associado ao Massachusetts Institute of Technology (MIT), tendo sido desenvolvido por Lambe (Lambe et al, 1969), conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Diagrama  $s'-t$  (MIT).



Fonte: Adaptado de HEAD K. H. (1998).

No eixo horizontal ( $s'$ ), representa-se a tensão média, que é a média das tensões principais, definida pela seguinte equação:

$$s' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \text{Equação 3-20}$$

No eixo vertical ( $t$ ), mostra-se a amplitude da tensão, definida pela seguinte equação.

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{Equação 3-21}$$

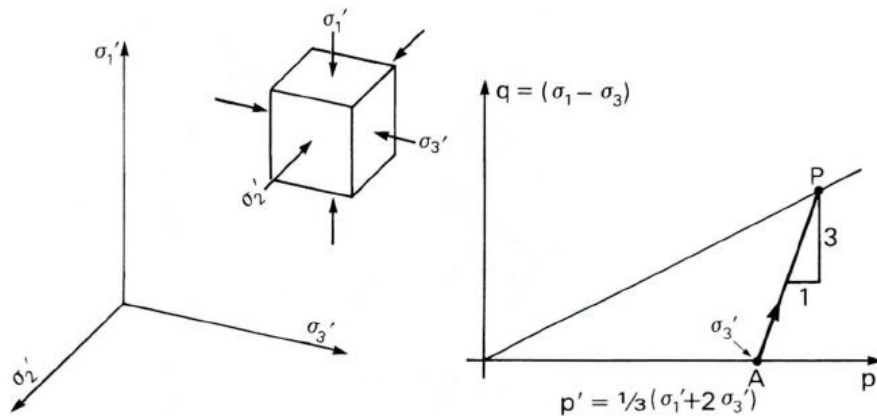
As trajetórias de tensão neste diagrama mostram a evolução da pressão média e da amplitude da tensão conforme a amostra é cisalhada (HEAD K. H., 1998).

A envoltória de resistência no espaço  $s'-t$  é uma representação das combinações máximas de  $s'$  e  $t$  que o solo pode suportar sem romper.

### Diagrama $p'$ - $q$ (Cambridge):

Este diagrama é frequentemente associado à escola de Cambridge, tendo sido desenvolvido por Wroth (Wroth et al, 1964), conforme apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Diagrama  $p'$ - $q$  (Cambridge)



Fonte: Adaptado de HEAD K. H. (1998).

No eixo horizontal ( $p'$ ), representa-se a tensão octaédrica, que é a soma das três tensões atuantes no corpo de prova, divididas por três. Como o ensaio analisado é axissimétrico, as tensões secundárias são iguais, sendo  $p'$  definido pela seguinte equação:

$$p' = \frac{\sigma_1' + 2\sigma_3'}{3} \quad \text{Equação 3-22}$$

No eixo vertical ( $q$ ), mostra-se a diferença entre a tensão principal e a tensão secundária, definida pela seguinte equação.

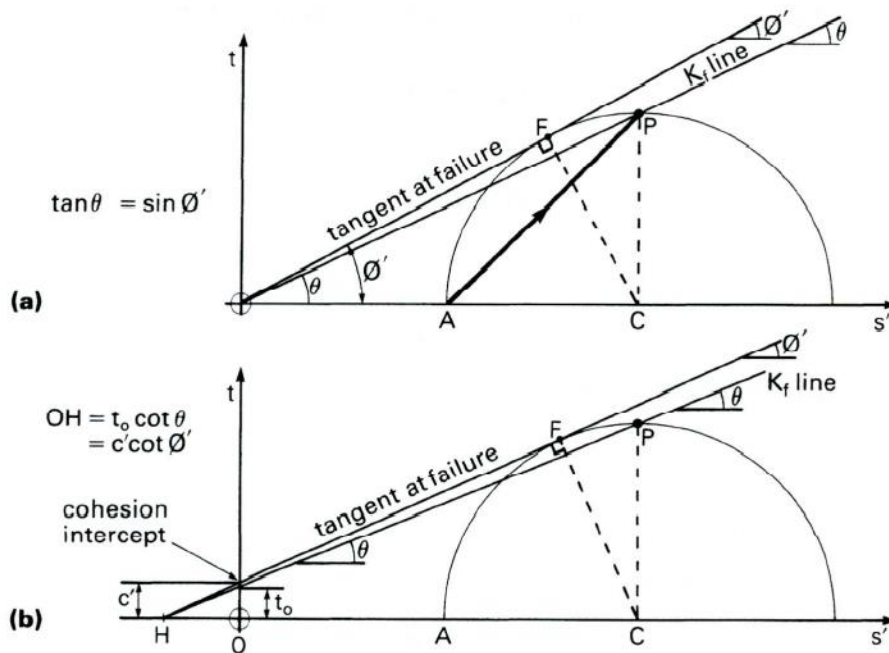
$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Equação 3-23}$$

A escolha entre as duas representações muitas vezes depende da tradição geotécnica da região ou instituição, bem como das especificidades do problema geotécnico em questão. Em algumas situações, pode-se usar ambas as representações para obter uma compreensão mais completa do comportamento do solo (Briaud J. L., 2013).

Concluindo, tanto o diagrama  $p'$ - $q$  quanto o  $s'$ - $t$  oferecem valiosas perspectivas sobre o comportamento de cisalhamento dos solos. A compreensão e a interpretação corretas destes gráficos são essenciais para uma análise geotécnica robusta.

No presente trabalho, optou-se por utilizar a metodologia do MIT, ou seja, o diagrama  $s'$ - $t$ . A interpretação dos parâmetros de resistência, a partir deste diagrama, pode ser definida pela figura abaixo. A Figura 11(a) representa a obtenção dos parâmetros de resistência, quando não há intercepto coesivo e a Figura 11(b) representa a obtenção dos parâmetros de resistência, quando há intercepto coesivo.

Figura 3.11 – Determinação dos parâmetros de resistência através da linha  $k_f$ .



Fonte: Adaptado de HEAD K. H. (1998).

Os parâmetros de resistência  $c$  (intercepto coesivo) e  $\varphi$  (ângulo de atrito), através da linha  $k_f$ , podem ser obtidos pelas seguintes equações.

$$\tan \theta = \sin \varphi$$

Equação 3-24

Onde:

- $\theta$  – Ângulo da reta  $k_f$  com a horizontal, em graus;
- $\varphi$  – Ângulo de atrito, em graus.

$$c' = \frac{t_0}{\cos \varphi}$$

Equação 3-25

Onde:

- $c'$  – Intercepto coesivo, em kPa;
- $\varphi$  – Ângulo de atrito, em graus;
- $t_0$  – Intercepto da linha  $k_f$ , com o eixo vertical.

### Parâmetro A de Skempton

Skempton introduziu um parâmetro que correlaciona a poropressão e a tensão desviadora aplicada em ensaios triaxiais não drenados. Este parâmetro, conhecido como parâmetro  $A$  de Skempton, tem desempenhado um papel crucial no entendimento e na previsão do comportamento de solos saturados quando submetidos a carregamentos não drenados (Robin Fell et al., 2005).

O parâmetro  $A$  pode ser definido pela seguinte equação.

$$A = u - \sigma d \quad \text{Equação 3-26}$$

Onde:

- $u$  – Poropressão, em kPa;
- $\sigma d$  – Tensão desviadora, em kPa;

A magnitude do parâmetro  $A$  fornece informações valiosas sobre o comportamento dos solos sob condições não drenadas:

- Um valor de  $A$  próximo de 1 sugere que quase toda a carga aplicada é absorvida pela água dos poros, levando a uma poropressão elevada. Isso é frequentemente observado em argilas sensíveis e de baixa permeabilidade (Das B. M., 1941).
- Valores de  $A$  próximos de 0 indicam que a carga é majoritariamente transferida para a estrutura sólida do solo. Tal comportamento é típico de solos mais permeáveis ou que não estão completamente saturados.

O parâmetro  $A$  é, portanto, um indicativo da suscetibilidade do solo à geração de poropressões sob carregamento e, conseqüentemente, à potencial instabilidade sob condições não drenadas (Briaud J. L., 2013).

Na prática geotécnica, o parâmetro  $A$  é frequentemente utilizado para:

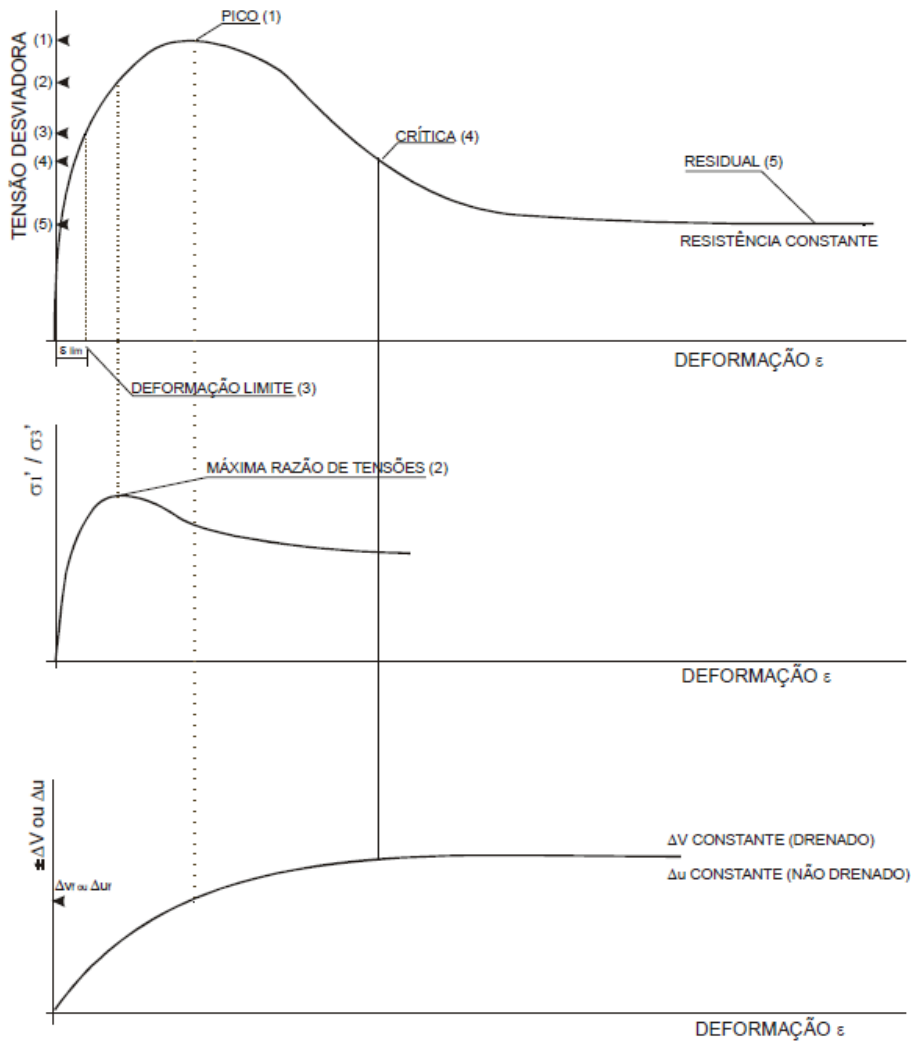
- Prever a variação da poropressão durante carregamentos rápidos, como em ensaios de campo ou durante eventos sísmicos;
- Avaliar a suscetibilidade dos solos à liquefação, especialmente em regiões propensas a eventos sísmicos.

### **Determinação de ruptura para ensaios triaxiais**

Diferentes métodos podem ser usados para caracterizar rupturas com base nas curvas de tensão x deformação. A Figura 3.12 a seguir destaca vários critérios que podem ser considerados:

- (1) tensão máxima;
- (2) proporção máxima das tensões principais;
- (3) deformação máxima;
- (4) ponto em que, após alcançado, as deformações se tornam nulas;
- (5) resistência após a ruptura.

Figura 3.12 – Critérios de ruptura para solos.



Fonte: Adaptado de Gerscovich D. (2010).

Conforme destacado por Gerscovich (2010), o pico da curva tensão-deformação é um critério frequentemente associado à ruptura de amostras. No entanto, nem todas as curvas mostram um pico claro, necessitando de um critério de ruptura alternativo. A escolha do critério apropriado pode ser complexa.

Alguns materiais apresentam um endurecimento progressivo, e a ruptura não é facilmente identificável na curva tensão-deformação. Nestes casos, o critério de deformação pode ser aplicado, embora possa ser desafiador, uma vez que aumentos na deformação frequentemente resultam em resistências mais altas. (Campos e Carrillo 1995), propuseram um critério baseado na inclinação da curva tensão-deformação. De acordo com estes autores, a ruptura ocorre

quando esta inclinação se mantém constante, e a tensão de cisalhamento na ruptura seria identificada no ponto onde essa inclinação constante é observada.

Para solos que tendem a sofrer deformações significativas, o critério da resistência residual após a ruptura é recomendado. Alternativamente, o critério de deformação limite pode ser mais adequado.

### **Gráficos a serem gerados em ensaios triaxiais**

Com base no exposto nos itens acima, devem ser gerados diversos gráficos, exemplificados na Figura 3.13, para interpretação de ensaios triaxiais não drenados (CIU), conforme exemplo apresentado na figura a seguir.

#### **Tensão Desviadora x Deformação Axial**

Este gráfico é usado para visualizar a relação entre a tensão desviadora (diferença entre a tensão principal maior e a menor) e a deformação axial do corpo de prova.

- Eixo X: Deformação Axial, em %;
- Eixo Y: Tensão Desviadora, em kPa.

Interpretação: Uma curva ascendente mostra um aumento da resistência do solo com o aumento da deformação. O ponto de inflexão ou o pico da curva indica a tensão de ruptura.

#### **Variação da Poropressão x Deformação Axial**

Este gráfico tem como objetivo avaliar como a poropressão no solo muda com a deformação axial.

- Eixo X: Deformação Axial, em %;
- Eixo Y: Variação da Poropressão, em kPa.

Interpretação: Em ensaios não drenados, o aumento da poropressão pode indicar uma tendência de mobilização de carregamento não drenado do solo.

### **Razão de Tensões x Deformação Axial**

Este gráfico tem como objetivo comparar a proporção máxima das tensões principais à medida que a deformação axial ocorre.

- Eixo X: Deformação Axial, em %;
- Eixo Y: Máxima Razão de Tensões, em kPa.

Interpretação: Este gráfico ajuda a definir o ponto de ruptura do material, em solos que não apresentam pico no gráfico de Tensão Desviadora x Deformação Axial.

### **Diagrama $s'$ x $t$**

Objetivo: Representar a trajetória de tensões,  $s'$  -  $t$ .

Eixo X:  $s' = [\sigma'1 + \sigma'3]/2$ , em kPa

Eixo Y:  $t = [\sigma'1 - \sigma'3]$ , em kPa

Interpretação: Fornece as trajetórias de tensões, permitindo definir as envoltórias de resistência mais apropriadas. Podem ser obtidas envoltórias de resistência pela máxima obliquidade, pela máxima obliquidade, pelo estado crítico, ou mesmo manualmente, tangenciando as trajetórias de tensão.

### **Parâmetro A de Skempton x Deformação Axial**

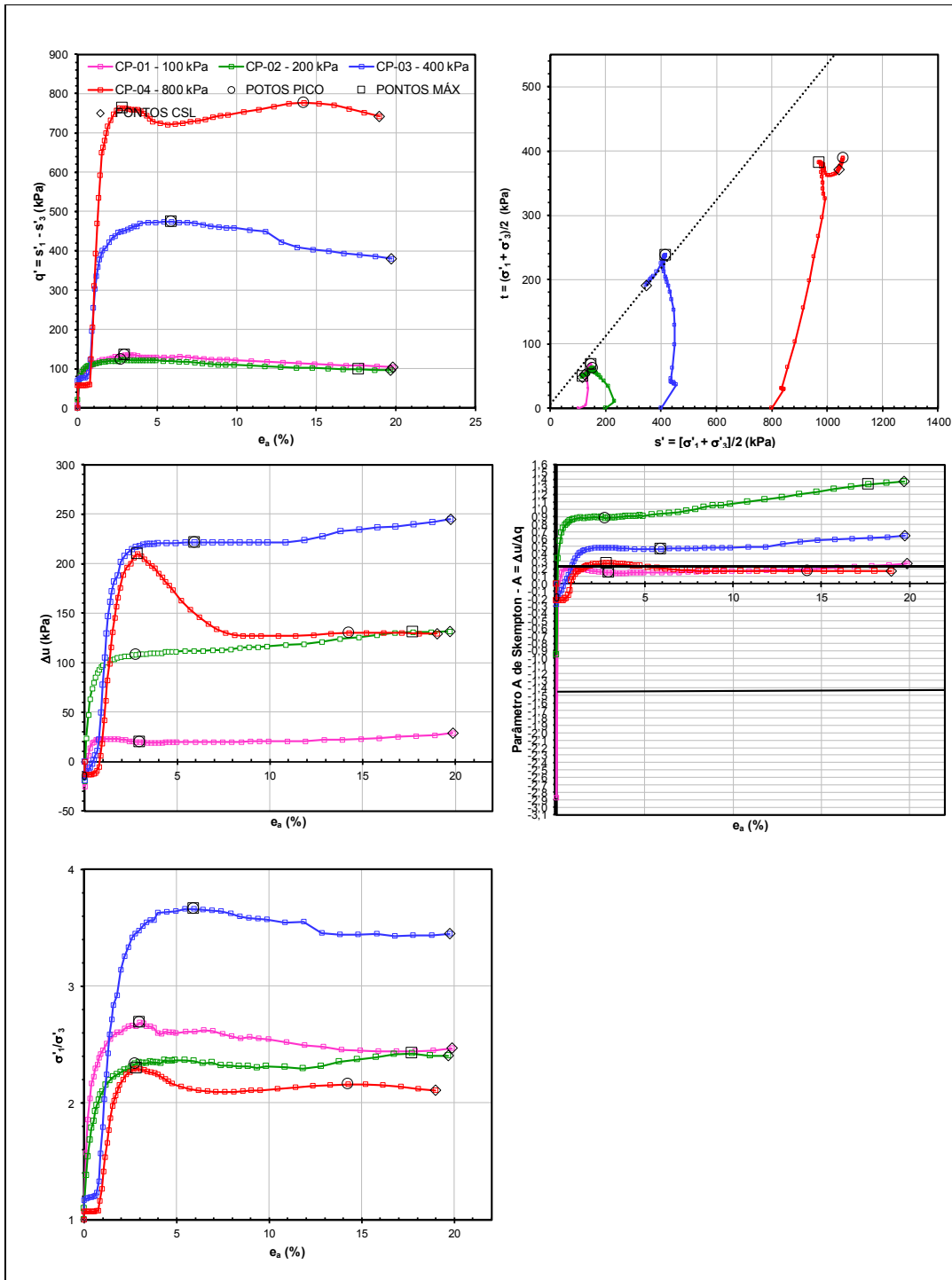
Analisar a relação entre o parâmetro A de Skempton (que se refere à relação entre a mudança na pressão dos poros e a mudança na tensão total aplicada) e a deformação axial.

Eixo X: Deformação Axial, em %

Eixo Y: Parâmetro A de Skempton, adimensional.

Interpretação: Este gráfico é vital para avaliar a resposta do solo em termos de variação da pressão dos poros durante a deformação axial.

Figura 3.13 – Gráficos a serem gerados a partir de dados obtidos em ensaio triaxial CIU. (a) Tensão Desviadora x Deformação Axial; (b) Variação da Poropressão x Deformação Axial; (c) Razão de Tensões x Deformação Axial; (d) Diagrama  $s'$  x  $t$ ; (e) Parâmetro A de Skempton x Deformação Axial.



Fonte: Autor

O ensaio triaxial CIU é fundamental para entender e prever o comportamento geotécnico dos rejeitos, incluindo os de minério de ferro. Esse ensaio auxilia na avaliação de vários aspectos importantes:

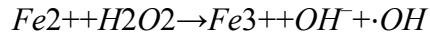
1. **Resistência ao Cisalhamento:** O ensaio CIU permite determinar a resistência ao cisalhamento dos rejeitos, essencial para avaliar a estabilidade de taludes e barragens de rejeitos.
2. **Deformabilidade:** A análise da deformabilidade dos rejeitos sob diferentes tensões confinantes ajuda a prever como esses materiais se comportarão sob cargas variadas, crucial para o dimensionamento de estruturas de contenção.
3. **Potencial de Liquefação:** Ao avaliar a resposta dos rejeitos sob condições de carregamento não drenado, é possível identificar a suscetibilidade à liquefação, um fator crítico para a segurança de barragens de rejeitos em zonas sísmicas.
4. **Efeitos da Oxidação:** O ensaio triaxial CIU também permite estudar o impacto da oxidação na resistência e na deformabilidade dos rejeitos, ajudando a desenvolver estratégias de manejo que considerem as mudanças químicas e físicas ao longo do tempo.

Em resumo, o ensaio triaxial CIU é uma metodologia crucial na geotecnia, essencial para entender o comportamento dos rejeitos de minério de ferro em diferentes condições. A preparação cuidadosa da amostra e a execução precisa do ensaio fornecem dados valiosos que influenciam diretamente as decisões em projetos de engenharia, garantindo a integridade e a sustentabilidade das estruturas de disposição de rejeitos.

### **3.8. Peróxido de hidrogênio e a oxidação de metais**

O peróxido de hidrogênio não é apenas versátil em suas aplicações domésticas e industriais, mas também desempenha um papel fundamental na oxidação de metais, particularmente o ferro. O ferro, como um metal de transição, possui uma propensão natural para oxidar, especialmente na presença de agentes oxidantes como o  $H_2O_2$ .

Quando o ferro entra em contato com o  $H_2O_2$ , uma série de reações redox pode ocorrer. Em condições ácidas, o peróxido de hidrogênio pode oxidar o ferro metálico ( $Fe^0$ ) ou o íon ferroso ( $Fe^{2+}$ ), levando à formação do íon férrico ( $Fe^{3+}$ ). Essa reação é conhecida como a reação de Fenton e pode ser descrita da seguinte forma:



Onde  $\cdot OH$  é o radical hidroxila, uma espécie altamente reativa.

Este radical hidroxila gerado é notável por sua alta reatividade e pode desencadear reações secundárias, incluindo a oxidação de compostos orgânicos. Isso torna a reação de Fenton uma ferramenta valiosa para o tratamento de águas residuais, uma vez que ajuda na degradação de poluentes orgânicos.

A oxidação do ferro pelo  $H_2O_2$  não é apenas uma reação química simples, mas uma série complexa de reações que podem ser influenciadas por fatores como PH, concentração de  $H_2O_2$  e a presença de catalisadores. Em condições favoráveis, a rápida formação do íon férrico pode levar à formação de hidróxidos férricos, que se precipitam como óxidos de ferro, como a ferrugem.

No contexto da corrosão, o peróxido de hidrogênio pode acelerar o processo de oxidação do ferro, levando à formação de produtos de corrosão como o óxido de ferro (III) hidratado. Esta propriedade oxidativa do  $H_2O_2$  enfatiza a necessidade de manipulá-lo com cuidado, especialmente quando em contato com estruturas metálicas.

### **Interpretação do Comportamento Geotécnico dos Rejeitos de Ferro**

A interação do peróxido de hidrogênio com os rejeitos de minério de ferro é essencial para entender como esses materiais se comportam em diferentes condições geotécnicas. Aqui estão algumas maneiras pelas quais esse ensaio auxilia na interpretação do comportamento geotécnico dos rejeitos de ferro:

1. **Alteração das Propriedades Físicas:** A oxidação dos rejeitos de ferro pelo  $H_2O_2$  pode alterar suas propriedades físicas, como densidade e porosidade. A formação de óxidos de ferro pode aumentar a porosidade, afetando a estabilidade e a capacidade de suporte dos rejeitos.
2. **Influência na Resistência ao Cisalhamento:** A presença de óxidos de ferro pode influenciar a resistência ao cisalhamento dos rejeitos. Rejeitos oxidados podem ter uma resistência diferente em comparação com rejeitos não oxidados, o que é crucial para avaliar a estabilidade das estruturas de disposição de rejeitos.

3. **Permeabilidade e Drenagem:** A oxidação pode afetar a permeabilidade dos rejeitos de minério de ferro. Rejeitos mais porosos devido à formação de óxidos podem ter uma maior permeabilidade, o que pode impactar o comportamento hidráulico e a drenagem das estruturas de rejeitos.
4. **Suscetibilidade à Corrosão:** A presença de  $H_2O_2$  pode acelerar a corrosão de componentes metálicos nas estruturas de disposição de rejeitos, aumentando o risco de falhas estruturais. Entender a interação entre  $H_2O_2$  e ferro é vital para desenvolver estratégias de mitigação eficazes.

Em resumo, a interação do peróxido de hidrogênio com os rejeitos de minério de ferro destaca o potencial oxidativo do  $H_2O_2$  e a importância de compreender essas reações. Esse entendimento é crucial para a prática geotécnica moderna, ajudando a garantir a integridade e a sustentabilidade de projetos de disposição de rejeitos, minimizando os riscos ambientais e melhorando as práticas de gestão de rejeitos.

### **3.9. Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia de dispersão de energia (EDS)**

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é uma ferramenta altamente sofisticada e versátil na caracterização de materiais. Seu funcionamento inicia-se com a emissão termoiônica de elétrons a partir de um filamento metálico, usualmente tungstênio ou outro material de alta emissividade. Esses elétrons são então acelerados e focados em um feixe estreito que varre a superfície da amostra.

A interação entre o feixe de elétrons e a amostra produz uma série de sinais, que incluem elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios X característicos, entre outros. Estes sinais podem ser coletados e interpretados para produzir imagens de alta resolução da superfície da amostra e para obter informações qualitativas e quantitativas sobre sua composição.

Um aspecto crucial do MEV é sua capacidade de analisar não apenas a morfologia, mas também a composição química de uma amostra. A Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) é uma técnica que se beneficia dos raios X emitidos pela amostra durante a análise com o MEV.

Os átomos da amostra são excitados pelo feixe de elétrons, fazendo com que os elétrons internos sejam ejetados de suas órbitas. Quando elétrons de camadas superiores preenchem essas

lacunas, raios X são emitidos. Esses raios X têm energias específicas que são característicos para cada elemento. Ao analisar a energia destes raios X, é possível determinar quais elementos estão presentes na amostra e em que quantidades.

O analisador de raios X acoplado ao MEV é um componente essencial para a técnica EDS. Ele permite que as frequências da radiação liberadas no espectro do raio X sejam analisadas, traduzindo-as em picos em um espectro de energia versus intensidade. Estes picos são então identificados e atribuídos aos elementos químicos correspondentes.

Juntas, as técnicas MEV e EDS fornecem uma análise detalhada não só da morfologia de uma amostra, mas também de sua composição química, tornando-as indispensáveis em campos como a pesquisa em ciência dos materiais, biologia, geologia, entre outros.

A utilização das técnicas MEV e EDS na análise de rejeitos de minério de ferro é importante para entender seu comportamento geotécnico. Dentre as maneiras pelas quais essas técnicas auxiliam na interpretação, lista-se:

1. **Análise da Morfologia:** O MEV fornece imagens detalhadas da microestrutura dos rejeitos de ferro. Compreender a morfologia ajuda a avaliar como as partículas se agregam e interagem, influenciando diretamente a estabilidade e a permeabilidade do material.
2. **Identificação de Fases Mineraias:** A EDS permite identificar e quantificar os diferentes elementos presentes nos rejeitos. Essa informação é vital para determinar as fases mineraias, que afetam as propriedades mecânicas e químicas dos rejeitos.
3. **Estudo de Produtos de Oxidação:** O MEV combinado com EDS pode ser usado para estudar a formação de óxidos e outros produtos de corrosão nos rejeitos de ferro. Isso é particularmente importante para avaliar o impacto da oxidação no comportamento geotécnico dos rejeitos, como a alteração na resistência ao cisalhamento.

Em resumo, as técnicas de MEV e EDS são indispensáveis para uma análise detalhada dos rejeitos de minério de ferro. Elas fornecem dados essenciais sobre a morfologia e composição química dos rejeitos, auxiliando na previsão de seu comportamento geotécnico. Isso contribui para o desenvolvimento de soluções de engenharia mais seguras e eficazes para a disposição e manejo de rejeitos, minimizando os riscos ambientais e melhorando as práticas de gestão.

### 3.10. Identificação da oxidação de amostras de rejeito de minério de ferro através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A oxidação de amostras de rejeito de minério de ferro representa um desafio significativo em termos de controle ambiental e conservação de recursos minerais. Este item descreve o emprego do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) como ferramenta analítica para a identificação e quantificação de processos oxidativos em amostras de rejeito de minério de ferro.

A identificação da oxidação em amostras de rejeito de minério de ferro é crucial para a gestão eficaz e sustentável desses materiais, principalmente quando se considera a estabilidade a longo prazo e o impacto ambiental das estruturas de disposição de rejeitos. A oxidação pode significativamente alterar as propriedades físicas e químicas dos rejeitos, influenciando sua reatividade, permeabilidade e a integridade estrutural dos depósitos. Neste contexto, o MEV emerge como uma ferramenta analítica essencial, permitindo não apenas a identificação, mas também a quantificação precisa dos processos oxidativos nos rejeitos.

Os rejeitos de minério de ferro, quando expostos ao ar e à umidade, passam por processos de oxidação que podem levar à formação de óxidos de ferro, como a hematita e a goethita. Esses processos alteram a composição mineralógica dos rejeitos, o que pode ter implicações significativas para sua estabilidade geotécnica e seu impacto ambiental.

A oxidação pode causar uma série de mudanças nas propriedades dos rejeitos, incluindo:

- **Permeabilidade:** A formação de óxidos de ferro pode aumentar a porosidade dos rejeitos, o que pode levar a uma maior permeabilidade. Isso pode influenciar o comportamento hidráulico das barragens de rejeitos, aumentando o risco de infiltração de água e possíveis falhas estruturais.
- **Reatividade Química:** Rejeitos oxidados podem apresentar maior reatividade química, o que pode levar à formação de ácidos e à liberação de metais pesados no ambiente. Esse fenômeno, conhecido como drenagem ácida de mina (DAM), é uma das principais preocupações ambientais associadas aos rejeitos de mineração.
- **Estabilidade Estrutural:** A oxidação pode enfraquecer a estrutura dos rejeitos, reduzindo sua resistência ao cisalhamento e aumentando o risco de deslizamentos e colapsos das barragens de rejeitos.

O MEV permite a visualização detalhada da microestrutura dos rejeitos, destacando as mudanças causadas pela oxidação em nível microscópico. Essa análise é fundamental para entender como a oxidação afeta a estabilidade dos rejeitos, possibilitando o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para seu manejo e armazenamento.

Através do MEV, é possível identificar e quantificar as diferentes fases minerais presentes nos rejeitos. A técnica permite detectar a presença de óxidos de ferro e outras fases secundárias formadas durante a oxidação. Isso é crucial para entender a extensão dos processos oxidativos e suas implicações para a estabilidade e a reatividade dos rejeitos.

Os dados obtidos através do MEV podem ser utilizados para desenvolver estratégias de gestão mais eficazes para os rejeitos de minério de ferro. A seguir estão algumas das principais aplicações dessa análise:

A identificação de áreas com maior grau de oxidação pode indicar a necessidade de medidas de controle específicas, como:

- **Melhorias na Cobertura dos Rejeitos:** Aplicar coberturas que minimizem a exposição ao oxigênio e à umidade pode retardar os processos oxidativos, melhorando a estabilidade dos rejeitos.
- **Alterações nas Técnicas de Disposição:** Ajustar as técnicas de disposição para reduzir a exposição dos rejeitos a condições que favorecem a oxidação pode ser uma estratégia eficaz para minimizar os riscos associados.

O MEV pode auxiliar na avaliação da eficácia de aditivos ou tratamentos aplicados aos rejeitos para retardar ou impedir processos oxidativos. Por exemplo, a aplicação de inibidores de corrosão ou de agentes estabilizantes pode ser monitorada através do MEV para verificar a formação de óxidos e outros produtos de corrosão.

Implementar um programa de monitoramento contínuo utilizando o MEV pode ajudar a detectar precocemente mudanças na microestrutura dos rejeitos, permitindo a intervenção rápida e eficaz para prevenir problemas maiores. O monitoramento regular pode identificar tendências e padrões de oxidação, fornecendo dados valiosos para a gestão proativa dos rejeitos.

A utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) na identificação e quantificação da oxidação em amostras de rejeito de minério de ferro é uma abordagem que pode fornecer dados importantes para a gestão sustentável desses materiais. Conforme demonstrado, o MEV

fornece uma análise detalhada da microestrutura e composição química dos rejeitos, permitindo a identificação precisa das mudanças causadas pela oxidação. Essas informações podem ser úteis para desenvolver estratégias de manejo que garantam a estabilidade e a segurança das estruturas de disposição de rejeitos, minimizando os riscos ambientais e otimizando as práticas de gestão.

Portanto, a integração do MEV na análise dos rejeitos de minério de ferro representa um avanço significativo na geotecnia e na engenharia ambiental, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e para a proteção do meio ambiente.

#### **4. METODOLOGIA**

Este capítulo apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento da coleta de amostras, do desenvolvimento dos ensaios de laboratório e do resultado dos ensaios.

Com o objetivo de caracterizar o comportamento geotécnico dos rejeitos provenientes do processo de beneficiamento de minério de ferro dispostos em barragens de rejeito, propôs-se um estudo de caracterização desses rejeitos, no qual buscou-se realizar uma caracterização destes materiais com base em uma detalhada campanha de ensaios de laboratório. Para tal, realizou-se a coleta de amostras indeformadas no reservatório de uma barragem através de tubos de PVC de parede espessa.

Além disso, conforme artigo publicado por Lopes (2020), deseja-se entender a influência da oxidação no comportamento destes rejeitos de minérios de ferro. Para tal realizou-se a oxidação destes rejeitos, de forma forçada, por meio da utilização de peróxido de hidrogênio, de modo a comparar as amostras não oxidadas, com amostras oxidadas reconstituídas nos mesmos índices de vazios das amostras indeformadas.

Para este estudo, foram coletadas amostras de rejeitos de minério de ferro, deformadas e indeformadas, em um complexo minerário situado no Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, Brasil. Nesta localidade, a hematita é o principal mineral em exploração. A localização exata da barragem não pode ser mostrada por questão de confidencialidade.

O programa experimental foi predominantemente conduzido no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV). Adicionalmente, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica, no centro de microscopia eletrônica da UFV.

#### 4.1. Coleta de amostras

Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas no reservatório de uma barragem de disposição de rejeitos, através da abertura de poços de inspeção. Os itens a seguir apresentam a coleta de amostras deformadas e indeformadas, com os devidos registros fotográficos.

##### Retirada de amostras indeformadas

As amostras indeformadas foram coletadas em poços de amostragem, com 1,5 m de profundidade, removendo-se para tal materiais inconsolidados que foram verificados na área de coleta, além da realização de limpeza superficial do terreno. A remoção destes materiais inconsolidados foi executada com trado cavadeira, picareta, enxadão e pá. A Figura 4.1 apresenta a abertura de poço de inspeção, com posicionamento dos tubos de PVC para coleta das amostras indeformadas.

Figura 4.1 – Abertura de poço de inspeção.



Fonte: Autor

As amostras indeformadas foram coletadas a partir da cravação estática com tubo de PVC. Na mesma profundidade de coleta da amostra indeformada, foram coletadas as respectivas amostras deformadas, com massa mínima de 50 kg.

### **Cravação estática com tubo de PVC (grande diâmetro)**

Em função das dificuldades na amostragem de rejeitos dispostos em reservatórios, a retirada de amostras indeformadas foi realizada a partir da cravação estática de tubo de PVC, com diâmetro interno de 300 mm, espessura de parede de 7,7 mm e altura de 600 mm. As arestas da base do tubo de PVC foram biseladas para facilitar a sua cravação. Foram coletadas quatro amostras, em dois pontos distintos, para realização dos ensaios especiais previstos (resistência).

A utilização de amostradores de PVC de grande diâmetro para a coleta de amostras indeformadas de rejeitos de minério de ferro é um método frequentemente empregado em geotecnia, especialmente quando se busca preservar a estrutura e propriedades originais do material para análises precisas. Este método é considerado adequado por várias razões:

- **Preservação da Estrutura:** Amostradores de grande diâmetro permitem a coleta de amostras com uma representação mais realista da estrutura *in situ* dos rejeitos.
- **Facilidade de Manipulação e Armazenamento:** O PVC é leve, resistente à corrosão e fácil de manusear, tornando-o ideal para operações de campo. Além disso, a estocagem das amostras nos tubos de PVC pode ser feita de maneira segura e eficiente, sem risco de contaminação ou alteração das propriedades físicas das amostras.
- **Adaptação a Diferentes Condições de Solo:** Amostradores de PVC de grande diâmetro são versáteis e podem ser usados em uma variedade de condições de solo, incluindo rejeitos de minério de ferro, que podem variar amplamente em termos de umidade, densidade e composição mineralógica.

No entanto, há algumas considerações que devem ser levadas em conta para garantir a eficácia deste método:

- **Seleção do Diâmetro do Amostrador:** O diâmetro do tubo deve ser escolhido de acordo com o tamanho das partículas dos rejeitos e os objetivos do estudo. Tubos de diâmetro

muito pequeno podem ser inadequados para solos com partículas grandes, pois podem causar segregação ou perda de material durante a amostragem.

- Integridade Durante o Transporte e Armazenamento: As amostras devem ser cuidadosamente manuseadas e armazenadas para evitar dessecação ou outras formas de degradação antes da realização dos ensaios.

Em resumo, o uso de amostradores de PVC de grande diâmetro é geralmente adequado para a coleta de amostras indeformadas de rejeitos de minério de ferro, desde que as práticas recomendadas de amostragem e as limitações do material sejam devidamente consideradas. Este método facilita a obtenção de dados representativos e confiáveis, essenciais para a análise geotécnica e para a gestão eficaz dos rejeitos.

A seguir a metodologia utilizada para coleta de amostras indeformadas a partir da cravação estática de tubo de PVC:

- Posicionamento do tubo de PVC com a extremidade biselada para baixo, no local da coleta de forma nivelada;
- Retirada de excesso de material das extremidades do tubo, a fim de diminuir o atrito lateral durante a sua cravação;
- Cravação do tubo e a limpeza das extremidades de forma gradativa até que a amostra ultrapasse o limite superior do molde;
- Retirada de material excedente da parte superior do molde com utilização de espátula ou régua biselada, de modo que não danifique a amostra;
- Retirada da amostra cravando a espátula em sua base, deixando cerca de 3 cm de material excedente em relação a parte inferior do tubo, e com utilização da régua biselada ou espátula realizar a retirada do material de modo que não danifique a amostra;
- Proteção nos dois extremos do tubo, utilizando papel alumínio ou plástico filme e tecido fixando com barbante;
- Aplicação de parafina em ambos os lados da amostra (base e topo) utilizando no mínimo duas demãos de parafina, com utilização de talagarça;
- Após a aplicação da parafina na amostra, indicação do topo do tubo, com colocação de uma etiqueta de identificação, constando os dados descritos a seguir:

- Número do poço;
- Orientação em relação a uma direção (por exemplo, bordo ou centro);
- Profundidade do topo e base da amostra no poço;
- Cota da boca do poço e cota de base da amostra (base do poço de inspeção);
- Data da amostragem;
- Nome do operador.

Após a retirada das amostras, estas foram posicionadas em caixa de transporte, cúbica de madeira, na mesma posição de retirada em campo, ou seja, na vertical respeitando a orientação de topo e base da cravação. Os espaços entre a face do tubo parafinado e caixa foram completamente preenchidos com serragem fina pouco umedecida.

No lado da caixa correspondente ao topo do bloco, deverá ser afixada uma etiqueta com os mesmos dizeres da etiqueta colada no bloco.

O transporte das amostras foi realizado de forma cuidadosa, sem manobras bruscas, com máximo cuidado nas frenagens e mudanças de direção.

A sequência de fotos abaixo (Figura 4.2 a Figura 4.6) demonstra de maneira sintética o procedimento para retirada das amostras indeformadas com tubo de PVC biselado de grande diâmetro.

Figura 4.2 – (a) Abertura da praça de trabalho; (b) Início da cravação estática de tubo de PVC.



Fonte: Autor.

Figura 4.3 – (a) Continuidade da cravação estática de tubo de PVC; (b) Finalização da cravação estática de tubo de PVC.



Fonte: Autor.

Figura 4.4 – (a) Utilização de talagarça do topo da amostra; (b) Selagem do topo da amostras com parafina.



Fonte: Autor.

Figura 4.5 – (a) Proteção do topo da amostra com plástico e filme; (b) Separação da base da amostra com fio de aço.



Fonte: Autor.

Figura 4.6 – (a) Acondicionamento das amostras em caixa de madeira; (b) Preenchimento da caixa de madeira com serragem umedecida.



Fonte: Autor.

### **Retirada de amostras deformadas**

Foram coletadas também amostras deformadas, em local próximo ao poço/trincheira de inspeção, na mesma profundidade de retirada das amostras indeformadas, aproveitando-se do material escavado para a coleta da amostra indeformada, com retirada de em torno 50 kg de material.

O material amostrado foi acondicionado em sacolas plásticas mantendo-se o mínimo de ar livre dentro destas.

Todas as amostras foram identificadas por duas etiquetas, uma externa e outra interna aos recipientes de amostragem, contendo os dados descritos a seguir, seguindo ainda a nomenclatura proposta na tabela.

- Data da coleta;
- Profundidade do ponto de coleta.

As amostras foram guardadas à sombra em local ventilado, até o final da jornada diária, quando foram transportadas para o local indicado.

Assim que as amostras, deformadas e indeformadas chegaram ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV), aproximadamente 12 horas após a coleta de campo, estas foram armazenadas imediatamente em câmara úmida.

Na Figura 4.7 à Figura 4.8 são apresentados os registros fotográficos das amostras deformadas, tendo sido coletadas em local adjacente ao de retirada das amostras indeformadas, além de amostra retirada na saída da planta de filtragem existente na unidade mineral.

Figura 4.7 – Amostras deformadas, retiradas em local adjacente às indeformadas. (a) REJEITO\_01; e (b) REJEITO\_02.



Fonte: Autor.

Figura 4.8 - Amostras deformadas, retirada na saída da planta de filtragem. (a) REJEITO\_03.



Fonte: Autor.

Ao todo foram amostrados três tipos de rejeito, sendo:

- Rejeito 1: Este rejeito possui uma coloração marrom claro, apresentando uma textura granular com partículas finas. Visualmente, as partículas de areia e silte são bem visíveis, indicando um material areno-siltoso. Ao toque, o rejeito é ligeiramente áspero devido à presença de partículas de areia, mas também contém uma sensação de

suavidade proporcionada pelas partículas de silte. Foram retiradas duas amostras indeformadas do reservatório da barragem, além de uma amostra deformada.

- Rejeito 2: Com uma coloração cinza, este rejeito apresenta características de material silto-arenoso. Visualmente, ele exibe uma mistura uniforme de partículas finas e médias. Ao toque, o rejeito tem uma textura intermediária, não sendo tão áspero quanto o Rejeito 1, devido à maior presença de silte, mas ainda possui uma certa granulosidade causada pelas partículas de areia. Duas amostras indeformadas foram retiradas do reservatório da barragem, além de uma amostra deformada.
- Rejeito 3: Este rejeito possui uma coloração marrom, com uma textura predominantemente fina. Visualmente, ele apresenta uma aparência homogênea com menos visibilidade de partículas granulares, indicando um material silto-arenoso. Ao toque, o rejeito é mais suave e menos áspero, com uma textura que lembra o pó fino, devido à alta concentração de partículas de silte. Foi retirada uma amostra deformada na saída da planta de filtragem.

A Figura 4.9 apresenta um fluxograma da campanha de ensaios realizados nas amostras deformadas e indeformadas. Já a Tabela 4.1 apresenta um resumo dos ensaios realizados, bem como as normas de referência a serem utilizadas.

A escolha de rejeitos de minério de ferro, em vez de outros tipos de rejeitos, para esta pesquisa foi estrategicamente orientada por várias razões significativas. Primeiramente, o minério de ferro é uma das principais commodities minerais exploradas no Brasil, um país que se destaca como um dos maiores produtores mundiais deste recurso. A vasta produção gera uma quantidade correspondente de rejeitos, cuja gestão representa um desafio ambiental e técnico crucial para a indústria de mineração e para as comunidades locais.

Além disso, os rejeitos de minério de ferro são particularmente suscetíveis à oxidação devido à presença abundante de ferro em sua composição. Este processo de oxidação pode alterar significativamente suas propriedades físicas e químicas, afetando a estabilidade dos depósitos de rejeitos e aumentando o risco de falhas catastróficas, como demonstrado por desastres recentes em barragens de rejeitos no Brasil. Portanto, entender como a oxidação impacta esses rejeitos é de importância primordial para prevenir futuros acidentes e para o desenvolvimento de técnicas de disposição mais seguras.

A relevância dos rejeitos de minério de ferro também se estende às suas implicações econômicas e sociais. A capacidade de gerir eficazmente estes rejeitos não só melhora a

sustentabilidade ambiental, mas também a imagem e a operacionalidade da indústria de mineração. Isso, por sua vez, pode influenciar positivamente as políticas regulatórias e fortalecer a aceitação social das atividades de mineração.

Portanto, a escolha de focar nos rejeitos de minério de ferro para esta pesquisa não foi apenas uma questão de relevância técnica, mas também uma resposta direta às necessidades socioeconômicas e ambientais, visando fomentar uma indústria de mineração mais responsável e sustentável.

Os ensaios realizados, incluindo Granulometria, Limites de Atterberg, Massa Específica dos Grãos, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) combinada com Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), e o Ensaio Triaxial CIU<sub>SAT</sub> (Consolidado Isotrópico Não Drenado Sob Tensão Axial), foram fundamentais porque permitiram uma caracterização abrangente e detalhada das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos rejeitos.

Os ensaios de Granulometria proporcionaram dados essenciais sobre a distribuição de tamanho das partículas dos rejeitos, oferecendo percepções sobre a porosidade, permeabilidade e compactação do material, que são cruciais para entender seu comportamento geotécnico e a estabilidade dos depósitos. Os Limites de Atterberg ajudaram a determinar os estados de consistência dos rejeitos, informando sobre a plasticidade e o comportamento potencial do material sob diferentes condições de umidade.

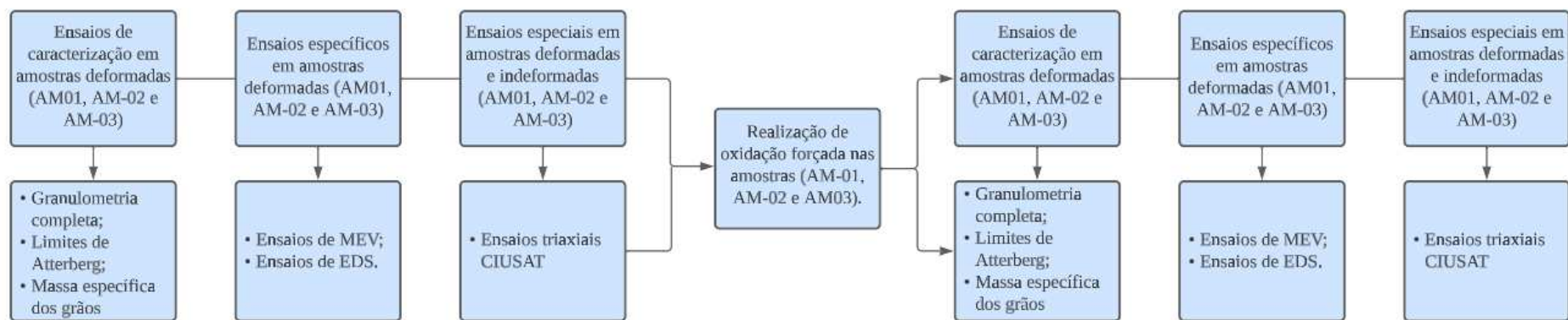
A determinação da Massa Específica dos Grãos foi importante para compreender a densidade dos materiais e sua influência na capacidade de carga e nos comportamentos de consolidação e compressão dos rejeitos. O uso da Microscopia Eletrônica de Varredura juntamente com o Ensaio EDS foi crucial para visualizar a microestrutura dos rejeitos e identificar a composição química em escala microscópica, o que é vital para entender as transformações químicas resultantes da oxidação e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas dos rejeitos.

Finalmente, o Ensaio Triaxial CIUSAT permitiu a análise do comportamento mecânico dos rejeitos sob condições controladas de tensão e pressão, oferecendo dados valiosos sobre a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade do material. Esta informação é essencial para o projeto de estruturas de contenção seguras e eficazes, bem como para o desenvolvimento de estratégias de manejo e mitigação de riscos associados à disposição de rejeitos.

Juntos, esses ensaios forneceram uma base sólida para a compreensão integral dos impactos da oxidação sobre os rejeitos de minério de ferro, permitindo a elaboração de práticas de gestão

mais informadas e ambientalmente responsáveis, cruciais para a sustentabilidade da indústria de mineração.

Figura 4.9 - Fluxograma da campanha de ensaios a serem realizados nas amostras deformadas e indeformadas.



Fonte: Autor.

Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios do programa experimental realizado.

Etapa	Ensaio	Norma de Referência	Realizado					
			Amostras não oxidadas			Amostras oxidadas		
			REJEITO-01	REJEITO-02	REJEITO-03	REJEITO-01	REJEITO-02	REJEITO-03
Caracterização dos Materiais	Granulometria	ASTM D 6913	1	1	1	1	1	1
	Limites de Atterberg	ASTM D 4318	1	1	1	1	1	1
	Peso Específico do Grãos	ASTM D 854	1	1	1	1	1	1
Mineralogia	Microscopia Eletrônica de Varredura + Ensaio EDS	-	1	1	1	1	1	1
Resistencia ao cisalhamento e comportamento	Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> , a tensões confinantes de 100, 200, 400 e 800 kPa.	ASTM D4767	2	2	1	1	1	1

Fonte: Autor.

A escolha dos três tipos de rejeitos (Rejeito 1, Rejeito 2 e Rejeito 3) para o estudo foi baseada em critérios específicos que visam abranger diferentes características físicas e químicas presentes nos rejeitos de minério de ferro. Cada tipo de rejeito foi selecionado para representar variações significativas que possam influenciar o comportamento geotécnico e a estabilidade das barragens de rejeitos.

- **Rejeito 1:** Caracterizado por uma coloração marrom claro e textura areno-siltosa, foi escolhido devido à sua composição granular, que permite estudar a interação entre partículas de areia e silte em termos de permeabilidade e resistência ao cisalhamento.
- **Rejeito 2:** Com uma coloração cinza e características silto-arenosas, este rejeito foi selecionado para investigar os efeitos de uma maior concentração de partículas finas na reatividade química e na estabilidade estrutural.
- **Rejeito 3:** Apresentando uma coloração marrom e textura predominantemente silto-arenosa, foi escolhido para avaliar o impacto da oxidação diretamente na saída da planta de filtragem, onde os rejeitos estão mais expostos a condições ambientais que podem acelerar processos oxidativos.

A seleção dos ensaios realizados foi fundamentada na necessidade de obter uma caracterização completa e detalhada dos rejeitos de minério de ferro, contemplando aspectos físicos, químicos e mecânicos. Os ensaios escolhidos são os mais adequados para fornecer as informações necessárias para a análise geotécnica e a gestão sustentável dos rejeitos.

1. **Granulometria (ASTM D 6913).** Este ensaio é fundamental para determinar a distribuição do tamanho das partículas dos rejeitos. A granulometria afeta diretamente a permeabilidade, a compactação e a estabilidade dos rejeitos. É essencial para classificar os materiais e entender seu comportamento sob diferentes condições de carregamento e ambientais.
2. **Limites de Atterberg (ASTM D 4318).** Os limites de liquidez e plasticidade fornecem informações cruciais sobre a plasticidade e a consistência dos rejeitos. Esses parâmetros são importantes para prever a capacidade de deformação dos materiais e sua suscetibilidade a mudanças volumétricas, influenciando diretamente a estabilidade das barragens de rejeitos.
3. **Peso Específico dos Grãos (ASTM D 854).** A determinação do peso específico dos grãos é essencial para calcular a densidade relativa e o índice de vazios dos rejeitos.

Esses valores são fundamentais para avaliar a compactação e a resistência dos materiais, além de serem utilizados em diversos cálculos geotécnicos.

4. **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).** Esses ensaios permitem uma análise detalhada da microestrutura e da composição química dos rejeitos. A identificação de fases minerais e a observação de produtos de oxidação são cruciais para entender os efeitos da oxidação nas propriedades físicas e químicas dos rejeitos.
5. **Ensaio Triaxial CIU (ASTM D4767).** Este ensaio é fundamental para determinar a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade dos rejeitos sob diferentes tensões confinantes. É essencial para avaliar a estabilidade das barragens de rejeitos e prever o comportamento dos materiais sob condições de carregamento dinâmico.

#### **4.2. Preparação das amostras**

No início do processo, após a coleta, as amostras foram submetidas à secagem, em condições ambientes. Após este período de secagem, o material foi cuidadosamente desagregado, passando por um processo de peneiramento para garantir granulometria uniforme e, em seguida, homogeneizado, como ilustrado na Figura 4.10. Para preservar as características inerentes dos rejeitos e evitar qualquer alteração indesejada, eles foram armazenados em sacos plásticos herméticos, evitando a entrada de ar. Imediatamente antes de cada ensaio experimental, foi essencial realizar uma nova desagregação, peneiramento e homogeneização do material. Este passo assegurou a eliminação de possíveis grumos ou aglomerados que poderiam afetar a precisão dos testes.

Figura 4.10 – Peneiramento e homogeneização da amostra “Rejeito-03”.



Fonte: Autor.

### 4.3. Ensaio de caracterização

As amostras coletadas, identificadas como REJEITO-01, REJEITO-02 e REJEITO-03, foram submetidas a uma série de ensaios laboratoriais rigorosos para melhor compreender suas características físicas e mecânicas

Adicionalmente, não se limitou a análise às características iniciais destas amostras. Foi conduzido um conjunto de testes de oxidação forçada, realizados nessas mesmas amostras, a fim de simular as condições de exposição ao oxigênio e outras condições ambientais que poderiam levar à oxidação. Posteriormente, os ensaios de caracterização foram repetidos nas amostras pós-oxidação. O objetivo principal destes ensaios sequenciais foi identificar possíveis variações nas propriedades dos materiais e determinar se o processo oxidativo exerce alguma influência nos resultados dos ensaios de caracterização.

Os ensaios de granulometria completa (peneiramento e sedimentação) foram realizados no LMS-UFV, em conformidade com a norma ABNT NBR 7181:2016. Foram realizados três ensaios nas amostras coletadas e três ensaios após os testes de oxidação. A determinação da massa específica dos grãos, para as três amostras coletada, foi realizada no LMS-UFV, em conformidade com a norma ABNT NBR 6458:2016. Também foram realizados três ensaios nas amostras após os testes de oxidação. Foi realizado o ensaio de limite de plasticidade e de limite

de liquidez, nas amostras coletadas, no LMS-UFV. Também foram realizados três ensaios nas amostras após os testes de oxidação.

#### **4.4. Ensaio de compressão triaxial**

No Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV), a implementação e a estruturação das metodologias de teste seguiram rigorosamente o padrão estabelecido por HEAD K. H. (1998). Essa abordagem buscou alinhar-se com os padrões internacionais estabelecidos pelas normas ISO 17892-9:2018, ASTM D4767:2011(2020) e ASTM D7181:2020, assegurando que os procedimentos adotados para os ensaios estavam em conformidade com as melhores práticas reconhecidas internacionalmente.

O espectro de ensaios triaxiais foi extenso, cobrindo tensões de confinamento efetivas que variaram de 100 kPa a 800 kPa. Dentro do escopo do programa experimental, um foco principal foi dado à realização de testes de compressão triaxial do tipo  $CIU_{SAT}$  em amostras que foram cuidadosamente saturadas e consolidadas de forma isotrópica, de forma a garantir que as condições da amostra fossem representativas e confiáveis.

A etapa subsequente envolveu a consolidação, que foi realizada mediante o incremento da pressão na câmara triaxial. Isso continuou até que se alcançasse um equilíbrio, com a diferença entre a contrapressão e a pressão de confinamento igualando a tensão de consolidação efetiva desejada. Durante os ensaios de cisalhamento, adotou-se um controle meticuloso, impondo uma taxa de deformação axial que variava entre 0,010 mm/min e 0,020 mm/min. Durante este processo, a pressão de confinamento foi meticulosamente monitorada para se manter aproximadamente constante.

Os instrumentos utilizados foram de grande importância para a precisão dos resultados. No LMS-UFV, optou-se por um equipamento triaxial convencional, alinhado com os padrões da norma ASTM D4767:2011.

Foram conduzidos ensaios triaxiais do tipo  $CIU_{SAT}$ , tanto em amostras indeformadas quanto em amostras reconstituídas que mantinham índices de vazios semelhantes às amostras originais. Adicionalmente, ensaios triaxiais do tipo  $CIU_{SAT}$  foram aplicados em amostras que passaram pelo processo de oxidação forçada, mantendo-se os mesmos índices de vazios, com o intuito de discernir os efeitos da oxidação nas propriedades do material.

## **Preparação do corpo de prova**

No LMS-UFV, são adotados corpos de prova de formato cilíndrico, com 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura. Foram moldados corpos de prova das amostras indeformadas e reconstituídos corpos de prova das amostras deformadas, em índices de vazios semelhantes ao das amostras indeformadas.

### Amostra indeformada

Para moldagem do corpo de prova, a partir de amostras indeformadas, foi utilizada a seguinte sequência metodológica.

Primeiramente a amostra indeformada, como um todo, foi inspecionada visualmente, para identificar e remover quaisquer impurezas presentes na amostra. A partir desta inspeção, foi selecionada uma área para extração do corpo de prova, evitando-se áreas com irregularidades ou heterogeneidades evidentes.

A área selecionada para extração do corpo de prova, foi marcada com uma ferramenta de corte. Usando um cortador, foi retirada uma amostra cúbica, com largura e altura adequadas para moldagem do corpo de prova, cerca de 2,0 cm mais do que as dimensões deste, que possui 5,0 cm de diâmetro por 10,0 cm de altura. Tal amostra foi retirada cuidadosamente do bloco, minimizando qualquer perturbação.

Para moldagem da amostra cilíndrica, as extremidades da amostra cúbica foram abastadas com lâmina afiada com o auxílio de um molde mestre, garantindo que ambas as faces ficassem planas e paralelas entre si. No fim da moldagem, as dimensões finais do cilindro foram registradas, a fim de se aproximar das medidas desejadas (50 mm de diâmetro x 100 mm de altura), conforme pode ser observado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Moldagem de corpo de prova, a partir de amostra indeformada.



Fonte: Autor

#### Amostra reconstituída

A importância da reconstituição de amostras para ensaios triaxiais reside na necessidade de replicar as condições do campo em laboratório. Esse processo busca manter as características próximas às dos rejeitos existentes em campo, principalmente em relação ao índice de vazios.

Os corpos de prova para ensaios triaxiais foram meticulosamente preparados por meio de compactação estática. Este método foi escolhido por sua eficiência na replicação de condições específicas, como índices de vazios.

Inicialmente, um molde dividido foi empregado para assegurar a uniformidade da amostra durante a compactação. Uma prensa foi utilizada para aplicar uma pressão controlada, garantindo que cada camada da amostra fosse compactada de maneira consistente.

Nas instalações da UFV, as amostras foram compactadas em quatro camadas distintas. Para garantir a precisão e uniformidade, uma régua cilíndrica auxiliou no processo, servindo como guia durante a compactação.

Para cada camada compactada, o volume correspondente foi rigorosamente determinado. Simultaneamente, a massa exata dos rejeitos foi mensurada, garantindo que a densidade da amostra reconstituída fosse mantida próxima ao desejado.

Após a compactação de cada camada, foi realizado um processo de escarificação. Esse passo foi essencial para eliminar superfícies planas e lisas entre as camadas. A escarificação aprimora

a aderência entre uma camada e outra, proporcionando uma transição mais coesa e evitando discontinuidades que possam afetar o comportamento do corpo de prova durante os ensaios.

A Figura 4.12 apresenta os aparatos utilizados e as principais etapas do processo de reconstituição de amostras descrito acima.

Já a Figura 4.13 demonstra a preparação da base da célula triaxial, com o posicionamento da pedra porosa e do papel filtro para recebimento do corpo de prova.

Figura 4.12 – Preparação de amostras reconstituídas.



(a) Prensa utilizada para compactação das amostras; (b) equipamentos e materiais utilizados (c) corpo de prova sendo compactado; (d) Escarificação de camada após compactação; (e) Corpo de prova finalizado. Fonte: Adaptado de Carneiro J. (2021).

Figura 4.13 – Preparação da base da célula triaxial.



Fonte: Autor

### Saturação dos corpos de prova

Antes do ensaio em si, as amostras foram saturadas na própria célula triaxial para garantir que todos os poros estivessem preenchidos com água. No que diz respeito à saturação, o LMS-UFV adotou a percolação das amostras com a utilização de água desaerada.

Adicionalmente, ao avaliar a saturação das amostras, estabeleceu-se um critério rigoroso: a adoção de um coeficiente mínimo de pressão intersticial de Skempton B de 0,96, o que se revelou uma métrica essencial para garantir a completa saturação das amostras.

### **Adensamento dos corpos de prova**

Na fase de adensamento dos corpos de prova, foi adotada a seguinte sequência metodológica:

#### Aplicação da Pressão de Confinamento:

Inicialmente, a amostra foi colocada na célula triaxial, seguida pela aplicação de uma pressão hidrostática uniforme em todas as direções. Esta pressão foi fornecida por meio do preenchimento da câmara triaxial com água, assegurando, desta forma, uma consolidação isotrópica da amostra.

#### Monitoramento do Processo de Consolidação:

Durante a consolidação, foi essencial o monitoramento contínuo da quantidade de água expelida da amostra. Este monitoramento foi realizado utilizando-se buretas de medição. As leituras obtidas forneceram dados cruciais sobre a variação do volume do corpo de prova, refletindo o grau de consolidação alcançado.

#### Finalização do Processo de Consolidação:

A fase de consolidação foi considerada completa quando se observou uma redução ou cessação no volume de água expelida da amostra.

Ao longo da fase consolidação, fez-se imprescindível manter constantes todas as condições ambientais e operacionais, incluindo a temperatura e a pressão de confinamento. Além disso, teve de se garantir que a amostra permanecesse saturada durante todo o processo para evitar variações indesejadas nas condições de umidade.

#### Registro de Variação de Volume:

Por fim, foi fundamental registrar a variação de volume do corpo de prova, utilizando-se as leituras registradas nas buretas. Este registro foi crucial para a análise subsequente e interpretação dos resultados do ensaio.

A Figura 4.14 representa a fase de adensamento do corpo de prova, com destaque para a bureta de medição da variação volumétrica.

Figura 4.14 – Fase de adensamento do corpo de prova.



Fonte: Autor

### **Cisalhamento dos corpos de prova**

Na fase de cisalhamento do ensaio de compressão triaxial adensado não drenado em amostras saturadas (CIU<sub>SAT</sub>), foi adotada a seguinte sequência metodológica:

#### Preparação para o Cisalhamento:

Uma vez que a fase de adensamento é concluída e a amostra atinge o estado de consolidação adequado, a preparação para o cisalhamento começa. Esta transição foi feita com cuidado para preservar a integridade estrutural do corpo de prova.

#### Aplicação Controlada da Deformação Axial:

Durante a fase de cisalhamento, uma taxa de deformação axial foi cuidadosamente aplicada. Esta taxa foi selecionada com base na natureza do solo e nos objetivos específicos do ensaio, mantendo-se entre 0,010 mm/min e 0,020 mm/min. Esta aplicação controlada foi essencial para um processo de cisalhamento estável e gerenciável.

### Monitoramento de Parâmetros Essenciais:

Parâmetros como poropressão, deformação axial força axial aplicada foram monitorados em tempo real. Este monitoramento contínuo foi vital para compreender a resposta do material ensaiado sob condições de cisalhamento e para a validade dos resultados do ensaio. A deformação axial foi monitorada por relógio analógico, enquanto a poropressão e a força axial por mostradores digitais, conforme pode ser observado na figura.

Figura 4.15 – Fase de cisalhamento do corpo de prova.



Fonte: Autor.

### Manutenção da Pressão de Confinamento:

É crucial manter a pressão de confinamento constante durante o cisalhamento para simular as condições de confinamento estático que o solo experimentaria no campo, garantindo assim a relevância dos resultados obtidos.

#### Critérios de Conclusão do Ensaio:

A fase de cisalhamento é considerada completa quando atinge uma deformação axial predeterminada, em torno de 20%.

#### Documentação Detalhada e Análise dos Resultados:

Após o término do ensaio, uma análise meticulosa dos dados coletados é realizada. Esta análise envolve a interpretação de curvas de tensão-deformação e a determinação da resistência ao cisalhamento, além de outras propriedades mecânicas relevantes do solo.

### **4.5. Oxidação forçada das amostras de rejeito**

Na metodologia adotada para realização da oxidação de ferro pelo peróxido de hidrogênio, considerou-se o papel multifacetado do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, tanto em aplicações domésticas quanto industriais, além de sua função crucial na oxidação de metais, particularmente o ferro. Reconhecendo a tendência natural do ferro para oxidar, especialmente na presença de agentes oxidantes como o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a seguinte abordagem foi adotada.

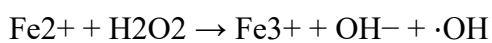
### **Mecanismos de Reação com Peróxido de Hidrogênio**

#### Interação do Ferro com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:

O estudo focou na análise das reações redox que ocorrem quando o ferro entra em contato com o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Foi dada atenção especial às condições ácidas, onde o peróxido de hidrogênio pode oxidar tanto o ferro metálico (Fe<sup>0</sup>) quanto o íon ferroso (Fe<sup>2+</sup>), resultando na formação do íon férrico (Fe<sup>3+</sup>).

#### Reação de Fenton:

A reação de Fenton foi estudada como parte central deste processo, descrita pela equação:



### Implicações na Corrosão:

A propriedade oxidativa do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, especialmente em relação à corrosão do ferro e formação de produtos de corrosão como o óxido de ferro (III) hidratado, foi analisada. A necessidade de manipulação cuidadosa do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em contextos, onde ele entra em contato com estruturas metálicas, foi enfatizada.

Na presente metodologia, aborda-se o desafio representado para realização de oxidação forçada das amostras de rejeito de minério de ferro. Para verificação da oxidação, empregou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), acoplado a um sistema de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), como uma ferramenta analítica essencial para identificar e quantificar os processos oxidativos nestas amostras.

### **Metodologia de Análise MEV-EDS**

#### Preparação das Amostras:

As amostras de rejeito de minério de ferro foram inicialmente secas e, posteriormente, fixadas em suportes apropriados. A fim de torná-las condutoras, uma cobertura fina de ouro foi aplicada sobre cada amostra.

#### Microscópio Eletrônico de Varredura:

As amostras preparadas foram analisadas utilizando um MEV equipado com detector EDS.

## **5. RESULTADOS**

Neste capítulo, detalham-se os resultados alcançados através do programa experimental desenvolvido, complementados por discussões analíticas pertinentes, com o objetivo de elucidar o comportamento geomecânico dos rejeitos de minério de ferro em foco. Esta análise envolve uma comparação sistemática dos resultados de ensaios de caracterização e ensaios de resistência, das amostras originais de rejeitos, comparando-as com as mesmas amostras submetidas a um processo de oxidação forçada.

## **Comparação de Resultados entre Amostras Originais e Oxidadas**

### Análise de Caracterização:

Os primeiros resultados apresentados referem-se aos ensaios de caracterização das amostras não oxidadas, delineando um perfil das propriedades iniciais dos rejeitos. Este perfil é ainda contrastado com outros rejeitos provenientes do Quadrilátero Ferrífero, abarcando aspectos como granulometria, limites de Atterberg e densidade dos grãos.

### Ensaio de Resistência:

A resistência mecânica das amostras originais, indeformadas e reconstituídas, é então apresentada, através de ensaios de compressão triaxial do tipo CIU<sub>SAT</sub>, definindo parâmetros de resistência dos rejeitos ensaiados, como ângulo de atrito e intercepto coesivo. Para isto são apresentadas as trajetórias de tensão dos ensaios, com base nos diagramas  $s' \times t$ , sendo os parâmetros de resistência de pico e pós-pico dos rejeitos ensaiados.

### Oxidação Forçada:

Posteriormente, os resultados obtidos do processo de oxidação forçada são explorados. Esta análise é enriquecida por imagens capturadas através de microscópio eletrônico de varredura e ensaios EDS, permitindo a verificação da concentração de elementos químicos específicos em cada amostra, antes e após a oxidação forçada.

### Comparação entre amostras naturais e oxidadas:

Neste item é apresentada uma comparação entre os ensaios de caracterização e resistência das amostras naturais e oxidadas, visando entender como a oxidação afeta a resistência e o comportamento mecânico destes rejeitos.

## **5.1. Caracterização física das amostras que não foram submetidas ao processo de oxidação**

As propriedades físicas das amostras ensaiadas, anteriormente aos testes de oxidação, são apresentadas na Tabela 5.1, enquanto as curvas de distribuição granulométricas são apresentadas na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Características físicas das amostras ensaiadas.

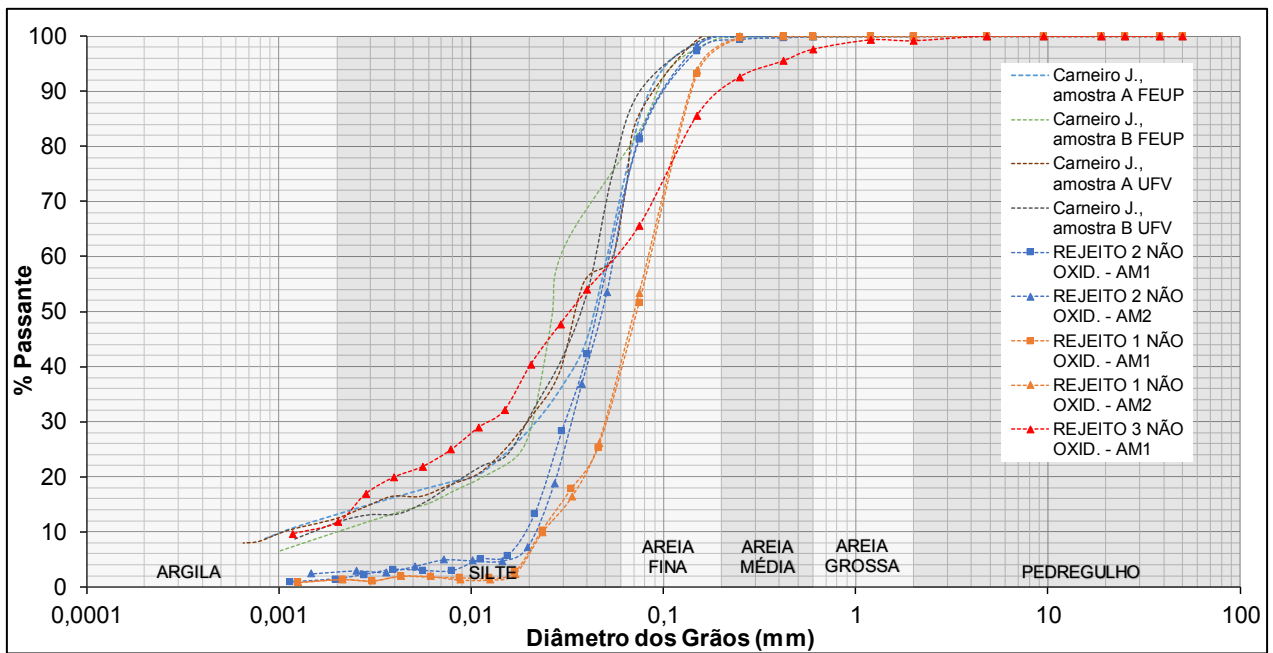
Material	Ensaio	Descrição material	$\delta_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Análise Granulométrica (ASTM D 6913 – 04)						Limites de consistência									
				Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedreg. (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	D <sub>60</sub> mm	D <sub>10</sub> mm	D <sub>30</sub> mm	D <sub>50</sub> mm	Finos <sup>1</sup> (%)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
REJEITO 01	AM1	Rej. Marrom	3,07	1,30	39,20	57,50	2,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,085	0,023	0,05	0,075	40	3,70	1,28
REJEITO 01	AM2	Rej. Marrom	3,07	1,35	40,15	56,70	1,80	0,00	0,00	NL	NP	-	0,082	0,023	0,05	0,07	40	3,57	1,33
REJEITO 02	AM1	Rej. Cinza	3,49	1,35	68,65	29,00	1,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,052	0,018	0,03	0,045	68	2,89	0,96
REJEITO 02	AM2	Rej. Cinza	3,49	2,30	65,70	32,00	0,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,055	0,022	0,032	0,046	68	2,50	0,85
REJEITO 03	AM1	Rej. Natural	3,33	11,68	49,12	29,2	7,56	1,56	0,88	NL	NP	-	0,058	0,0012	0,013	0,032	62	48,33	2,43

Nota 1: Material passante na peneira #200

$\delta_s$  – Massa específica dos Grãos. LP – Limite de Plasticidade. IP – Índice de Plasticidade. LL – Limite de Liquidez. NL – Limite de Liquidez não Definido. NP – Não Plástico. C<sub>u</sub> – Coeficiente de Uniformidade. C<sub>c</sub> = D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub>. C<sub>c</sub> – Coeficiente de curvatura. C<sub>c</sub> = D<sub>30</sub><sup>2</sup>/D<sub>60</sub>D<sub>10</sub>.

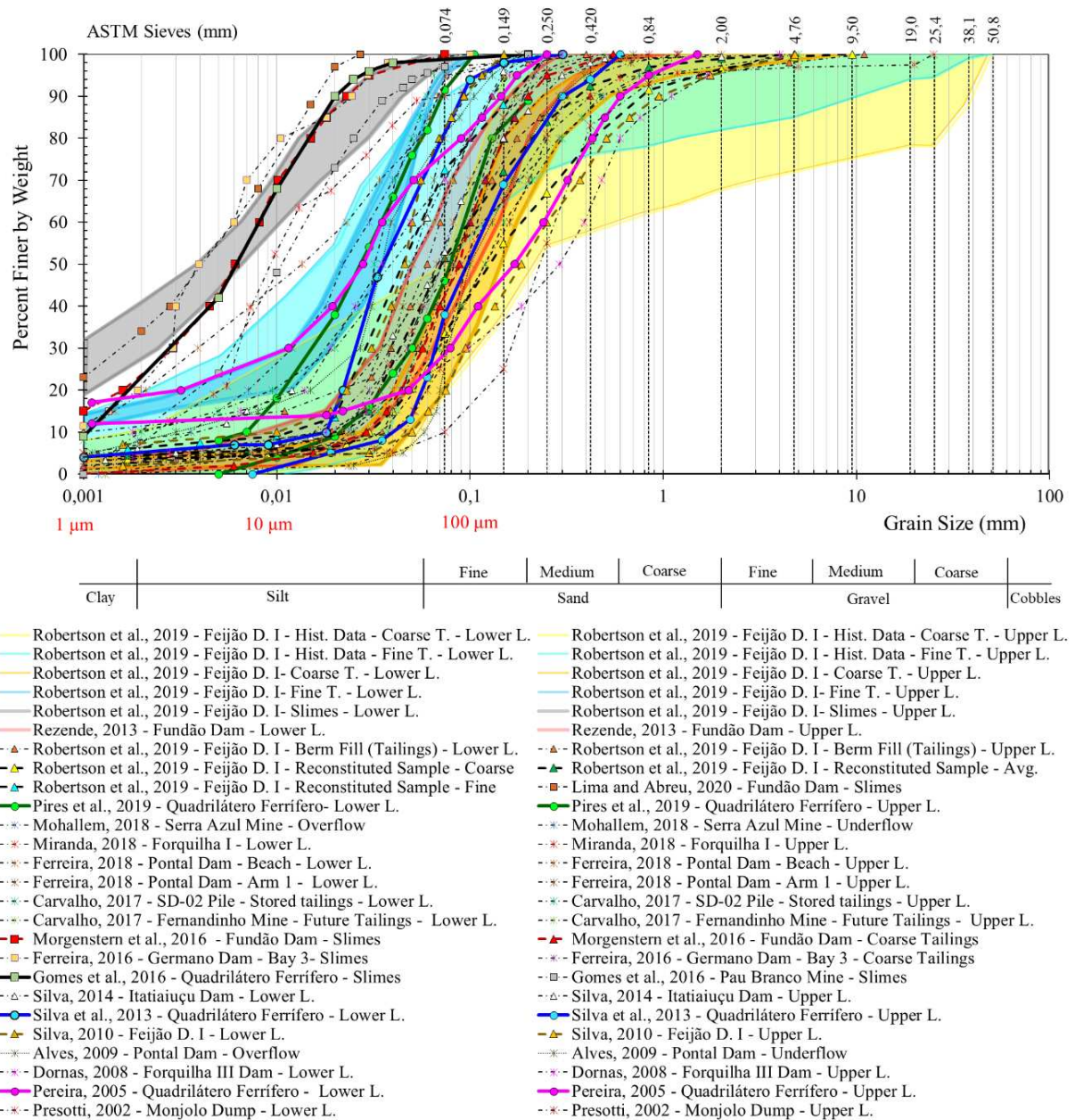
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.1 – Curvas granulométricas das amostras ensaiadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.2 – Curvas granulométricas de rejeitos gerados em empreendimentos minerários do quadrilátero ferrífero.



Fonte: Adaptado de Carneiro J. (2021).

Foram ensaiados três tipos de rejeitos, sendo rejeito cinza, rejeito marrom e rejeito natural.

O rejeito 01 é um material silto arenoso, possuindo uma distribuição uniforme, com  $C_u$  (coeficiente de uniformidade), igual a 2,89 e 2,50, respectivamente. Em relação ao coeficiente de curvatura, as amostras são bem graduadas, ambas com valores de  $C_c$  compreendidos entre

1,0 e 3,0. O D50 de ambas as amostras é bem similar, com valor de 0,075 para a amostra AM1 e 0,07 para a AM2.

O rejeito 02 é um material arenoso siltoso, possuindo uma distribuição uniforme, com  $C_U$  (coeficiente de uniformidade), igual a 3,70 e 3,57, respectivamente. Em relação ao coeficiente de curvatura, as amostras são mal graduadas, ambas com valores de  $C_C$  abaixo de 1,0. O D50 de ambas as amostras é bem similar, com valor de 0,045 para a amostra AM1 e 0,046 para a AM2.

O rejeito 03 é um material silto arenoso, porém com um maior percentual de argila, igual a 11,68%. Possui uma distribuição não uniforme, com  $C_U$  (coeficiente de uniformidade), igual a 48,33. Em relação ao coeficiente de curvatura, a amostra é bem graduada, com valor de  $C_C$  compreendidos entre 1,0 e 3,0. O D50 da amostra é igual a 0,032.

Quando se compara as amostras ensaiadas com outros rejeitos do Quadrilátero Ferrífero, no caso resultados de ensaios realizados por Carneiro (2021) apresentados na Figura 5.1 e por outros autores, conforme explicitado na Figura 5.2 (Carneiro J., 2021), observa-se que as curvas granulométricas são bem similares com os de outros rejeitos do quadrilátero ferrífero.

Quando comparamos a massa específica dos grãos, com o de outros autores, como pode ser observado na Figura 5.3 (Carneiro J., 2021), podemos verificar que as amostras ensaiadas no presente estudo possuem massa específica dos grãos com média igual a  $3,29 \text{ g/cm}^3$ . Como pode ser observado na Figura 5.3, a média da massa específica dos grãos dos rejeitos do quadrilátero ferrífero estudados por outros autores é um pouco maior, com valor igual a  $3,71 \text{ g/cm}^3$ . Porém a diferença de valor, igual a 0,42, é menor que o desvio padrão dos rejeitos apresentados na Figura 5.3, igual a 0,58, o que mostra que há semelhança entre os rejeitos estudados no presente trabalho, quando comparados com o de outros autores.

Quando se verificam os limites de consistência dos rejeitos ensaiados no presente estudo (Tabela 5.1), estes materiais são não plásticos (NP), não sendo possível determinar seu índice de plasticidade (IP). Na Figura 5.4, onde são apresentados os limites de consistência de diversos rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero (Carneiro J., 2021), pode se observar que diversos rejeitos, destacados em vermelho, também são não plásticos (NP), apresentando similaridade.

Figura 5.3 – Massa específica dos grãos de rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.

Authors	Sample	G <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
Presotti, 2002	Monjolo Dump (hydraulic fill)	3,38 (2,89-4,41)
Santos, 2004	Monjolo Dump (hydraulic fill)	3,08 (2,95-3,19)
Pereira, 2005	Germano Pit	3,33 (3,27-3,40)
	Itabiruçu Dam	3,37 (3,34-3,41)
	Forquilha III Dam	3,88 (3,81 -3,95)
	Forquilha II Dam	4,80
	Campo Grande Dam	4,15
	Córrego do Doutor Dam	3,38 (3,37-3,40)
Dornas, 2008	Forquilha III Dam	3,71 (3,27-4,52)
Alves, 2009	Pontal Dam	3,35 (3,32-3,41)
Silva, 2010	Feijão Dam I	4,49 (3,80-5,11)
Rezende, 2013	Fundão Dam	2,98 (2,77-3,41)
Silva, 2014	Itatiaiuçu Dam	3,70 (3,44-3,84)
Ferreira, 2016	Germano Dam, Bay 3 - Coarse Tailings	2,91
	Germano Dam, Bay 3 - Slimes	3,83
Morgenstem et al., 2016	Fundão Dam - Coarse Tailings	3,00 (2,38-4,34)
	Fundão Dam - Slimes	3,90 (3,69-3,99)
Carvalho, 2017	SD-02 Pile - Stored tailings	3,46 (2,55-4,10)
	Fernandinho Mine - Future tailings	3,11 (2,98-3,27)
Ferreira, 2018	Pontal Dam, Arm I	3,50 (3,23-3,99)
	Pontal Dam, Beach	3,34 (2,97-3,68)
Miranda, 2018	Forquilha I Dam	3,63 (2,74-4,29)
Mohallem, 2018	Serra Azul Mine	3,65 (3,41-3,84)
Lima and Abreu, 2020	Fundão Dam - Slimes	4,17
Robertson et al., 2019	Feijão Dam I - Historical Data - Coarse Tailings	4,60 (2,71-5,22)
	Feijão Dam I - Historical Data - Fine Tailings	4,21 (2,66-5,14)
	Feijão Dam I - Coarse Tailings	4,89 (4,64-4,99)
	Feijão Dam I - Fine Tailings	3,89 (3,87-3,90)
	Feijão Dam I - Slimes	3,97 (3,61-4,32)
	Feijão Dam I - Berm Fill (Tailings)	4,39 (4,10-4,93)
General	Average	3,75
	Standard Deviation	0,55
	Maximum	5,22
	Minimum	2,38
Tailings	Average	3,71
	Standard Deviation	0,58
	Maximum	5,22
	Minimum	2,38
Slimes	Average	3,97
	Standard Deviation	0,23
	Maximum	4,32
	Minimum	3,61

Fonte: Adaptado de Carneiro J. (2021).

Figura 5.4 – Limites de consistência de rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.

Author	Sample	Liquid Limit (LL)	Plastic Limit (PL)	Plasticity Index (PI)	Number of Samples	
					Non Plastic	Plastic
Silva, 2010	Feijão Dam I	NP/24 (18,2-33,3)	NP/17,9 (13,8-23,5)	NP/6,1 (4,3-9,8)	10	6
Silva, 2014	Itatiaiuçu Dam	NP	NP	NP	1	0
Ferreira, 2016	Germano Dam, Bay 3 - Coarse Tailings	NP	NP	NP	1	0
	Germano Dam, Bay 3 - Slimes	24,1	11,2	12,9	0	1
Morgenstem et al., 2016	Fundão Dam - Coarse Tailings	NP	NP	NP	1	0
	Fundão Dam - Slimes	27,1 (26,0-28,4)	17,4 (16,0-19,0)	9,7 (7,0-11,1)	0	3
Carvalho, 2017	Fernandinho Mine - Stored tailings	NP/16,7 (15,2-18,2)	NP/10,9 (9,3-12,4)	NP/5,9 (5,8-5,9)	13	2
	Fernandinho Mine - Future tailings	NP	NP	NP	6	0
Ferreira, 2018	Pontal Dam, Arm I	NP	NP	NP	0	14
	Portal Dam, Beach	NP/44,5 (21,0-62,0)	NP/22,5 (11,0-35,0)	NP/22,0 (10,0-31,0)	8	6
Miranda, 2018	Forquilha I Dam	NP/39,1 (24,5-53,7)	NP/25,2 (17,9-32,4)	NP/14,0 (6,6-21,3)	2	2
Mohallem, 2018	Serra Azul Mine	NP/20,0 (18,1-21,9)	NP/13,6 (12,3-14,9)	NP/6,4 (5,7-7,0)	2	2
Robertson et al., 2019	Feijão Dam I - Historical Data - Coarse Tailings	NP	NP	NP	15	0
	Feijão Dam I - Historical Data - Fine Tailings	NP/22,2 (18,0-30,0)	NP/16,8 (14,0-23,0)	NP/5,2 (4,0-7,0)	25	5
	Feijão Dam I - Coarse Tailings	NP	NP	NP	12	0
	Feijão Dam I - Fine Tailings	21,0 (19,0-22,0)	17,0 (16,0-18,0)	4,0 (3,0-4,0)	0	2
	Feijão Dam I - Slimes	43,0 (15,0-53,0)	25,4 (11,0-31,0)	17,7 (4,0-26,0)	0	15
	Feijão Dam I - Berm Fill (Tailings)	20,3 (16,0-29,0)	15,7 (14,0-18,0)	4,7 (1,0-11,0)	0	3
General	Average	27,9	18,1	9,8		
	Standard Deviation	9,6	5,1	5,8	108	49
	Maximum	62,0	35,0	31,0	(68,8%)	(31,2%)
	Minimum	15,0	9,3	1,0		
Tailings	Average	25,9	17,4	8,5		
	Standard Deviation	10,1	4,6	6,3	108	30
	Maximum	62,0	35,0	31,0	(78,3%)	(21,7%)
	Minimum	15,2	9,3	1,0		
Slimes	Average	31,4	18,0	13,4		
	Standard Deviation	10,2	7,1	4,0	0	19
	Maximum	53,0	31,0	26,0	(0%)	(100%)
	Minimum	15,0	11,0	4,0		

Tailings results are presented in the white lines and the slimes results are presented in the gray lines. Source: elaborated by the author.

Fonte: Adaptado de Carneiro J. (2021).

## 5.2. Ensaio de resistência das amostras que não foram submetidas ao processo de oxidação

Na Tabela 5.2 é apresentado um resumo dos ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> realizados, sendo que a Figura 5.9 à Figura 5.15 apresentam as trajetórias de tensão, com suas respectivas envoltórias de resistência, apresentadas no plano  $s' \times t$ . Todas as amostras foram ensaiadas a tensões confinantes de 100, 200, 400 e 800 kPa.

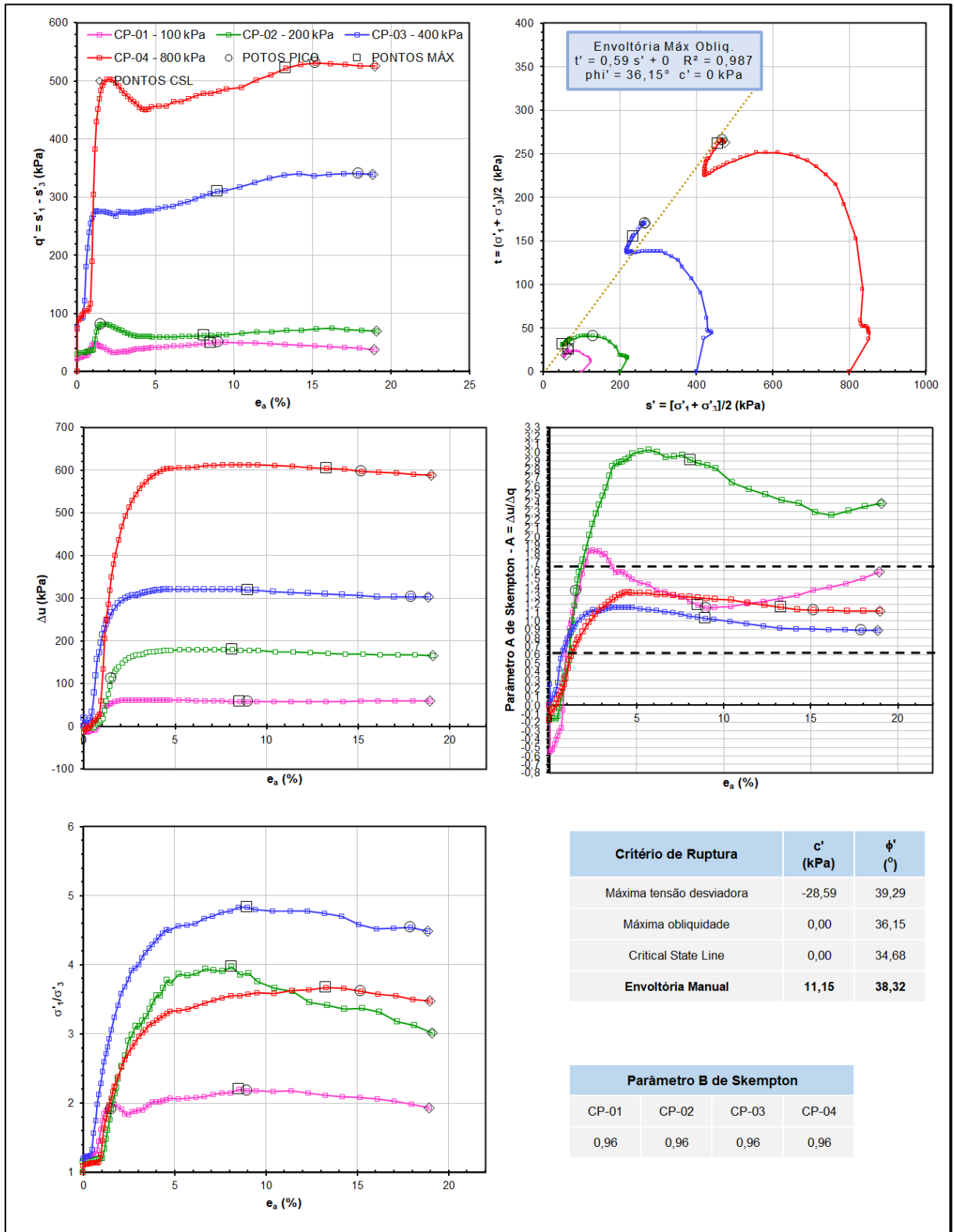
Tabela 5.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de resistência realizados.

Material	Amostra	CP	Tensão confinante (kPa)	Param B de Skempton	$e_0$	$e_r$	Parâmetros de resistência pico		Parâmetros de resistência pós pico			
							$C'$ (kPa)	$\Phi'$ (graus)	$C'$ (kPa)	$\Phi'$ (graus)		
Rejeito 01	Indeformada	CP1	100		0,85	0,83	0,71	0,0	36,32	0,0	36,15	
		CP2	200		0,86							0,76
		CP3	400		0,85							0,75
		CP4	800		0,76							0,7
Rejeito 01	Reconstituída	CP1	100		0,68	0,68	0,53	3,0	34,0	0,0	33,56	
		CP2	200		0,68							0,51
		CP3	400		0,68							0,54
		CP4	800		0,68							0,53
Rejeito 02	Indeformada	CP1	100	0,96	0,88	0,85	0,69	26,36	22,7	0,0	22,11	
		CP2	200	0,96	0,82							0,73
		CP3	400	0,96	0,80							0,66
		CP4	800	0,96	0,89							0,62
Rejeito 02	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,85	0,84	0,73	16,74	34,86	0,0	36,03	
		CP2	200	0,96	0,84							0,69
		CP3	400	0,96	0,84							0,73
		CP4	800	0,96	0,84							0,74
Rejeito 03	Reconstituída	CP1	100		0,85	0,85	0,76	9,98	36,56	0,0	36,19	
		CP2	200		0,85							0,75
		CP3	400		0,85							0,79
		CP4	800		0,85							0,76

Notas:  
 CP – Corpo de prova  
 $e_0$  – Índice de vazios inicial  
 $e_r$  – Índice de vazios após fase de adensamento  
 $C'$  – Intercepto coesivo efetivo  
 $\Phi'$  – Ângulo de atrito efetivo

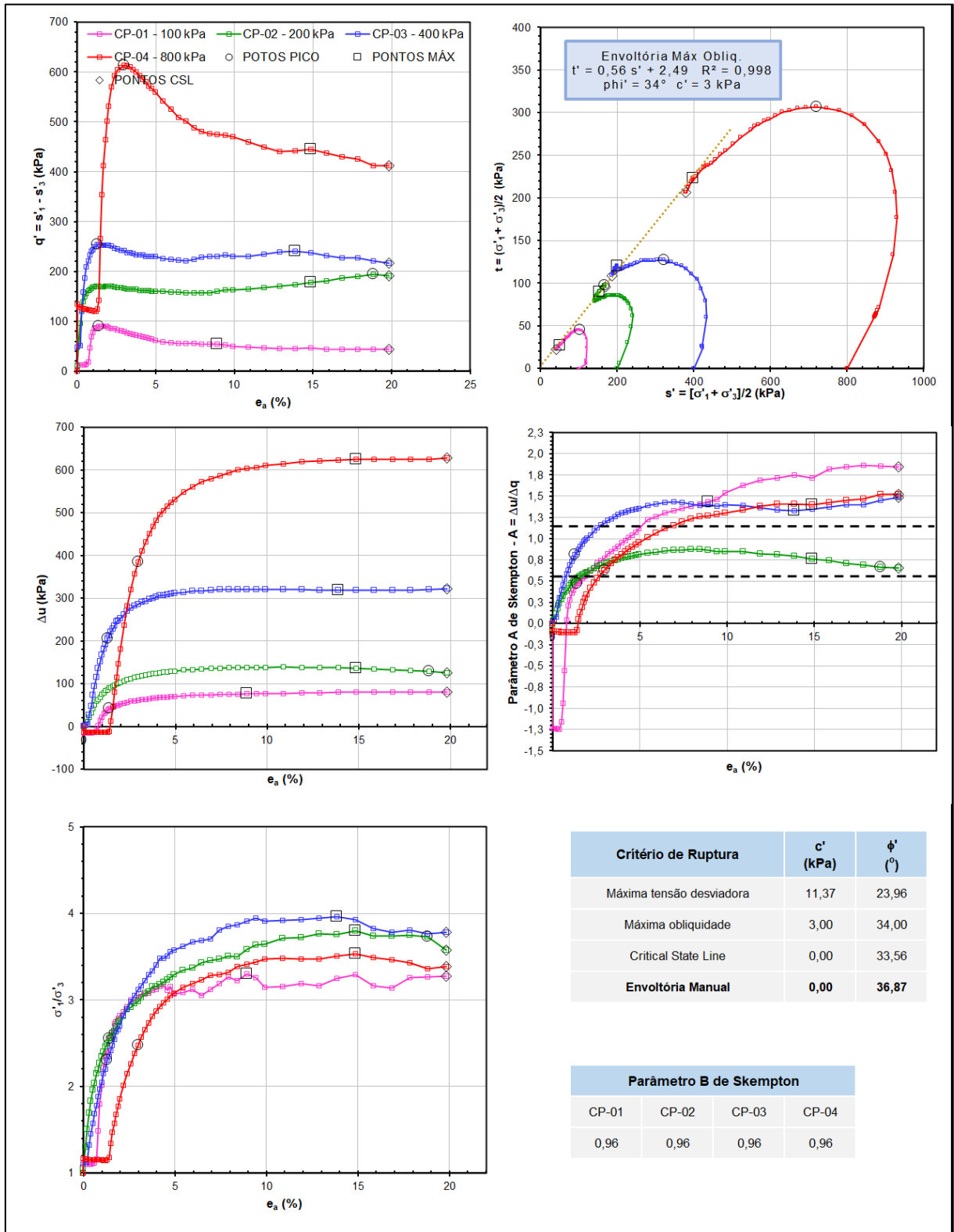
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.5 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 01, amostra indeformada, não submetida ao processo de oxidação.



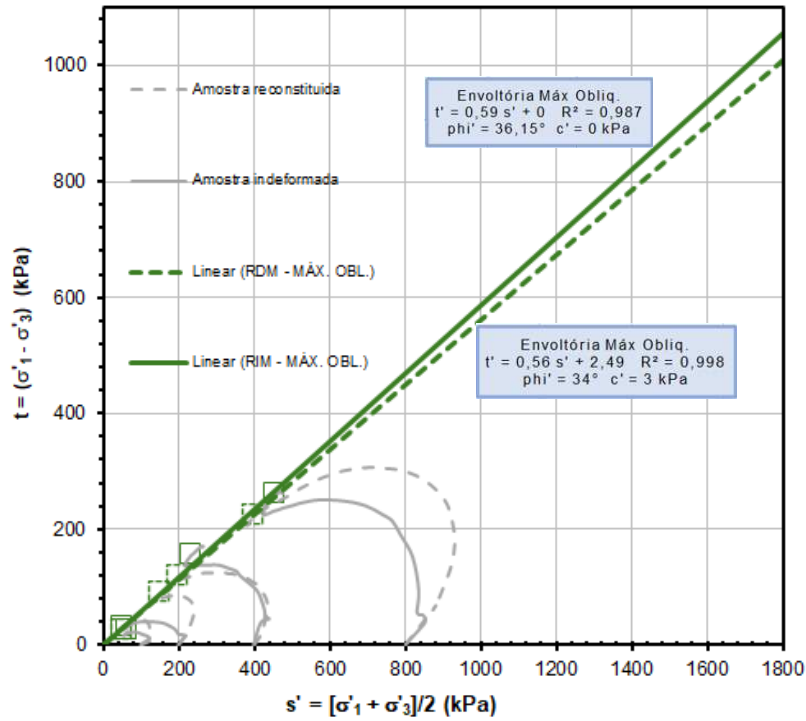
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.6 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 01, amostra reconstituída, não submetida ao processo de oxidação.



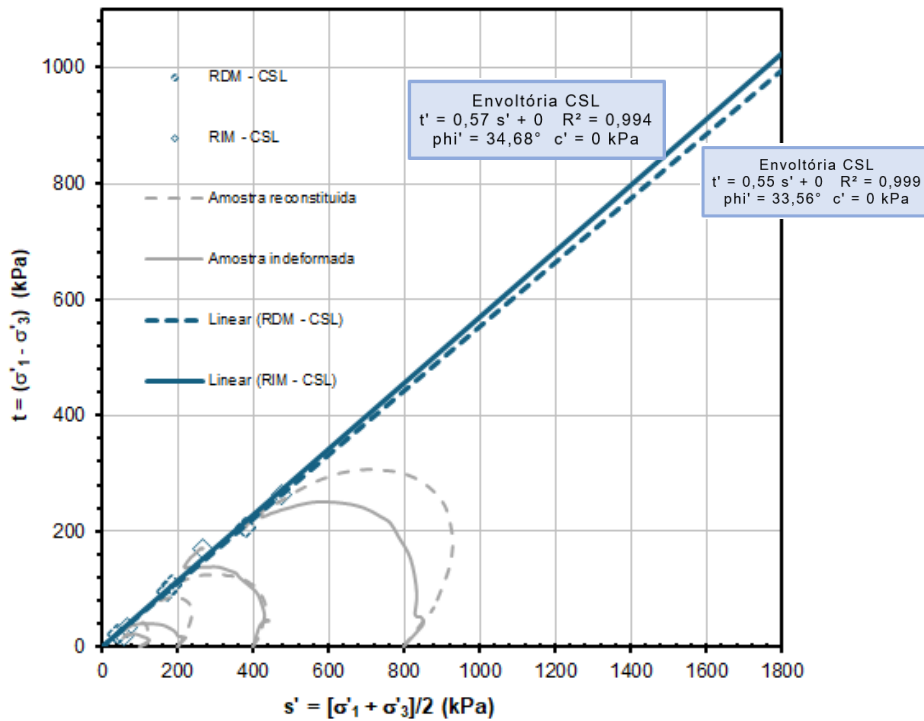
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.7 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória de pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.8 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória pós- pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.

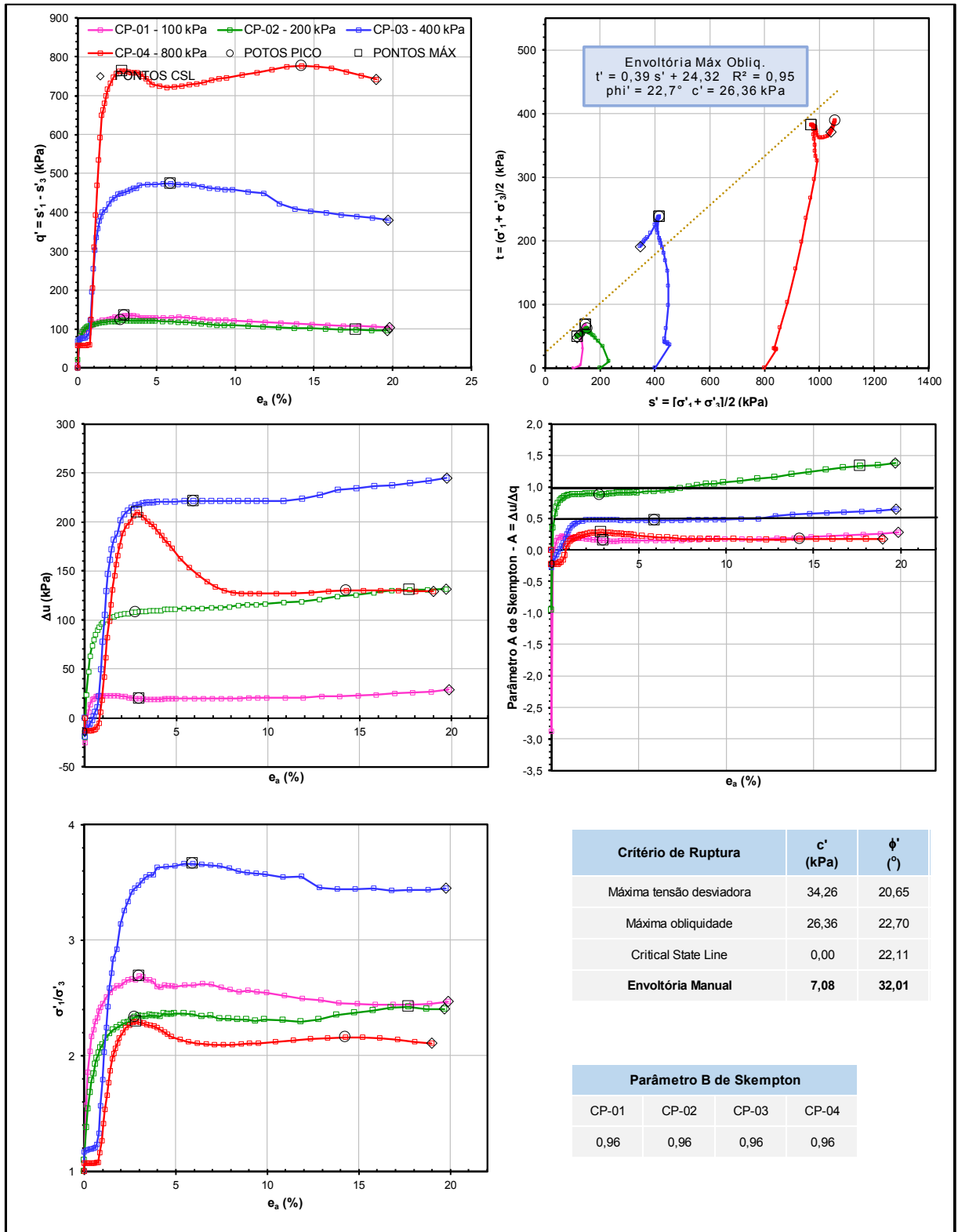


Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que, no geral, as amostras atingiram deformações axiais da ordem de 20%, sendo que não foram verificados picos de resistência bem definidos em todas as tensões confinantes analisadas. Desta forma os parâmetros de resistência de pico foram definidos pelo critério da máxima obliquidade. Não foi verificada estabilização das poropressões, tampouco das tensões desviadoras, o que indica dificuldade de se alcançar o estado crítico.

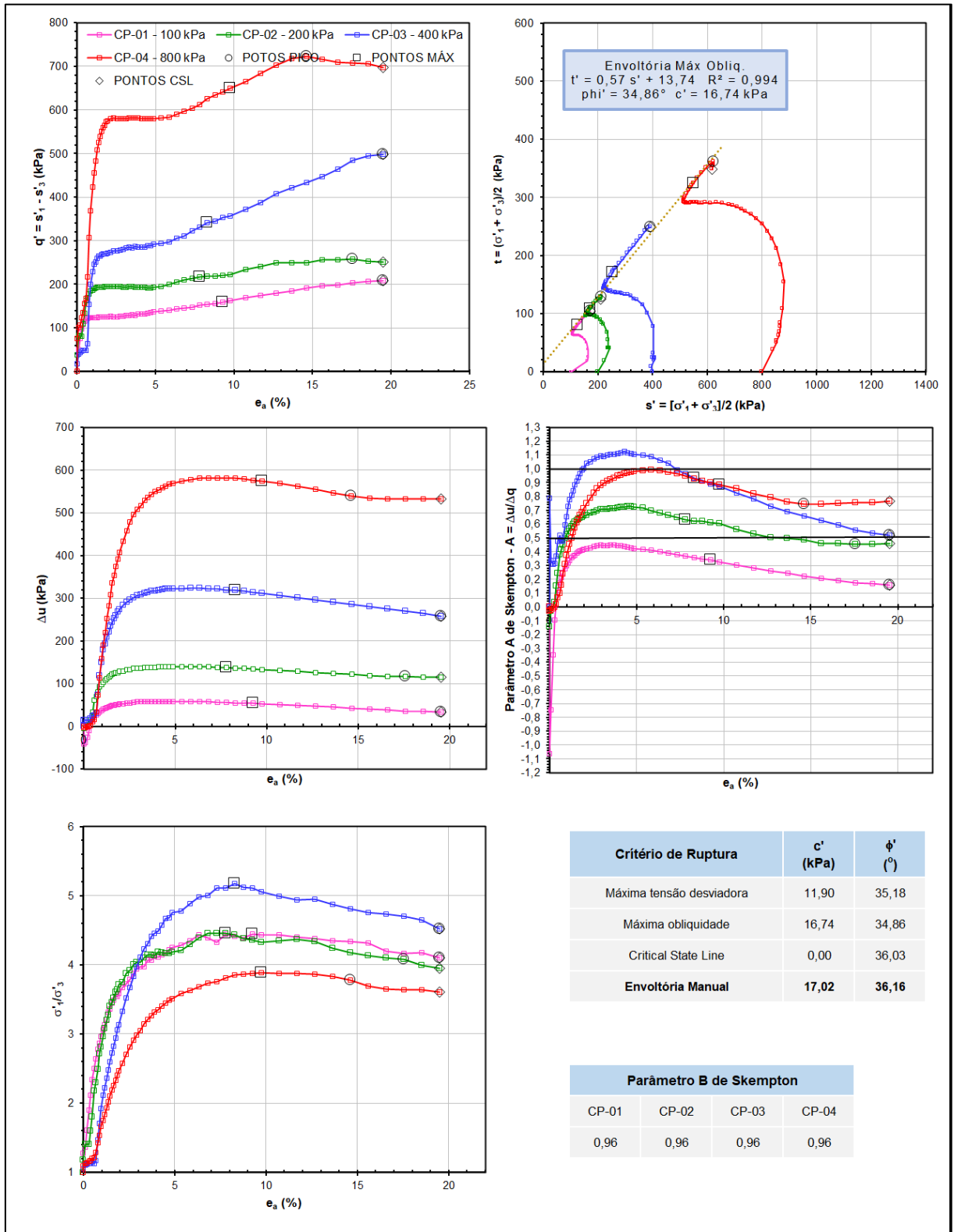
Os índices de vazios iniciais e após a fase de adensamento variaram muito entre as amostras indeformadas e reconstituídas, com valores médios de  $e_0$  igual a 0,83 e 0,68 e de  $e_c$  igual a 0,71 e 0,53, devido a um erro na reconstituição da amostra deformada. Todavia houve uma pequena variação do ângulo de atrito entre as amostras, sendo que a amostra reconstituída apresentou valores de resistência inferiores, tanto para a condição de pico quanto para a condição pós-pico, como pode ser observado na Figura 5.11 e Figura 5.12, o que não era esperado, em função da redução do seu índice de vazios. Ambas as amostras apresentaram comportamento contrátil.

Figura 5.9 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 02, amostra indeformada, não submetida ao processo de oxidação.



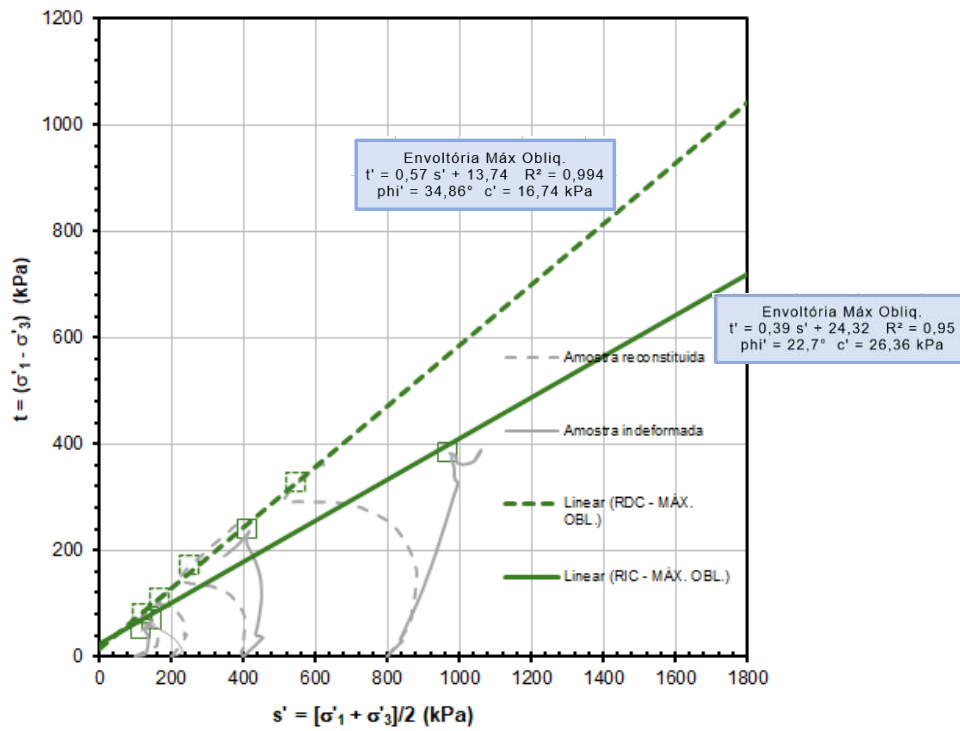
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.10 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 02, amostra reconstituída, não submetida ao processo de oxidação.



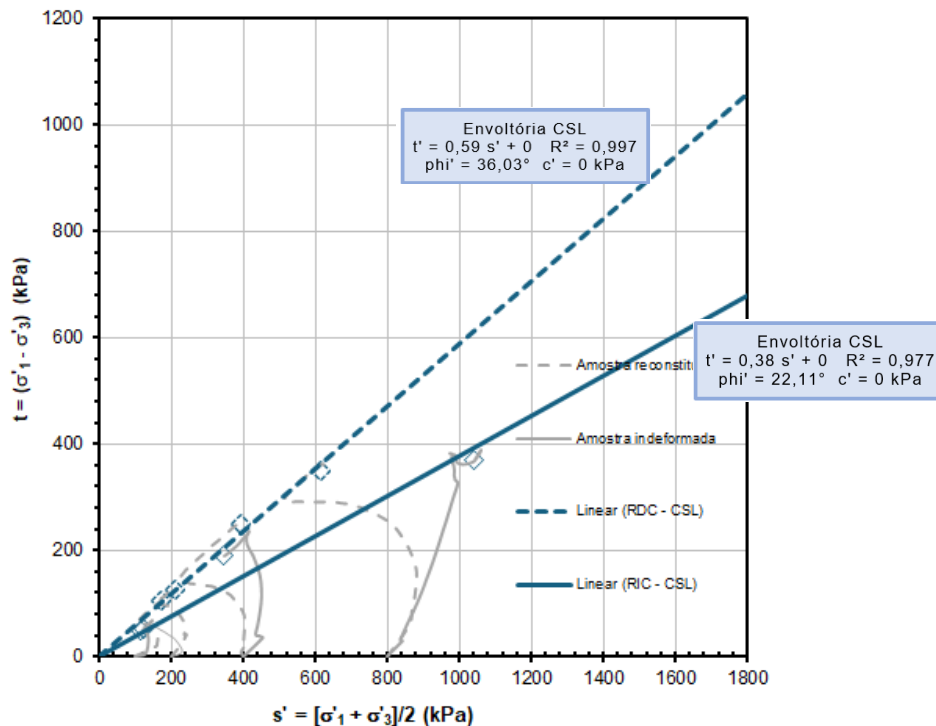
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.11 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória de pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.12 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória pós-pico - amostras não submetidas ao processo de oxidação.

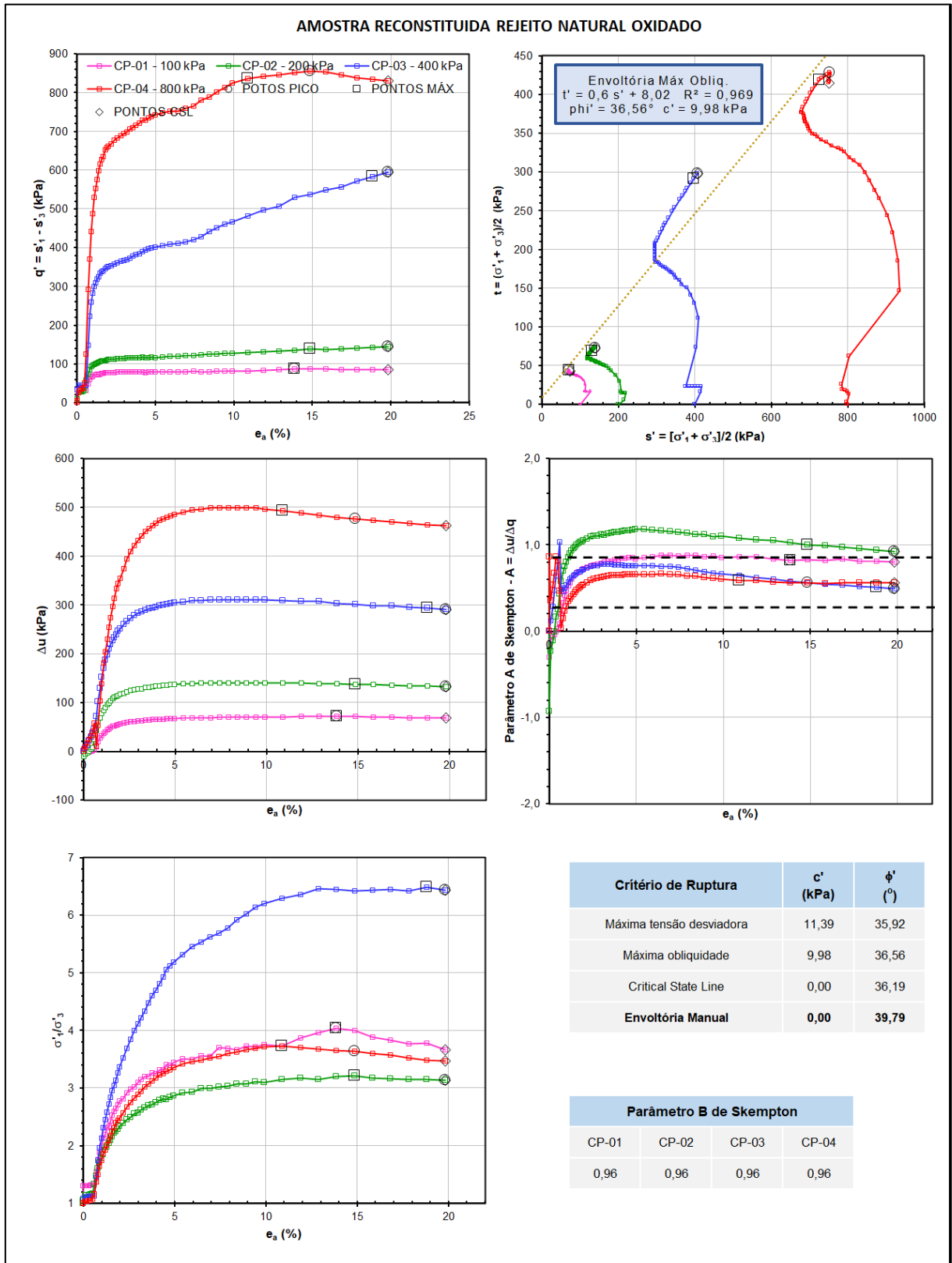


Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que, no geral, as amostras atingiram deformações axiais da ordem de 20%, sendo que não foram verificados picos de resistência bem definidos em todas as tensões confinantes analisadas. Desta forma, os parâmetros de resistência de pico foram definidos pelo critério da máxima obliquidade. Não foi verificada estabilização das poropressões, tampouco das tensões desviadoras, o que indica dificuldade de se alcançar o estado crítico.

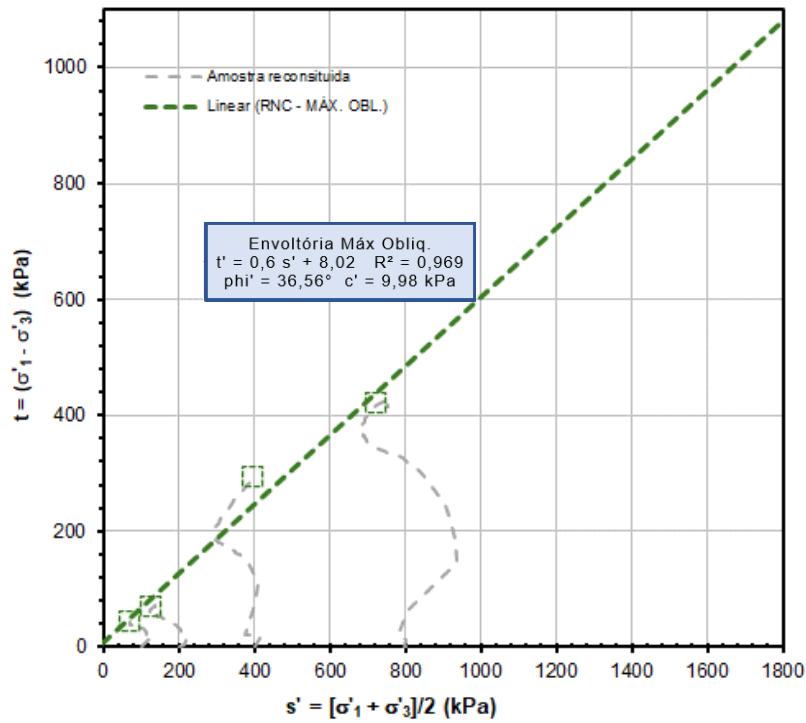
Os índices de vazios iniciais e após a fase de adensamento ficaram muito próximos entre as amostras indeformadas e reconstituídas, com valores médios de  $e_0$  igual a 0,85 e 0,84 e de  $e_c$  igual a 0,69 e 0,73. Todavia houve uma variação expressiva do ângulo de atrito e do intercepto coesivo entre as amostras, sendo que a amostra reconstituída apresentou valores de resistência mais elevados, tanto para a condição de pico quanto para a condição pós-pico, como pode ser observado na Figura 5.11 e Figura 5.12. As amostras reconstituídas apresentaram comportamento contrátil enquanto as reconstituídas apresentaram comportamento contrátil-dilatante a depender da tensão confinante.

Figura 5.13 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito natural, amostra reconstituída, não submetida ao processo de oxidação.



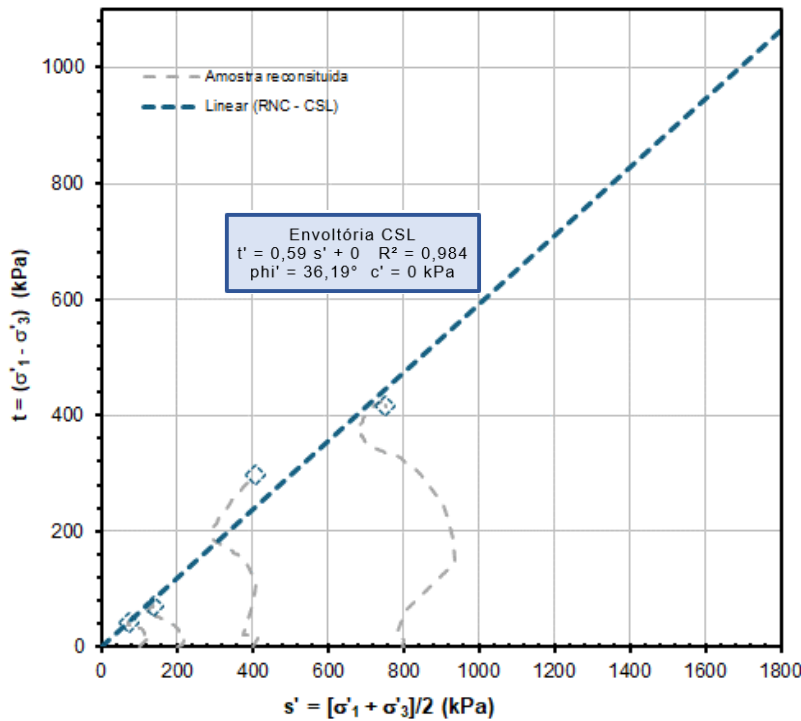
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.14 – Trajetórias de tensão rejeito natural – envoltória de pico - amostra não submetida ao processo de oxidação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.15 – Trajetórias de tensão rejeito natural – envoltória pós- pico- amostra não submetida ao processo de oxidação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que no geral a amostra atingiu deformações axiais da ordem de 20%, sendo que não foram verificados picos de resistência bem definidos em todas as tensões confinantes analisadas. Desta forma os parâmetros de resistência de pico foram definidos pelo critério da máxima obliquidade. Não foi verificada estabilização das poropressões, tampouco das tensões desviadoras, o que indica dificuldade de se alcançar o estado crítico.

Os índices de vazios iniciais e após a fase de adensamento apresentaram valores médios de  $e_0$  igual a 0,85 e de  $e_c$  igual a 0,76. Os corpos de prova apresentaram comportamento contrátil – dilatante, a depender da tensão de confinamento.

### 5.3. Testes de oxidação

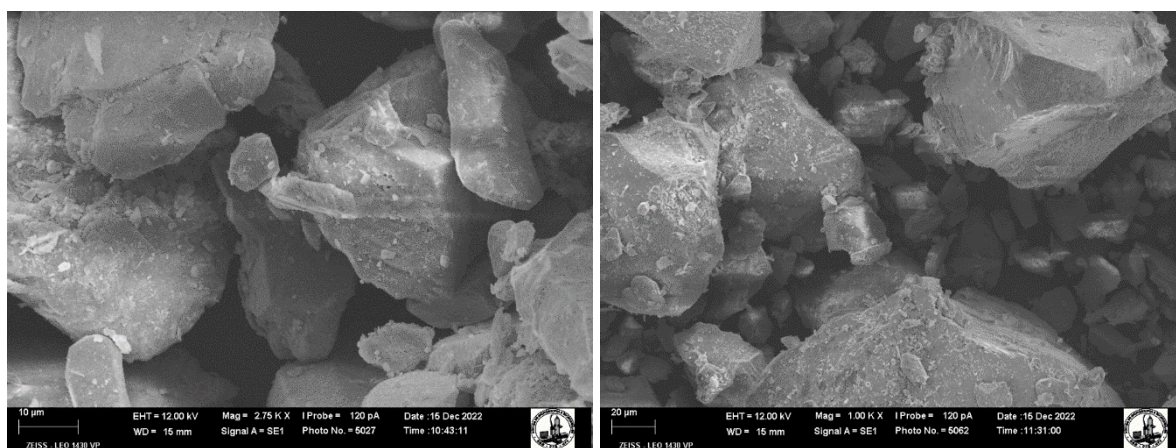
Os testes de oxidação realizados visam compreender o impacto da oxidação nas propriedades físicas e químicas dos rejeitos de minério de ferro. A oxidação desses rejeitos pode alterar

significativamente sua estabilidade e comportamento geomecânico devido à formação de óxidos de ferro que modificam as interações entre partículas. Para tal, foram utilizados ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) para identificar e quantificar os processos oxidativos.

As amostras foram submetidas a um processo de oxidação forçada utilizando peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), um agente oxidante eficiente. Posteriormente, foram analisadas por MEV-EDS para observar alterações morfológicas e composicionais. O equipamento MEV gerou imagens detalhadas das superfícies das amostras, enquanto o EDS forneceu dados quantitativos sobre a composição elementar antes e após a oxidação.

Na Figura 5.16 à Figura 5.18 são apresentadas imagens geradas pelo MEV, sendo possível comparar o processo oxidativo das amostras submetidas aos testes de oxidação, com as amostras prévias a tais testes.

Figura 5.16 - Amostra de rejeito 01 (a) anterior e (b) posterior ao processo de oxidação forçada.



Fonte: Autor

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados dos ensaios EDS na amostra de rejeito 01.

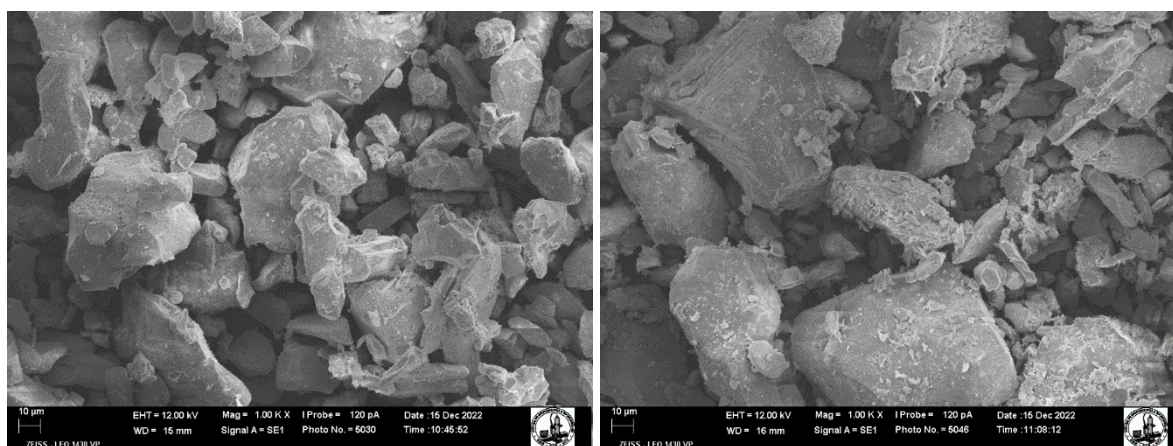
REJEITO 01					REJEITO 01 Oxidada				
Elemento químico	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Elemento químico	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
O	34,59	36,19	33,67	34,82	O	28,60	27,20	27,20	27,67
Al	10,40	10,52	11,39	10,77	Al	1,44	1,68	1,59	1,57
Si	16,19	13,61	12,98	14,26	Si	24,37	18,46	19,43	20,75
Mn	1,20	1,08	1,20	1,16	Mn	0,60	0,69	0,77	0,69
Fe	37,63	38,60	40,77	39,00	Fe	44,99	51,98	51,02	49,33

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela comparação das imagens apresentadas na Figura 5.16 é possível perceber que a amostra de rejeito 01 não teve muita alteração após realização do processo de oxidação forçada com a utilização de solução de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ainda menor do que do rejeito cinza.

Quando verificamos os dados mostrados na Tabela 5.3 o resultado dos ensaios de EDS realizados nas mesmas amostras, percebe-se um aumento na concentração de ferro foi ainda menor, com valor igual a 10,33%.

Figura 5.17 – Amostra de rejeito 02 (a) anterior e (b) posterior ao processo de oxidação forçada.



Fonte: Autor

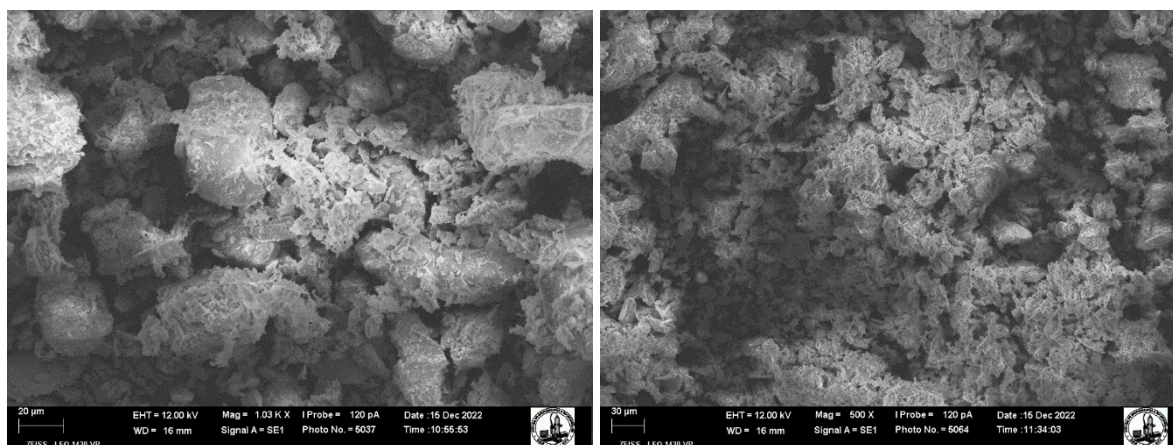
Tabela 5.4 – Resumo dos resultados dos ensaios EDS na amostra de rejeito 02.

REJEITO 02					REJEITO 02 OXIDADA				
Elemento químico	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Elemento químico	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
O	34,12	36,37	35,22	35,24	O	28,28	27,25	26,80	27,44
Al	10,57	10,51	10,52	10,54	Al	1,59	1,79	1,93	1,77
Si	16,14	16,96	16,55	16,55	Si	25,62	19,58	19,37	21,52
Mn	1,19	1,19	1,22	1,20	Mn	1,11	1,09	1,08	1,09
Fe	37,98	34,96	36,49	36,48	Fe	43,41	50,29	50,82	48,17

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela comparação das imagens apresentadas na Figura 5.17 é possível perceber que a amostra de rejeito 02 não teve muita alteração após realização do processo de oxidação forçada com a utilização de solução de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Quando verificamos os valores mostrados na Tabela 5.4 o resultado dos ensaios de EDS realizados nas mesmas amostras, percebe-se um aumento na concentração de ferro de 11,70%.

Figura 5.18 - Amostra de rejeito 03 (a) anterior e (b) posterior ao processo de oxidação forçada.



Fonte: Autor

Tabela 5.5 – Resumo dos resultados dos ensaios EDS na amostra de rejeito 03.

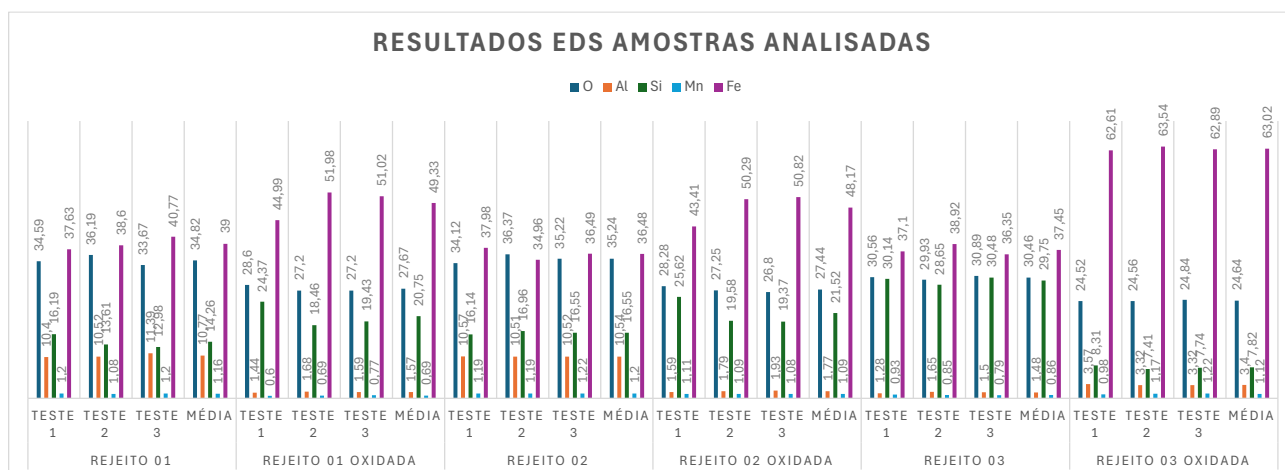
REJEITO 03					REJEITO 03 OXIDADA				
Elemento químico	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Elemento químico	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
O	30,56	29,93	30,89	30,46	O	24,52	24,56	24,84	24,64
Al	1,28	1,65	1,50	1,48	Al	3,57	3,32	3,32	3,40
Si	30,14	28,65	30,48	29,75	Si	8,31	7,41	7,74	7,82
Mn	0,93	0,85	0,79	0,86	Mn	0,98	1,17	1,22	1,12
Fe	37,10	38,92	36,35	37,45	Fe	62,61	63,54	62,89	63,02

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela comparação das imagens apresentadas na Figura 5.18 é possível perceber que a amostra de rejeito 03 foi a que apresentou maior alteração após realização do processo de oxidação forçada com a utilização de solução de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Quando se analisa os dados apresentados na Tabela 5.5, percebe-se um aumento na concentração de ferro igual a 25,56%, sendo o maior acréscimo de concentração de ferro dos três rejeitos (rejeito 01, rejeito 02 e rejeito 03).

Figura 5.19 – Resumo dos resultados dos ensaios de EDS para as amostras analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

As imagens MEV mostraram que as amostras oxidadas exibiram superfícies mais rugosas e a presença de precipitados, provavelmente óxidos de ferro, como evidenciado nas Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18.

Como pode ser observado na Figura 5.19, a oxidação resultou em um aumento notável na concentração de ferro nas amostras, especialmente na amostra de rejeito 03, que apresentou a maior variação de 2556%. Este aumento na concentração de ferro é indicativo da formação de óxidos de ferro, corroborando a eficácia do  $H_2O_2$  como agente oxidante.

Os resultados obtidos dos ensaios de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) fornecem informações valiosas sobre a oxidação dos rejeitos de minério de ferro.

Na Tabela 5.5, observa-se um aumento significativo na concentração de ferro nas amostras analisadas. Especificamente, o rejeito 03 apresentou um aumento de 25,56% na concentração de ferro, o maior entre os três tipos de rejeito (rejeito 01, rejeito 02 e rejeito 03). Esse incremento é um indicativo claro dos processos de oxidação, que resultaram na formação de óxidos de ferro.

O aumento na concentração de ferro nas amostras oxidadas sugere que o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) utilizado como agente oxidante foi eficaz em promover a oxidação dos minerais ferrosos presentes nos rejeitos. A alta reatividade do  $H_2O_2$  facilita a formação de radicais hidroxila ( $OH\cdot$ ), que são agentes oxidantes potentes, capazes de converter íons ferrosos ( $Fe^{2+}$ ) em íons férricos ( $Fe^{3+}$ ), levando à formação de óxidos de ferro.

As imagens obtidas por MEV revelam que as amostras oxidadas exibem superfícies mais rugosas e a presença de precipitados, que são provavelmente óxidos de ferro. Nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, essas características são claramente visíveis. As superfícies rugosas e a presença de precipitados são típicas de materiais que sofreram processos de oxidação.

Essas observações corroboram os resultados de EDS, indicando que a oxidação levou à formação de novos compostos na superfície das partículas dos rejeitos. A presença de óxidos de ferro é particularmente importante porque esses compostos podem alterar as propriedades físicas e químicas dos rejeitos. Por exemplo, a formação de óxidos de ferro pode aumentar a porosidade e a rugosidade das partículas, o que pode influenciar a permeabilidade e a estabilidade dos rejeitos.

O aumento de 25,56% na concentração de ferro na amostra de rejeito 03 é particularmente notável. Esse resultado pode ser atribuído a várias razões:

- **Composição Inicial do Rejeito:** O rejeito 03 pode ter uma composição inicial que facilita a oxidação, com uma maior quantidade de minerais ferrosos disponíveis para reação.
- **Condições de Oxidação:** As condições específicas sob as quais o  $H_2O_2$  foi aplicado à amostra de rejeito 03 podem ter sido mais favoráveis à oxidação, como um pH mais adequado ou uma melhor penetração do oxidante.

Os resultados obtidos têm várias implicações para a gestão dos rejeitos de minério de ferro:

- **Estabilidade dos Rejeitos:** A formação de óxidos de ferro pode afetar a estabilidade física dos rejeitos. Óxidos de ferro podem ter propriedades mecânicas diferentes dos minerais originais, o que pode influenciar a resistência ao cisalhamento e a estabilidade das barragens de rejeitos.
- **Reatividade Química:** A maior concentração de ferro oxidado pode aumentar a reatividade química dos rejeitos, especialmente em termos de potencial de drenagem ácida. É essencial monitorar esses parâmetros para evitar impactos ambientais adversos.
- **Gestão de Rejeitos:** A compreensão dos processos de oxidação é crucial para desenvolver estratégias de manejo que minimizem os riscos associados. Por exemplo, a aplicação de coberturas que limitem a exposição ao oxigênio pode ser uma estratégia eficaz para reduzir a oxidação.

Os ensaios de EDS e MEV forneceram *insights* importantes sobre a oxidação dos rejeitos de minério de ferro. O aumento na concentração de ferro, especialmente na amostra de rejeito 03, destaca a eficácia do  $H_2O_2$  como agente oxidante. As mudanças observadas nas imagens de MEV confirmam a formação de óxidos de ferro, que podem influenciar significativamente as propriedades físicas e químicas dos rejeitos. Esses resultados são fundamentais para a gestão sustentável dos rejeitos e para a mitigação dos riscos ambientais associados à oxidação.

#### 5.4. Caracterização física das amostras após processo de oxidação

As propriedades físicas das amostras ensaiadas, posteriores ao processo de oxidação forçada, são apresentadas na Tabela 5.6, enquanto as curvas de distribuição granulométricas das três

amostras, antes e após os testes de oxidação forçada, são apresentadas na Figura 5.21 à Figura 5.22.

Tabela 5.6 – Características físicas das amostras ensaiadas.

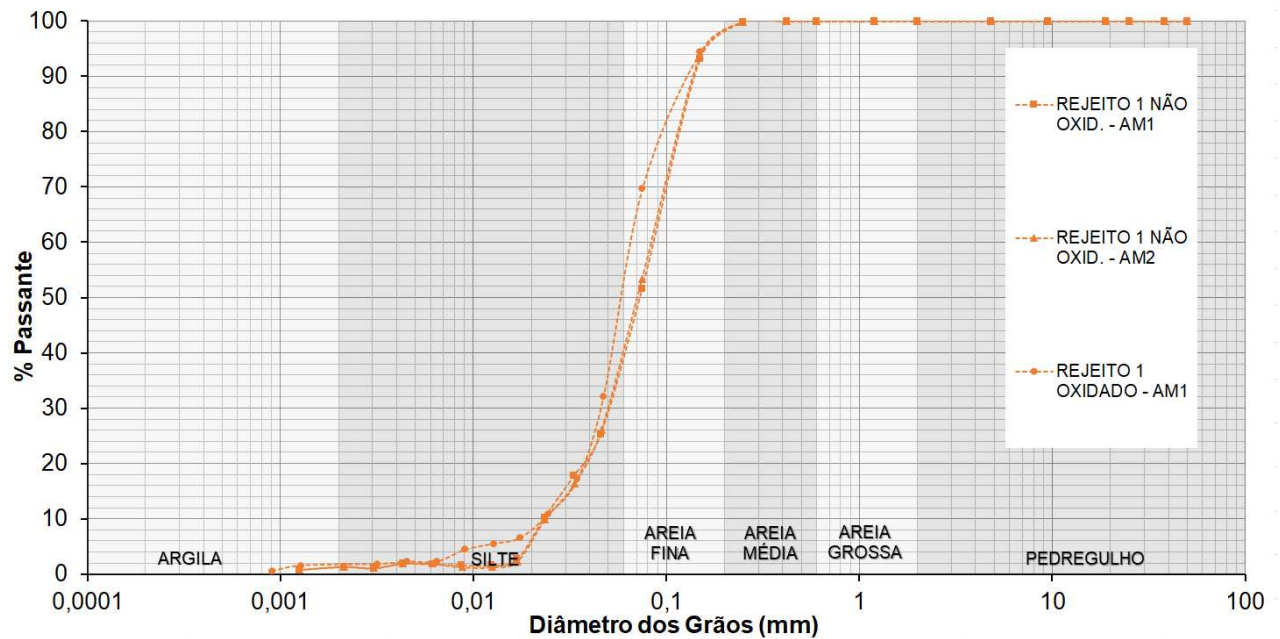
Material	Ensaio	Descrição material	$\delta_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Análise Granulométrica (ASTM D 6913 – 04)						Limites									
				Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedreg. (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	D <sub>60</sub> mm	D <sub>10</sub> mm	D <sub>30</sub> mm	D <sub>50</sub> mm	Finos <sup>1</sup> (%)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
REJEITO 01	AM1	Rej. Marrom	3,07	1,30	39,20	57,50	2,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,085	0,023	0,05	0,075	40	3,70	1,28
REJEITO 01	AM2	Rej. Marrom	3,07	1,35	40,15	56,70	1,80	0,00	0,00	NL	NP	-	0,082	0,023	0,05	0,07	40	3,57	1,33
REJEITO 01	AM2	Rej. Marrom oxidado	3,05	1,90	51,10	45,20	1,80	0,00	0,00	NL	NP	-	0,065	0,023	0,046	0,059	64	2,83	1,42
REJEITO 02	AM1	Rej. Cinza	3,49	1,35	68,65	29,00	1,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,052	0,018	0,03	0,045	68	2,89	0,96
REJEITO 02	AM2	Rej. Cinza	3,49	2,30	65,70	32,00	0,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,055	0,022	0,032	0,046	68	2,50	0,85
REJEITO 02	AM1	Rej. Cinza oxidado	3,42	2,45	75,55	22,00	0,00	0,00	0,00	NL	NP	-	0,046	0,016	0,028	0,039	84	2,88	1,07
REJEITO 03	AM1	Rej. Natural	3,33	11,68	49,12	29,2	7,56	1,56	0,88	NL	NP	-	0,058	0,0012	0,013	0,032	62	48,33	2,43
REJEITO 03	AM1	Rej. Natural oxidado	3,30	16	56	24,2	1,7	2,1	0	NL	NP	-	0,046	0,0008	0,011	0,032	78	57,50	3,29

Nota 1: Material passante na peneira #200

$\delta_s$  – Massa específica dos Grãos. LP – Limite de Plasticidade IP – Índice de Plasticidade. LL – Limite de Liquidez NL - Limite de Liquidez não Definido NP - Não Plástico C<sub>u</sub> – Coeficiente de Uniformidade C<sub>c</sub>=D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub> C<sub>c</sub> – Coeficiente de curvatura C<sub>c</sub>=D<sub>50</sub><sup>2</sup>/D<sub>60</sub>D<sub>10</sub>

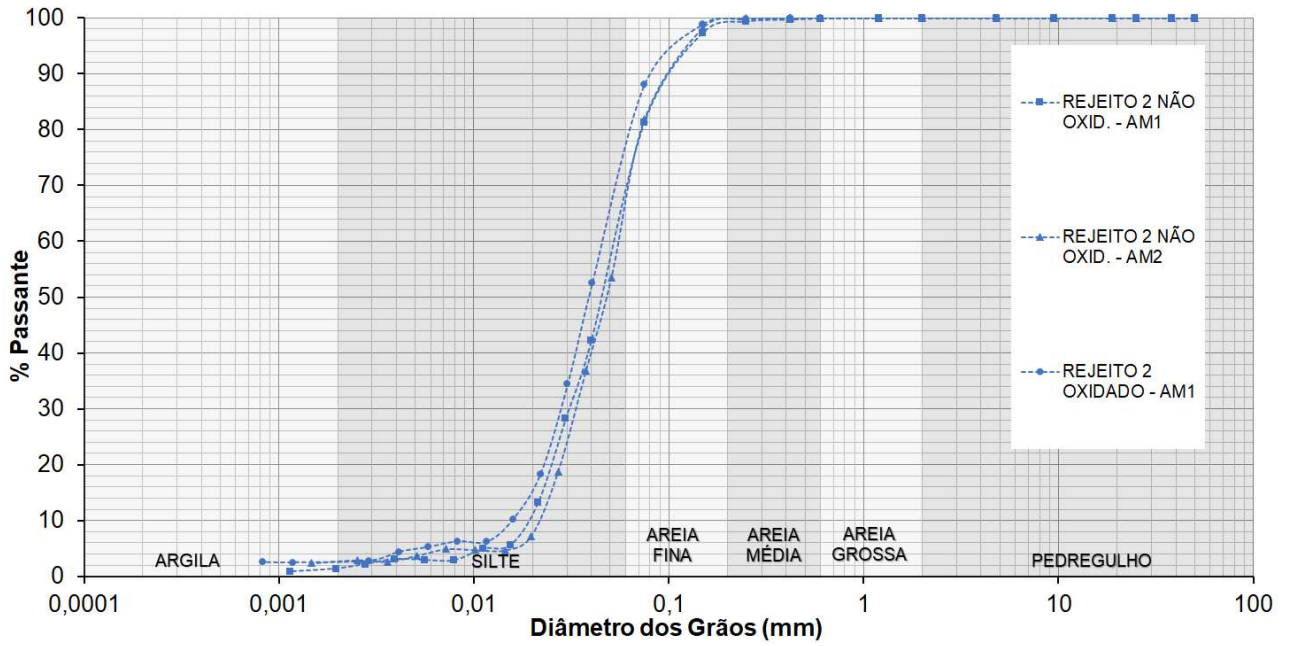
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.20 – Curvas granulométricas rejeito 01.



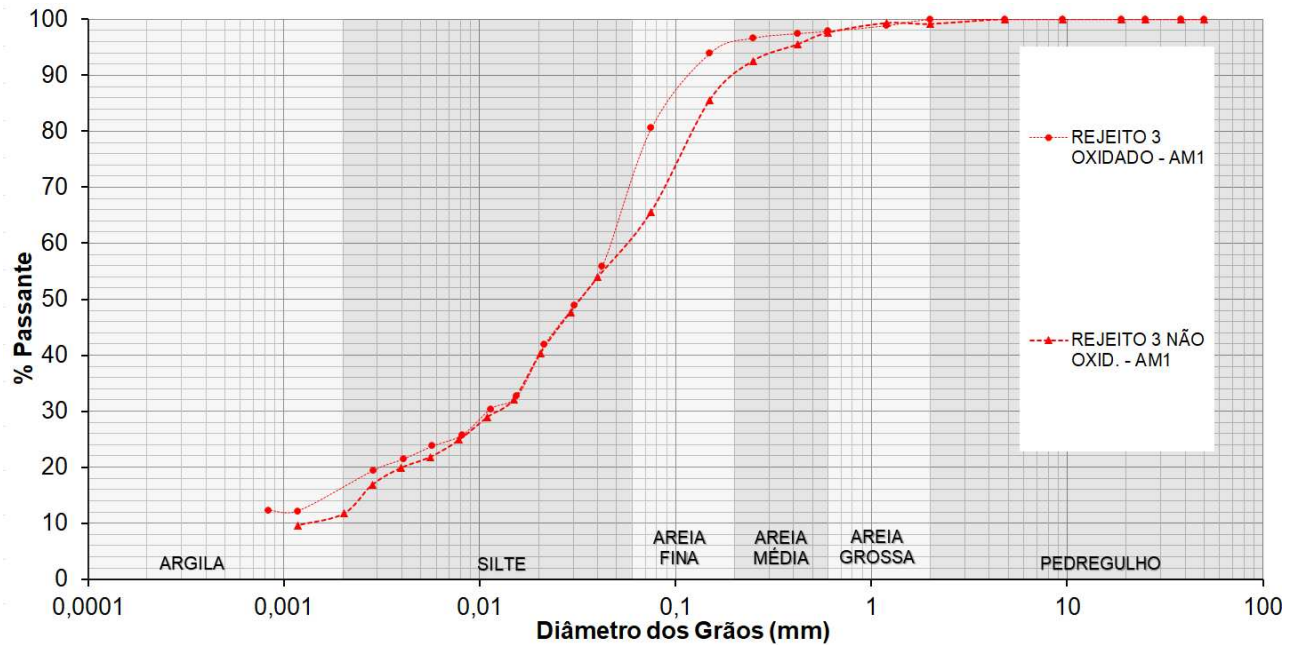
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.21 – Curvas granulométricas rejeito 02.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.22 – Curvas granulométricas rejeito natural.



Fonte: Elaborado pelo autor

A amostra oxidada do rejeito 01 também apresentou um leve deslocamento para a esquerda, o que é esperado após a ocorrência de um processo de oxidação. O material ainda apresenta características de um solo silto arenoso, possuindo ainda uma distribuição uniforme, porém com uma leve redução do  $C_U$  (coeficiente de uniformidade), apresentando um valor de 2,83. Em relação ao coeficiente de curvatura, a amostra passa a ser bem graduada, com valor de  $C_C$  entre 1,0 e 3,0. O  $D_{50}$  apresentou um valor de 0,059.

A amostra oxidada do rejeito 02 apresentou um leve deslocamento para a esquerda, o que é esperado após a ocorrência de um processo de oxidação. O material ainda apresenta características de um solo arenoso siltoso, possuindo ainda uma distribuição uniforme, porém com uma leve redução do  $C_U$  (coeficiente de uniformidade), apresentando um valor de 2,88. Em relação ao coeficiente de curvatura, a amostra passa a ser bem graduada, com valor de  $C_C$  entre 1,0 e 3,0. O  $D_{50}$  apresentou um valor de 0,039.

A amostra oxidada do rejeito 03 foi a que apresentou maior deslocamento para a esquerda, o que é esperado, pois foi a amostra que sofreu maior processo de oxidação. O material ainda apresenta características de um solo silto arenoso, possuindo ainda uma distribuição uniforme, porém com uma elevação do  $C_U$  (coeficiente de uniformidade), apresentando um valor de 57,50. Em relação ao coeficiente de curvatura, a amostra passa a ser mal graduada, com valor de  $C_C$  acima de 3,0. O  $D_{50}$  apresentou um valor de 0,032.

A análise comparativa dos rejeitos antes e após a oxidação demonstra que o processo oxidativo influencia significativamente as propriedades granulométricas dos materiais. As amostras de rejeito 01 e 02 mantiveram uma boa uniformidade na distribuição das partículas, enquanto a amostra de rejeito 03 sofreu maior impacto, evidenciado pelo aumento do  $C_U$  e pela classificação como mal graduada.

A oxidação forçada com  $H_2O_2$  resultou em mudanças distintas nas propriedades granulométricas dos rejeitos de minério de ferro. A amostra de rejeito 03, que sofreu maior grau de oxidação, apresentou mudanças mais pronunciadas, indicando a necessidade de uma gestão cuidadosa destes materiais para prevenir problemas de estabilidade e garantir a segurança das barragens de rejeito. A utilização de técnicas avançadas como o MEV-EDS foi fundamental para a caracterização detalhada dessas alterações.

### **Rejeito 01 (Marrom)**

A amostra oxidada do rejeito 01 apresentou um leve deslocamento para a esquerda, indicando um aumento na quantidade de partículas finas (silte) e uma leve redução na fração de areia fina. Essa mudança granulométrica resulta em uma diminuição do Coeficiente de Uniformidade (Cu), passando para 2,83, e um valor do Coeficiente de Curvatura (Cc) que indica uma melhor graduação entre 1,0 e 3,0. O D50 reduziu para 0,059 mm, sugerindo um material mais fino e homogêneo.

A oxidação promove a fragmentação das partículas maiores em partículas menores, aumentando a fração de silte. Isso pode influenciar a permeabilidade e a compacidade dos rejeitos, tornando-os mais suscetíveis a deformações.

### **Rejeito 02 (Cinza)**

A amostra oxidada do rejeito 02 também apresentou um leve deslocamento para a esquerda, com um aumento na fração de silte e uma leve redução na fração de areia fina. O Cu reduziu para 2,88, enquanto o Cc ficou dentro do intervalo ideal de graduação entre 1,0 e 3,0. O D50 apresentou um valor de 0,039 mm.

Similar ao rejeito 01, o processo de oxidação promove a desagregação das partículas, aumentando a fração de partículas finas. Isso pode afetar a estabilidade e a drenagem dos rejeitos, necessitando de medidas para gerenciar a reatividade química.

### **Rejeito 03 (Natural)**

A amostra oxidada do rejeito 03 foi a que apresentou o maior deslocamento para a esquerda, com um aumento significativo na fração de partículas finas e uma notável alteração na curva granulométrica. O Cu aumentou para 57,50, indicando uma distribuição de tamanho de partículas mais ampla, enquanto o Cc passou a ser maior que 3,0, classificando-o como mal graduado. O D50 foi de 0,032 mm.

O maior impacto da oxidação no rejeito 03 pode ser atribuído à sua composição inicial e às condições de oxidação. A fragmentação extensa das partículas maiores em menores aumenta a

susceptibilidade à liquefação e reduz a estabilidade estrutural. Essas mudanças destacam a necessidade de estratégias de manejo rigorosas para evitar problemas de estabilidade.

A análise comparativa dos rejeitos antes e após a oxidação demonstra que o processo oxidativo influencia significativamente as propriedades granulométricas dos materiais. As amostras de rejeito 01 e 02 mantiveram uma boa uniformidade na distribuição das partículas, enquanto a amostra de rejeito 03 sofreu maior impacto, evidenciado pelo aumento do Cu e pela classificação como mal graduada.

A oxidação forçada com  $H_2O_2$  resultou em mudanças distintas nas propriedades granulométricas dos rejeitos de minério de ferro. A amostra de rejeito 03, que sofreu maior grau de oxidação, apresentou mudanças mais pronunciadas, indicando a necessidade de uma gestão cuidadosa destes materiais para prevenir problemas de estabilidade e garantir a segurança das barragens de rejeito. A utilização de técnicas avançadas como o MEV-EDS foi fundamental para a caracterização detalhada dessas alterações.

### 5.5. Ensaio de resistência das amostras após testes de oxidação

Na Tabela 5.7 é apresentado um resumo dos ensaios triaxiais  $CIU_{SAT}$  realizados após realização dos testes de oxidação forçada, sendo que da Figura 5.26 à Figura 5.31 apresentam-se as trajetórias de tensão, com suas respectivas envoltórias de resistência, apresentadas no plano  $s'$  x  $t$ . Todas as amostras foram ensaiadas a tensões confinantes de 100, 200, 400 e 800 kPa.

Tabela 5.7 – Resumo dos resultados dos ensaios de resistência realizados pós testes de oxidação forçada.

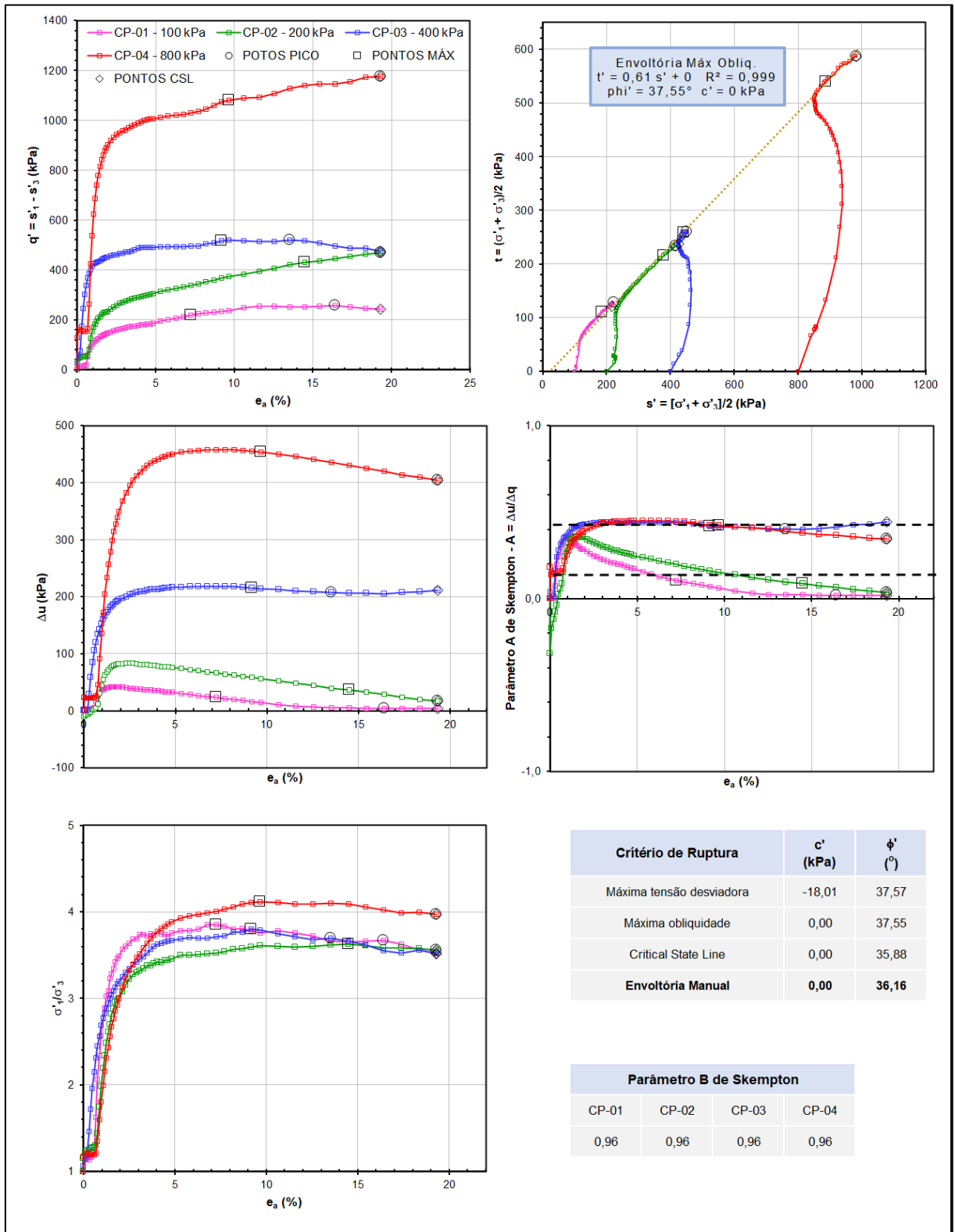
Material	Amostra	CP	Tensão confinante (kPa)	Parâmetro B de Skempton	$e_0$	$e_r$		Parâmetros de resistência pico		Parâmetros de resistência pós pico		
								$C'$ (kPa)	$\Phi'$ (graus)	$C'$ (kPa)	$\Phi'$ (graus)	
Rejeito 01	Indeformada	CP1	100	0,96	0,85	0,83	0,76	0,71	0,0	36,32	0,0	36,15
		CP2	200	0,96	0,86		0,75					
		CP3	400	0,96	0,85		0,7					
		CP4	800	0,96	0,76		0,65					
Rejeito 01	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,68	0,68	0,51	0,53	3,0	34,0	0,0	33,56
		CP2	200	0,96	0,68		0,54					

Material	Amostra	CP	Tensão confinante (kPa)	Parâmetro B de Skempton	$e_0$	$e_r$	Parâmetros de resistência pico		Parâmetros de resistência pós pico			
							$C'$ (kPa)	$\Phi'$ (graus)	$C'$ (kPa)	$\Phi'$ (graus)		
		CP3	400	0,96	0,68		0,53					
		CP4	800	0,96	0,68		0,54					
Rejeito 01 oxidado	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,74	0,75	0,61	0,63	0,0	37,55	0,0	35,88
		CP2	200	0,96	0,75		0,64					
		CP3	400	0,96	0,75		0,64					
		CP4	800	0,96	0,75		0,62					
Rejeito 02	Indeformada	CP1	100	0,96	0,88	0,85	0,73	0,69	26,36	22,7	0,0	22,11
		CP2	200	0,96	0,82		0,66					
		CP3	400	0,96	0,80		0,62					
		CP4	800	0,96	0,89		0,75					
Rejeito 02	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,85	0,84	0,69	0,73	16,74	34,86	0,0	36,03
		CP2	200	0,96	0,84		0,73					
		CP3	400	0,96	0,84		0,74					
		CP4	800	0,96	0,84		0,78					
Rejeito 02 oxidado	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,84	0,84	0,67	0,71	0	44,32	0,0	37,85
		CP2	200	0,96	0,84		0,69					
		CP3	400	0,96	0,84		0,73					
		CP4	800	0,96	0,84		0,76					
Rejeito 03	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,85	0,85	0,75	0,76	9,98	36,56	0,0	36,19
		CP2	200	0,96	0,85		0,79					
		CP3	400	0,96	0,85		0,76					
		CP4	800	0,96	0,85		0,72					
Rejeito 03 oxidado	Reconstituída	CP1	100	0,96	0,88	0,88	0,82	0,78	0	35,44	0,0	33,68
		CP2	200	0,96	0,87		0,71					
		CP3	400	0,96	0,88		0,74					
		CP4	800	0,96	0,89		0,87					

Notas:  
CP – Corpo de prova  
 $e_0$  – Índice de vazios inicial  
 $e_r$  – Índice de vazios após fase de adensamento  
 $C'$  – Intercepto coesivo efetivo  
 $\Phi'$  – Ângulo de atrito efetivo

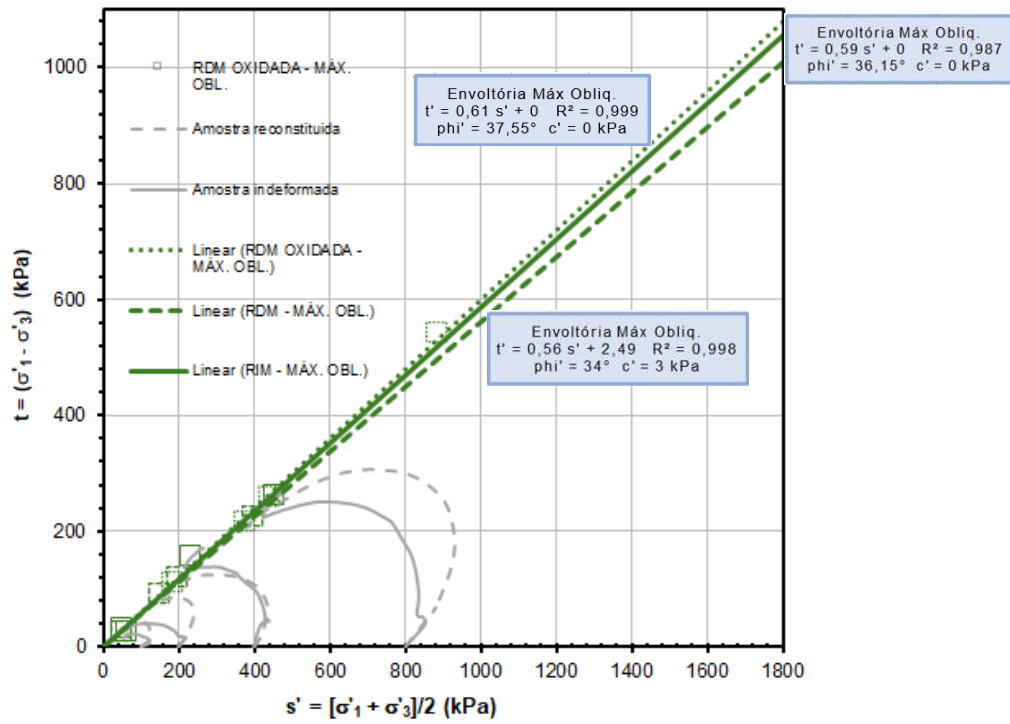
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.23 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 01 oxidado, amostra reconstituída.



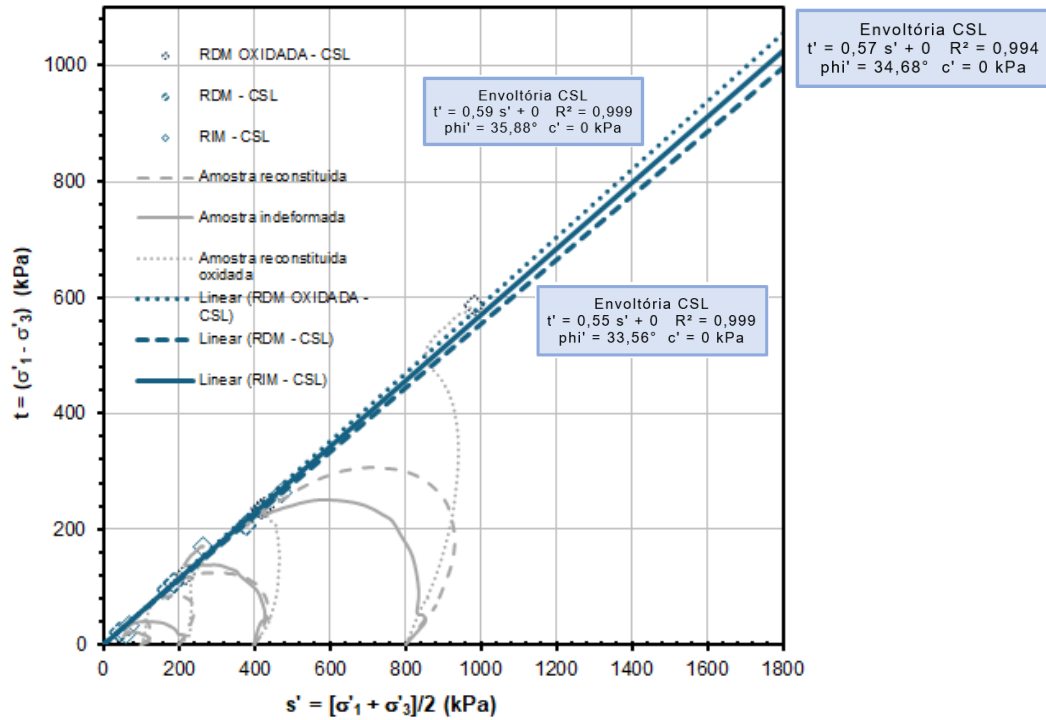
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.24 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória de pico.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.25 – Trajetórias de tensão rejeito 01 – envoltória pós- pico.

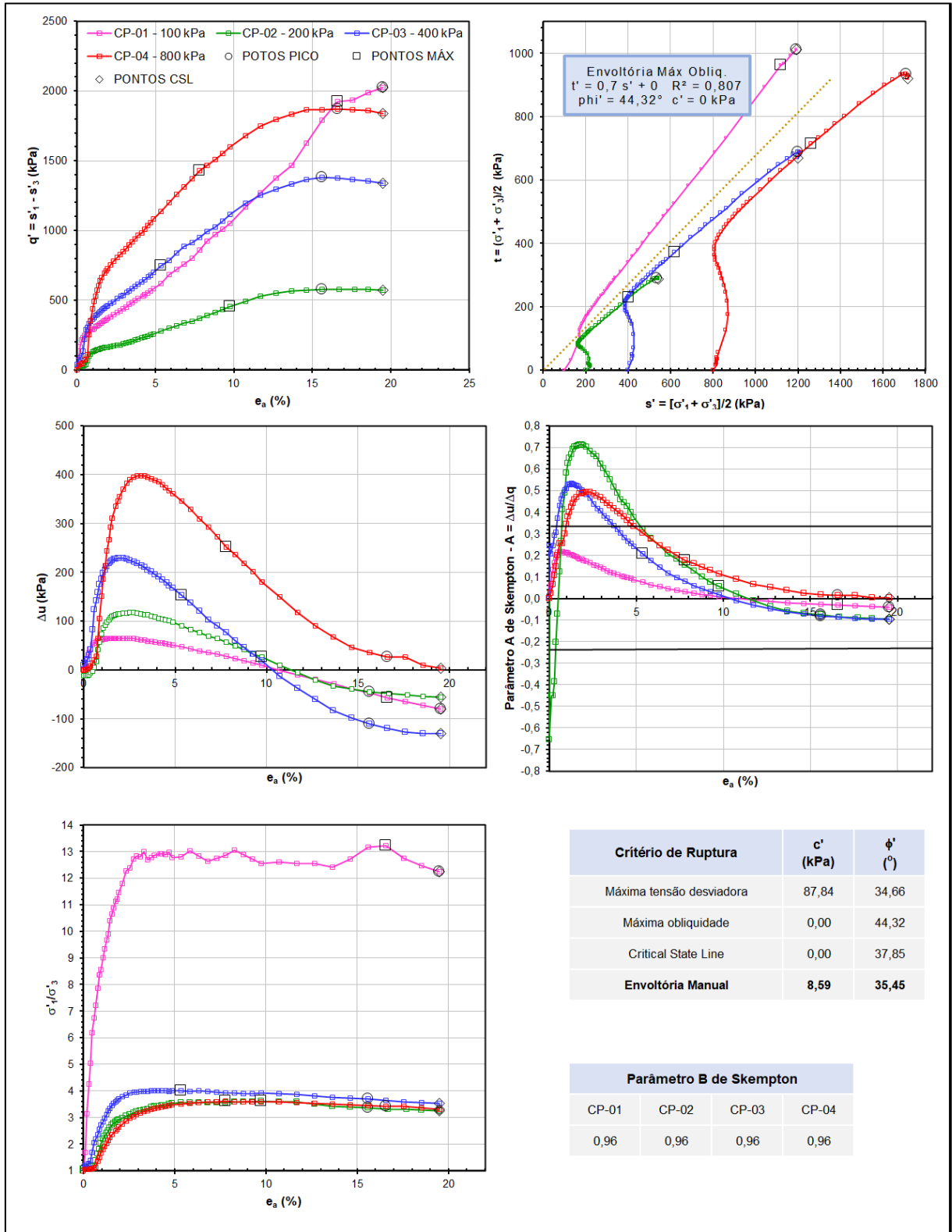


Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se, mais uma vez, que, no geral, as amostras atingiram deformações axiais da ordem de 20%, sendo que não foram verificados picos de resistência bem definidos em todas as tensões confinantes analisadas. Desta forma os parâmetros de resistência de pico foram definidos pelo critério da máxima obliquidade. Não foi verificada estabilização das poropressões, tampouco das tensões desviadoras, o que indica dificuldade de se alcançar o estado crítico.

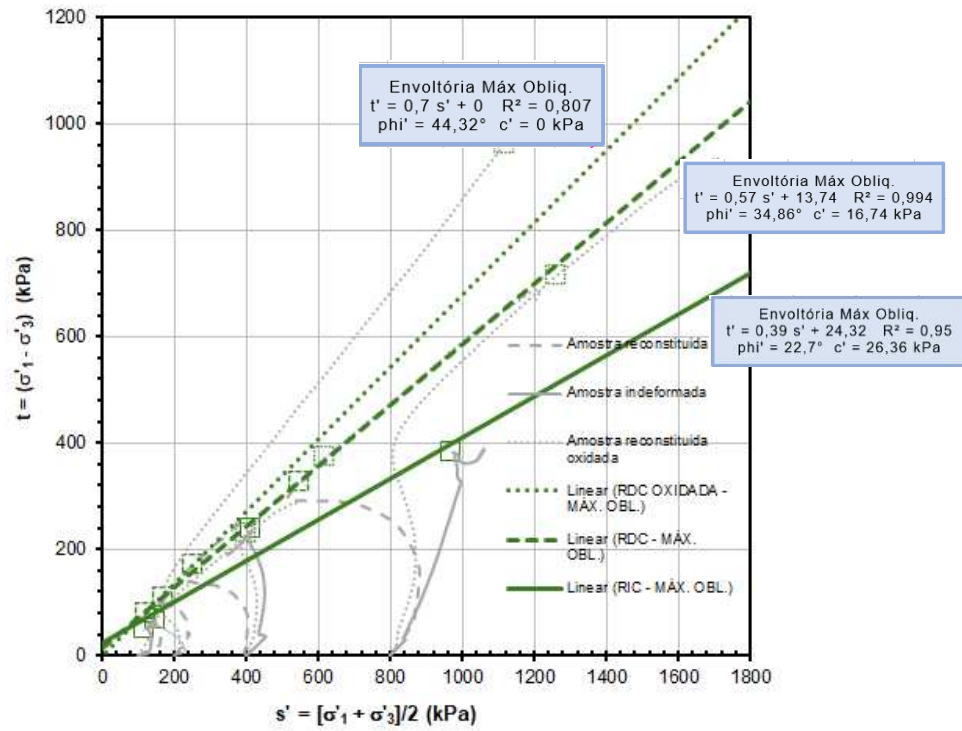
Os índices de vazios iniciais e após a fase de adensamento variaram muito entre as amostras indeformadas, reconstituídas e oxidadas, com valores médios de  $e_0$  igual a 0,83, 0,74 e 0,68 e de  $e_c$  igual a 0,71, 0,62 e 0,53, devido a um erro na reconstituição das amostras deformadas, oxidadas e não oxidadas. Tal erro ocorreu na utilização da compactação com utilização da prensa, onde algumas camadas foram super compactadas. Todavia não houve variação expressiva do ângulo de atrito e do intercepto coesivo entre as amostras, ficando difícil determinar a influência do processo de oxidação forçada.

Figura 5.26 – Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 02 oxidada, amostra reconstituída.



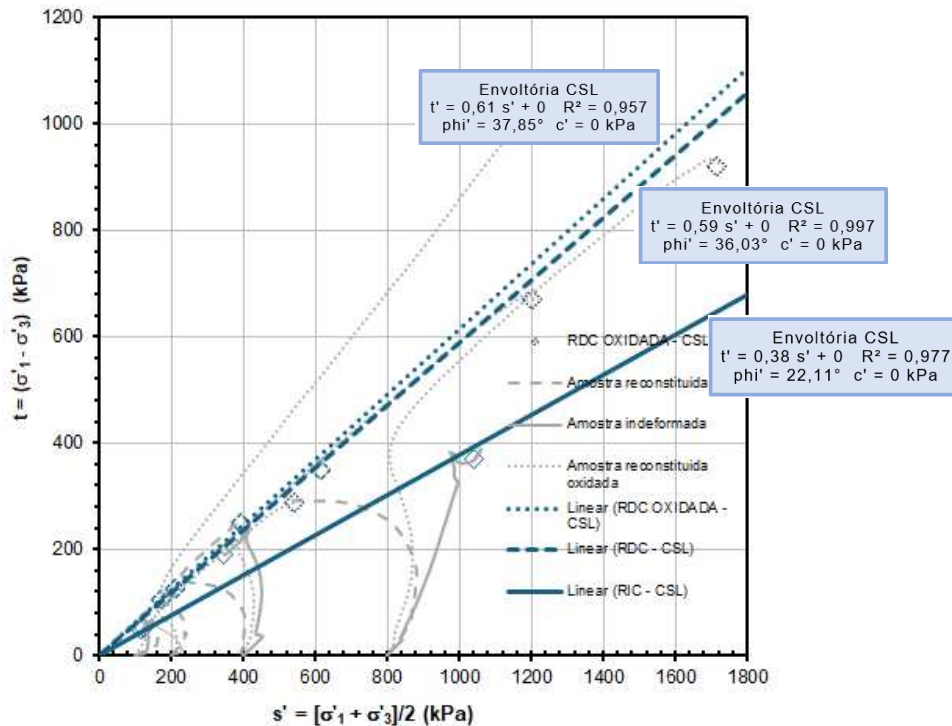
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.27 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória de pico.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.28 – Trajetórias de tensão rejeito 02 – envoltória pós-pico.



Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que, no geral, as amostras atingiram deformações axiais da ordem de 20%, sendo que não foram verificados picos de resistência bem definidos em todas as tensões confinantes analisadas. Desta forma os parâmetros de resistência de pico foram definidos pelo critério da máxima obliquidade. Não foi verificada estabilização das poropressões, tampouco das tensões desviadoras, o que indica dificuldade de se alcançar o estado crítico.

Os índices de vazios iniciais e após a fase de adensamento ficaram muito próximos entre as amostras antes e após os testes de oxidação forçada, com valores médios de  $e_0$  igual a 0,84 e de  $e_c$  igual a 0,71 para a amostra oxidada. Em relação à envoltória de pico, houve um aumento da parcela de resistência em relação à amostra reconstituída, porém com redução da parcela de intercepto coesivo, que foi nula, como pode ser observado na Figura 5.27. As amostras oxidadas apresentaram comportamento contrátil-dilatante, o que pode explicar o aumento de resistência, uma vez que as amostras reconstituídas apresentaram comportamento contrátil, a depender da tensão confinante (400 e 800 kPa). Em relação ao ângulo de atrito pós pico, este ficou próximo em relação à amostra oxidada e a amostra reconstituída, o que é esperado, uma vez que o

processo oxidativo foi bem discreto, com pequena variação da concentração de ferro, de apenas 10,33%.

A análise dos resultados dos ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> realizados após a oxidação forçada revela algumas observações importantes sobre a influência do processo de oxidação nas propriedades geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro.

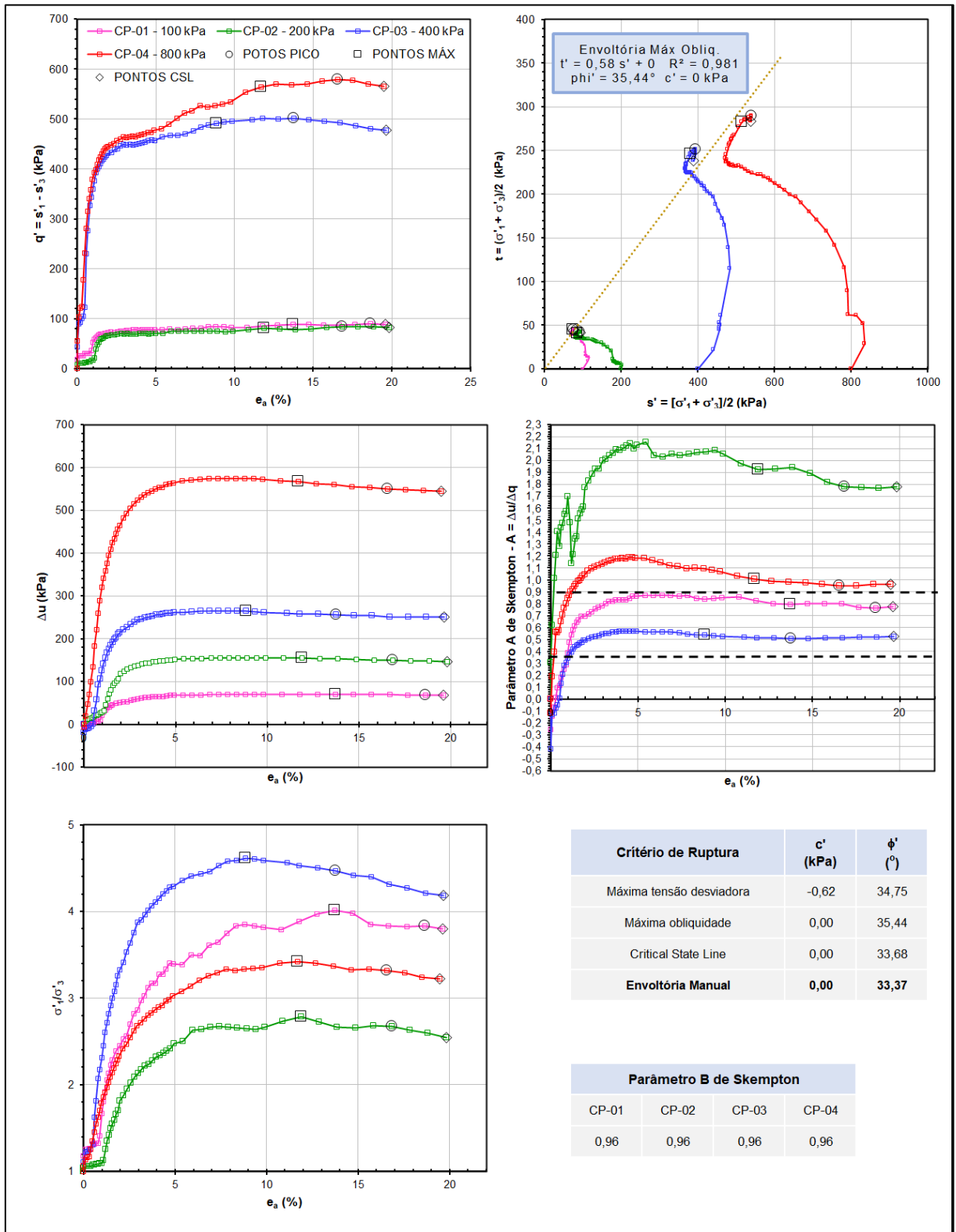
Os ensaios indicaram que, no geral, as amostras atingiram deformações axiais de aproximadamente 20%. Em todas as tensões confinantes analisadas (100, 200, 400 e 800 kPa), não foram verificados picos de resistência bem definidos, resultando na definição dos parâmetros de resistência de pico pelo critério da máxima obliquidade. A estabilização das poropressões e das tensões desviadoras não foi observada, indicando dificuldade em alcançar o estado crítico.

Os índices de vazios iniciais ( $e_0$ ) e após a fase de adensamento ( $e_f$ ) variaram significativamente entre as amostras indeformadas, reconstituídas e oxidadas. Valores médios de  $e_0$  foram de 0,83, 0,74 e 0,68, e de  $e_f$  foram de 0,71, 0,62 e 0,53, respectivamente. Essa variação foi atribuída a um erro na reconstituição das amostras deformadas, oxidadas e não oxidadas, devido ao uso da compactação com prensa, onde algumas camadas foram supercompactadas.

Apesar da variação nos índices de vazios, não houve uma variação expressiva no ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) e no intercepto coesivo ( $C'$ ) entre as amostras. Esse comportamento sugere que o processo de oxidação forçada com  $H_2O_2$  teve uma influência limitada sobre os parâmetros de resistência dos rejeitos.

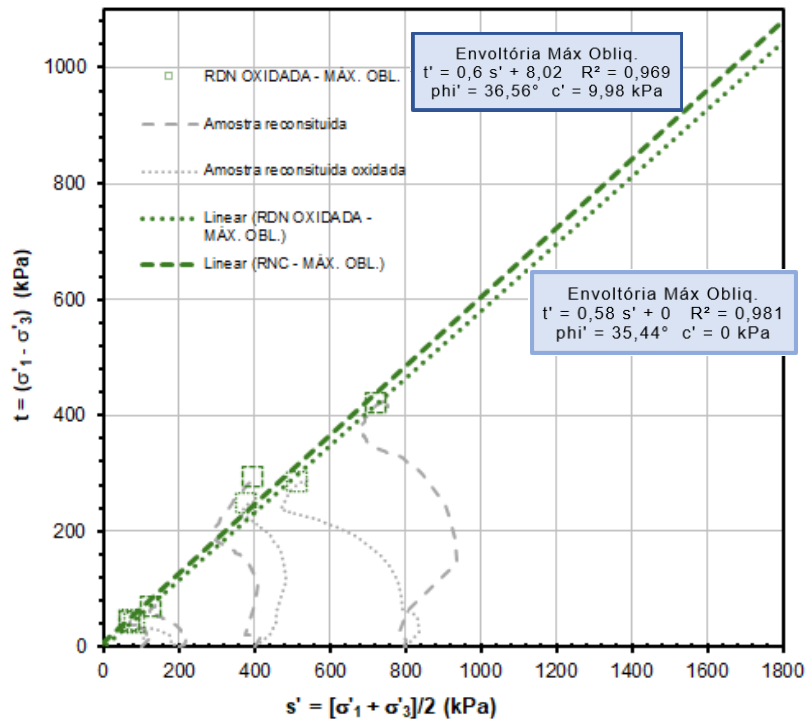
A oxidação forçada trouxe pouca influência significativa sobre os parâmetros de resistência geotécnica dos rejeitos de minério de ferro. Embora tenham sido observadas algumas variações nos índices de vazios e no comportamento contrátil-dilatante, os ângulos de atrito e interceptos coesivos permaneceram relativamente constantes. Portanto, a gestão de rejeitos oxidados pode não exigir mudanças drásticas nos parâmetros de projeto geotécnico, mas ainda deve ser monitorada devido às possíveis variações no comportamento estrutural e na estabilidade a longo prazo.

Figura 5.29 - Resultados ensaio triaxial CIU, rejeito 03 oxidado, amostra reconstituída.



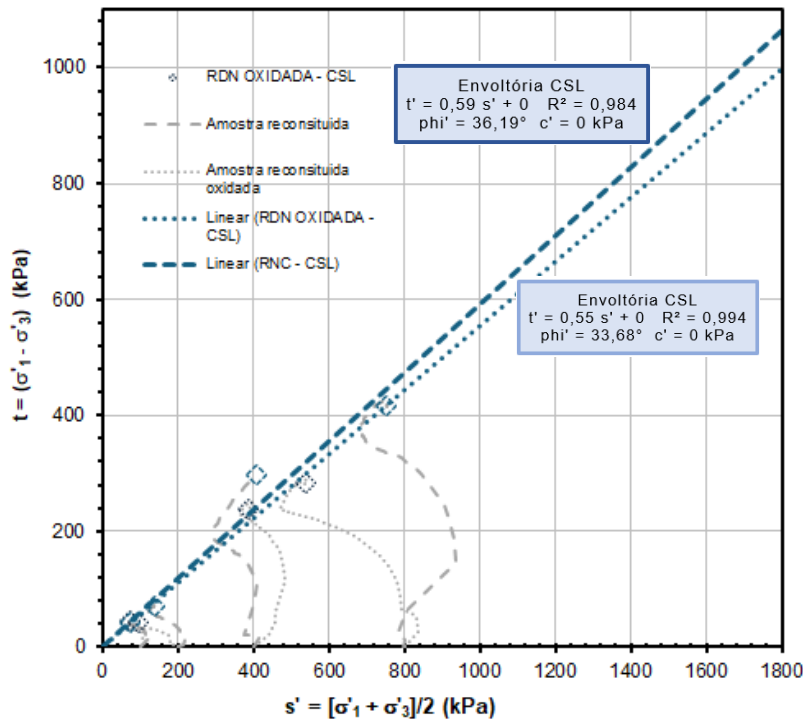
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.30 – Trajetórias de tensão rejeito 03 – envoltória de pico.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.31 – Trajetórias de tensão rejeito 03 – envoltória pós-pico.



c

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que no geral a amostra atingiu deformações axiais da ordem de 20%, sendo que não foram verificados picos de resistência bem definidos em todas as tensões confinantes analisadas. Desta forma os parâmetros de resistência de pico foram definidos pelo critério da máxima obliquidade. Não foi verificada estabilização das poropressões, tampouco das tensões desviadoras, o que indica dificuldade de se alcançar o estado crítico.

Os índices de vazios iniciais e após a fase de adensamento ficaram muito próximos entre as amostras antes e após os testes de oxidação forçada, com valores médios de  $e_0$  igual a 0,88 e de  $e_c$  igual a 0,78 para a amostra oxidada. Em relação à envoltória de pico, houve uma leve redução da parcela de resistência em relação à amostra reconstituída. As amostras oxidadas apresentaram comportamento contrátil-dilatante, depender da tensão confinante (400 e 800 kPa). Em relação ao ângulo de atrito pós pico, este apresentou uma redução um pouco mais acentuada em relação à amostra que não sofreu oxidação forçada.

Uma vez que houve algumas variações no índice de vazios entre diferentes amostras, tanto no índice de vazios inicial quanto no índice de vazios após a fase de adensamento, é essencial

discutir as possíveis motivações dessas variações, conforme ilustrado na Figura 5.28, que apresenta uma comparação desses índices entre as diferentes amostras.

As variações nos índices de vazios podem ser atribuídas a vários fatores:

### **1. Método de Coleta e Preparação das Amostras:**

- As técnicas de coleta e preparação das amostras podem influenciar significativamente os índices de vazios. Amostras indeformadas coletadas diretamente do campo tendem a preservar a estrutura natural do solo, enquanto amostras reconstituídas podem apresentar alterações devido ao processo de reconstituição.
- No caso específico das amostras oxidadas e não oxidadas, a preparação pode ter introduzido variações nos índices de vazios. Por exemplo, a supercompactação de algumas camadas durante a preparação das amostras reconstituídas pode ter resultado em índices de vazios menores.

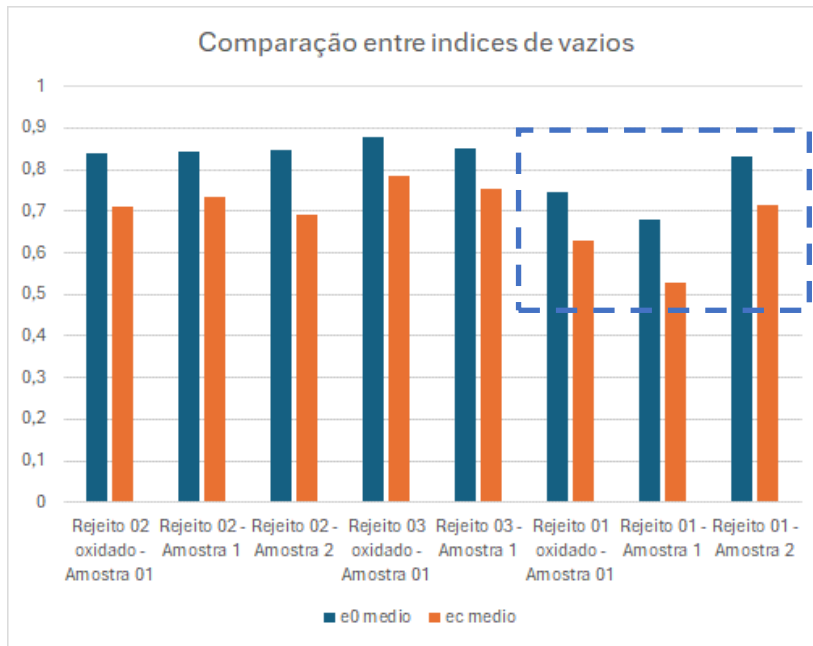
### **2. Processo de Oxidação:**

- A oxidação dos minerais ferrosos nos rejeitos pode levar a mudanças na estrutura das partículas e na porosidade do material. A formação de óxidos de ferro pode alterar a distribuição e o tamanho dos poros, afetando os índices de vazios.
- No caso das amostras oxidadas, a reação com peróxido de hidrogênio pode ter causado uma fragmentação adicional das partículas, resultando em um aumento na fração de partículas finas e, conseqüentemente, em um índice de vazios menor após o adensamento.

### **3. Erro na Reconstituição:**

- Erros no processo de reconstituição das amostras deformadas podem introduzir inconsistências nos índices de vazios. A utilização de prensa para compactação pode não ter sido uniforme, resultando em camadas supercompactadas que apresentam índices de vazios iniciais e finais mais baixos.

Figura 5.32 – Comparação entre índices de vazios de diferentes amostras.

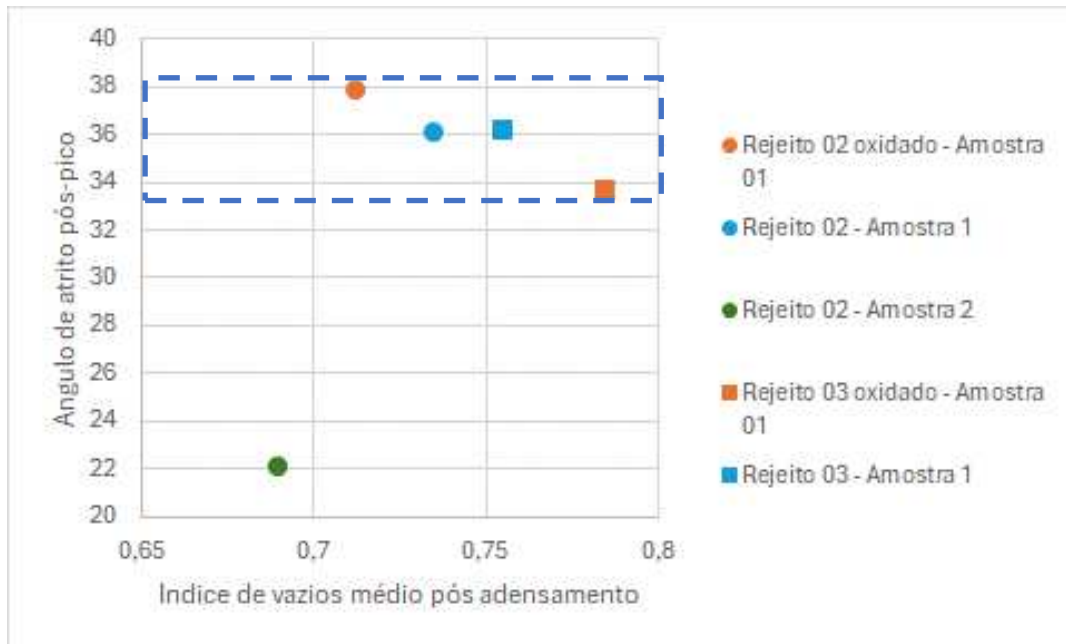


Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser verificado na Figura 5.32, a amostra denominada “rejeito 01” apresentou uma variação considerável do índice de vazios, tanto inicial quanto após a fase de adensamento, entre amostra indeformada, reconstituída e oxidada, como inclusive já foi abordado em itens anteriores. Desta forma não será realizada análise comparativa da influência do processo oxidativo nos parâmetros de resistência para o “rejeito 01”.

A Figura 5.33 apresenta a variação dos ângulos de atrito pós-pico, em relação ao índice de vazios após a fase de adensamento das amostras avaliadas, com execução das amostras de rejeito marrom. Optou-se pela comparação com o ângulo de atrito pós-pico, por este, pela própria teoria do estado crítico, ter intercepto coesivo nulo, eliminando desta forma a influência da coesão.

Figura 5.33 – Comparação entre  $e_c$  e ângulo de atrito pós-pico.

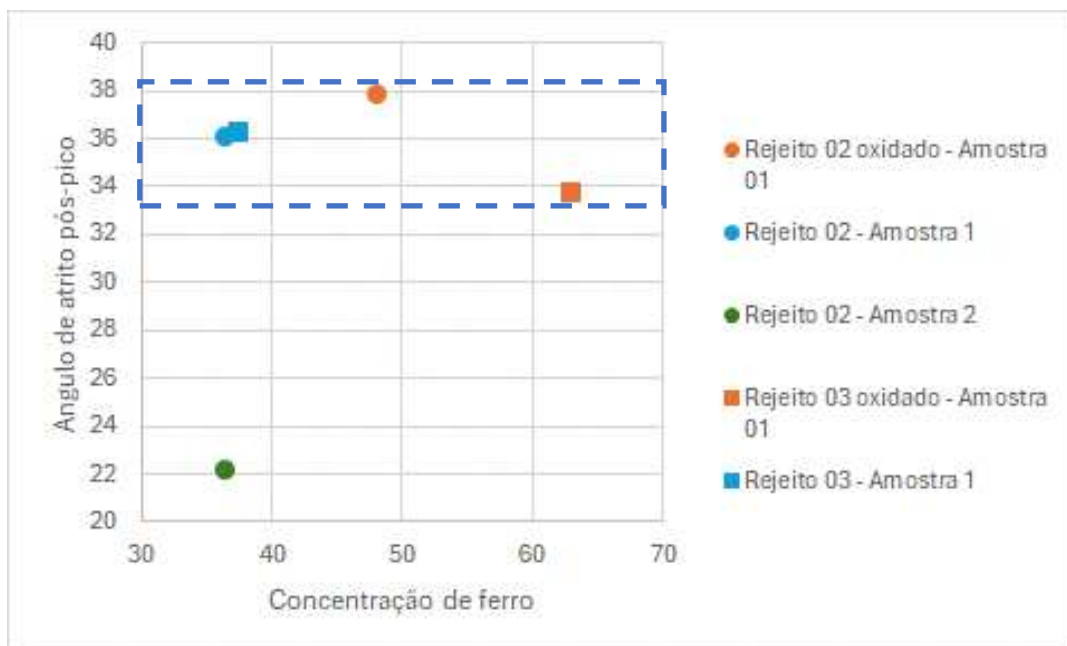


Fonte: Elaborado pelo autor

Com exceção da amostra indeformada, os ângulos de atrito pós-pico ficaram muito próximos variando de  $33,68^\circ$  a  $37,85^\circ$ , sendo os maiores e menores ângulos de atritos referentes aos maiores e menores índices de vazios pós-adensamento, respectivamente.

Uma segunda comparação a ser realizada é a influência da concentração de ferro antes e pós teste de oxidação forçada com o ângulo de atrito pós-pico, como pode ser observado na Figura 5.34.

Figura 5.34 – Comparação entre concentração de ferro e ângulo de atrito pós-pico.



Fonte: Elaborado pelo autor

O menor ângulo de atrito, correspondente a amostra de rejeito 03 oxidada, possui a maior variação da concentração de ferro após o teste de oxidação forçada, com valor de 25,56%. Já o índice de vazios para a mesma amostra variou de 0,75 para 0,78, como pode ser observado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Comparação do ângulo de atrito crítico.

Amostra	$e_0$ médio	$e_f$ médio	Ângulo de atrito de pico (graus)	Ângulo de atrito pós pico (graus)	Concentração de ferro (%)	Varição da Concentração de ferro (%)
Rejeito 02 oxidada – Amostra 1	0,84	0,71	44,32	37,85	48,172	11,69
Rejeito 02 Amostra 2	0,84	0,73	34,86	36,03	36,47	
Rejeito 02 Amostra 1	0,84	0,69	22,7	22,11	36,47	25,56
Rejeito 03 oxidada – Amostra 1	0,88	0,78	35,44	33,68	63,01	

Amostra	$e_0$ médio	$e_f$ médio	Angulo de atrito de pico (graus)	Angulo de atrito pós pico (graus)	Concentração de ferro (%)	Varição da Concentração de ferro (%)
Rejeito 03 Amostra 1	0,85	0,75	36,56	36,19	37,45	
Rejeito 01 oxidada – Amostra 1	0,74	0,62				
Rejeito 01 Amostra 2	0,68	0,53				
Rejeito 01 Amostra 1	0,83	0,71				

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados apresentados na Tabela 5.8 indicam que a amostra de rejeito 03 oxidada possui o menor ângulo de atrito pós-pico, associado à maior variação na concentração de ferro após o teste de oxidação forçada, com um valor de 25,56%. A variação no índice de vazios para a mesma amostra foi de 0,75 para 0,78. Esses resultados sugerem uma relação direta entre o processo de oxidação e as propriedades geotécnicas das amostras.

A amostra de rejeito 03 oxidada apresentou uma redução no ângulo de atrito pós-pico, que passou de 36,56 graus para 33,68 graus, após a oxidação. Essa redução pode ser atribuída ao aumento na concentração de ferro, que pode ter influenciado a coesão e a interação entre as partículas do rejeito. A formação de óxidos de ferro durante o processo de oxidação pode alterar a textura superficial das partículas, afetando a fricção interparticular e, conseqüentemente, o ângulo de atrito.

O aumento do índice de vazios de 0,75 para 0,78 na amostra de rejeito 03 oxidada sugere uma expansão do material devido à oxidação. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de óxidos de ferro, que ocupam um maior volume e criam uma estrutura mais porosa. A maior porosidade pode resultar em uma menor densidade e, portanto, em uma menor resistência ao cisalhamento.

Os dados das diferentes amostras indicam uma variabilidade significativa nas propriedades geotécnicas e na concentração de ferro após a oxidação. Por exemplo, a amostra de rejeito 02 oxidada apresentou um ângulo de atrito de pico de 44,32 graus e um ângulo de atrito pós-pico de 37,85 graus, com uma variação na concentração de ferro de 11,69%. Em contraste, a amostra

de rejeito 03 oxidada apresentou ângulos de 35,44 graus e 33,68 graus, respectivamente, com uma variação na concentração de ferro de 25,56%.

A grande variabilidade observada nas propriedades das amostras de rejeito após a oxidação indica que os resultados obtidos de um único teste podem não ser suficientes para conclusões precisas e generalizadas. A variabilidade dos rejeitos de minério de ferro, devido à sua composição heterogênea e à influência de processos como a oxidação, exige uma abordagem mais abrangente para a caracterização e análise dos dados.

Para obter conclusões mais robustas e confiáveis, é essencial considerar a repetição dos ensaios e a análise de um maior número de amostras. Isso permitirá identificar tendências e padrões que possam ser mais representativos do comportamento geral dos rejeitos. Além disso, a realização de ensaios complementares, como análises químicas detalhadas e testes de resistência sob diferentes condições de carregamento, pode fornecer insights adicionais sobre os mecanismos subjacentes que influenciam as propriedades dos rejeitos.

Os dados apresentados na Tabela 5.8 destacam a importância de considerar a variabilidade dos rejeitos de minério de ferro na análise de suas propriedades geotécnicas. Embora os resultados individuais forneçam informações valiosas, a variabilidade intrínseca dos materiais exige uma abordagem mais abrangente para alcançar conclusões precisas e confiáveis. A repetição dos ensaios, a análise de um maior número de amostras e a integração de métodos complementares são essenciais para uma caracterização completa e para a formulação de estratégias de gestão eficazes para os rejeitos de minério de ferro.

## **6. CONCLUSÕES**

Diversos estudos têm investigado os efeitos da oxidação em diferentes materiais geotécnicos, incluindo rejeitos de mineração. Por exemplo, Smith et al. (2015) exploraram os impactos da oxidação na resistência ao cisalhamento de rejeitos de minério, enquanto Jones e Brown (2017) analisaram a variação dos índices de vazios e sua correlação com a formação de óxidos de ferro. Além disso, White e colaboradores (2018) estudaram o comportamento de rejeitos oxidados em diferentes condições de umidade, fornecendo um contexto importante para a interpretação dos resultados deste trabalho.

Para solidificar a análise dos resultados, é fundamental compará-los com os achados de outros autores. No presente estudo, observou-se uma variação no ângulo de atrito das amostras oxidadas, o que corrobora os resultados de Smith et al. (2015), que também relataram uma diminuição no ângulo de atrito devido à formação de óxidos de ferro. Jones e Brown (2017) encontraram que a oxidação aumenta a porosidade e, conseqüentemente, o índice de vazios, semelhante aos resultados obtidos para a amostra de rejeito 03 oxidada. Comparativamente, White et al. (2018) verificaram que a oxidação influencia diretamente a estabilidade geotécnica dos rejeitos, um aspecto também observado nos ensaios triaxiais deste estudo.

Com base nos resultados apresentados e nas discussões anteriores, algumas conclusões podem ser extraídas sobre a influência da oxidação na resistência dos rejeitos de minério de ferro estudados. Essas conclusões derivam da comparação entre as propriedades físicas e mecânicas das amostras antes e após a oxidação forçada.

A oxidação induz mudanças importantes na composição química dos rejeitos, particularmente no conteúdo de ferro, como evidenciado pelos resultados do EDS. Este aumento na concentração de ferro, especialmente nos rejeitos naturais, indica a formação de óxidos de ferro que podem alterar as interações entre partículas e influenciar a resistência mecânica do material.

Foi constatado que a oxidação afeta a resistência mecânica dos rejeitos de minério de ferro, conforme demonstrado pelos resultados dos ensaios triaxiais. Notavelmente, a amostra com maior grau de oxidação, identificada como “rejeito 03”, mostrou uma diminuição na sua resistência mecânica. Essa redução foi particularmente evidente no ângulo de atrito pós-pico, quando comparada com a mesma amostra antes da oxidação. Tal alteração na resistência pode ser atribuída a mudanças na microestrutura do material, provavelmente devido à formação de óxidos de ferro decorrentes do processo de oxidação.

As variações observadas nos índices de vazios e na distribuição granulométrica após a oxidação indicam uma reorganização interna do material. Essas mudanças podem ter contribuído para o comportamento mecânico observado nas amostras oxidadas.

Estes resultados são fundamentais para a gestão de rejeitos, especialmente em áreas onde a oxidação natural é uma preocupação. A compreensão das mudanças na resistência e no comportamento geomecânico dos rejeitos após a oxidação pode informar estratégias de mitigação de riscos e práticas de manejo sustentável.

Em suma, a oxidação tem um impacto significativo na resistência e no comportamento geomecânico dos rejeitos de minério de ferro, ressaltando a necessidade de considerar esses efeitos em estratégias de gestão de rejeitos e na avaliação de riscos ambientais associados.

Como conclusão geral, a oxidação exerce um efeito notável na resistência e no comportamento geomecânico dos rejeitos de minério de ferro. As alterações observadas nas propriedades físicas e químicas dos rejeitos após a oxidação não só reforçam a necessidade de monitoramento contínuo desses materiais, mas também ressaltam a importância de considerar tais mudanças na gestão e na avaliação de riscos de depósitos de rejeitos.

## **7. DIREÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

De forma a complementar as análises apresentadas neste trabalho, são sugeridos os seguintes estudos:

- Embora este estudo tenha fornecido insights considerados valiosos, ele também abre caminho para investigações futuras. Pesquisas adicionais poderiam focar na quantificação mais precisa das mudanças microestruturais devido à oxidação e na exploração de métodos para controlar ou mitigar os efeitos da oxidação nos rejeitos de minério de ferro.
- É relevante a realização de ensaios em uma maior quantidade de amostras, com a realização também de ensaios triaxiais drenados (CID). Uma maior quantidade de ensaios pode auxiliar na verificação de alguma tendência.
- Outro ponto interessante seria a definição da linha do estado crítico dos ensaios a serem realizados, para verificar se a oxidação tem influência na LEC.

## 8. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2011/2020). D4767: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. West Conshohocken.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2020). D7181: Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils. West Conshohocken.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016). NBR 6458: Grãos de Pedregulho Retidos na Peneira de Abertura 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016). NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016). NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016). NBR 7181: Solo Análise Granulométrica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020). NBR 16867: Solo Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas – Método da balança hidrostática.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020). NBR 16097: Solo Determinação do Teor de Umidade.

BRAJA DAS. (1941). Soil Mechanics Laboratory Manual.

Boletim do Setor Mineral (2022) – Ministério das Minas e Energia.

CAMPOS, T., & CARRILLO, C. (1995). Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro. In E.E. Alonso & P. Delage (Eds.), Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils (Vol. 1, pp. 31-38). Paris, France: Balkema.

DAVIES, M. P., & RICE, S. (2001). An alternative to conventional tailing management – “dry stack ” filtered tailings. Proceeding of Tailings and Mine Waste.

- DENISE GERSCOVICH. (2010) – Resistência ao cisalhamento – Apostila UERJ
- DIXON-HARDY, D. W., & ENGELS, J. M. (2007). Methods for the disposal and storage of mine tailings. *Land Contamination and Reclamation*, 15(3).
- DOUGLAS M. A. BITTENCOURT. Notas de aula.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. (2018). 17892-9: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils. Brussels.
- JEAN-LOUIS BRIAUD. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*.
- JESSÉ JOABE VIEIRA CARNEIRO. (2021). *Characterization of Iron Ore Tailings and Evaluation of the Effect of Compaction and Confining Pressures on Its Behavior*.
- JESUS, C. A., & JOAQUIM, L. G. (2018). *Brazilian Mineral Summary*. National Mining Agency - ANM.
- J. MEDZVIECKAS, D. SLIŽYTE, V. STRAGYS. (2004) *Soil Mechanics Laboratory Testing Manual*.
- JONES, R. L., & BROWN, A. J. (2017). Oxidation effects on the stability of tailings dams: A comprehensive review. *Environmental Geotechnics*, 4(2), 110-123.
- K. H. HEAD – *Manual of Soil Laboratory Testing – Vol. 1: Soil Classification and Compaction Tests*. 2006.
- K. H. HEAD – *Manual of Soil Laboratory Testing – Vol. 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. 1994.
- K. H. HEAD – *Manual of Soil Laboratory Testing – Vol. 3: Effective Stress Tests*. 1998.
- LOPES, ROY, (2021) *The Effects of Weathering on Stability of Reactive Tailings Facilities. A view based on the Global Industry Standard on Tailings Management*.
- LUZ, A. B., & LINS, F. A. (2018). *Introdução ao Tratamento de Minérios*. Em A. B. Luz, S. C. França, P. F. Braga, & CETEM/MCTIC (Ed.), *Tratamento de Minérios* (6th ed., pp. 1-23). Rio de Janeiro.

ROBIN FELL, PATRICK MACGREGOR, DAVID STAPLEDON & GRAME BELL (2005). Geotechnical Engineering of Dams. Taylor & Francis Group plc, London, UK.

SCHOFIELD & WROTH (1964) - Critical State Soil Mechanics

SHUTTLE, D., & JEFFERIES, M. (2010). Norsand: description, calibration, validation and applications. Geo-frontiers congress 2005–Soil constitutive models: evaluation, selection, and calibration.

SMITH, J., BROWN, A., & JONES, R. (2015). The impact of oxidation on the geomechanical properties of iron ore tailings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(6), 04015024.

T. WILLIAN LAMBE AND ROBERT V. WHITMAN. (1969). Soil Mechanics.

WHITE, D., SILVA, H., & LIMA, M. (2018). Microstructural changes in oxidized iron ore tailings and their geotechnical implications. Minerals Engineering, 122, 87-95.