

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Definição da envoltória de resistência para um rejeito de minério de ferro saturado e
não saturado**

TF – 21/34

Michelli Hora de Jesus

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

SÃO PAULO
2021

“Nenhuma sociedade que esquece a arte
de questionar pode esperar encontrar respostas
para os problemas que a afligem.”

Zygmunt Bauman

AGRADECIMENTOS

A empresa mineradora Vale S.A. pela disponibilidade da amostra manuseada nesta pesquisa, sem a qual não haveria este estudo.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) que proporcionou total disponibilidade de seus equipamentos e ao Rodrigo Serafim e Marcelo Pasqualucci pela atenção voltada a realização desta pesquisa.

Ao Diego Nogueira colaborador da empresa Egis e a empresa Brazilian Rockhounds pela plena disposição de seus equipamentos e laboratórios para caracterização da amostra.

Agradeço em especial, ao meu professor Fernando Antônio Medeiros Marinho, orientador deste trabalho, que despertou desde o primeiro dia meu interesse pela Geotecnica, e me guiou com muito profissionalismo, incentivo, disponibilidade, ensinamentos e paciência para realização deste trabalho.

A aluna de doutorado, Mariane Borba de Lemos, pela disponibilidade em me ajudar sempre e por todas as conversas sobre a vida profissional que tivemos.

Aos meus professores da Universidade de São Paulo, pela transmissão do conhecimento.

Aos amigos da universidade, Jonas, Rodrigo, Erílio, Thais, Emerson e Sara, pela amizade e pelos momentos de pura descontração.

Em especial, aos meus amigos e irmãos Letícia e Marlon, que sempre estavam ali para conversar, apoiar, me incentivar e levar com maior leveza os momentos mais difíceis, vocês estão no meu coração.

Aos meus familiares, obrigada pelo apoio e palavras de carinho.

Aos meus pais, Alexandra e Josimar, pelo amor, educação, incentivo, palavras de conforto e sempre buscar me proporcionar o melhor. Vocês são o verdadeiro motivo pela qual eu busco minha melhora pessoal e profissional. Obrigada por tudo!

Ao meu companheiro e melhor amigo, Lucas, por tanto carinho, apoio, ajuda, atenção e paciência. Obrigada por tornar tudo tão melhor.

RESUMO

A indústria da mineração nos últimos anos, representa uma preocupação dos órgãos governamentais e da população, devido aos acidentes ocorridos no estado de Minas Gerais, no município de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, associados a ruptura das barragens de contenção dos rejeitos de mineração. Este acidente teve um impacto negativo na população devido às perdas ambientais, econômicas e sociais da região. Assim, para contribuir com o entendimento da estabilidade e segurança de depósitos de rejeitos, este trabalho visa a caracterização geotécnica de um rejeito de minério de ferro, originários da Mina do Pico, no estado de Minas Gerais, Brasil. Ensaios laboratoriais foram realizados para caracterização física e química do rejeito, e para definir sua envoltória de resistência, sob condições saturadas e não saturadas. Neste contexto, os parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto do rejeito de minério de ferro saturado apresentaram ângulo de atrito de 47º e para a envoltória de resistência para o rejeito próximo do residual em condição saturada de 36º. Além disso, os resultados obtidos em condição não saturada, consistiram na implementação de um modelo que se baseia em uma função hiperbólica empírica, para ajustar os dados experimentais, e por fim, analisar variações do ângulo de atrito efetivo. Sua implementação indicou que a perda de umidade não afeta na resistência do rejeito.

Palavras chave: Rejeito de minério de ferro, saturada, não saturada, envoltória de resistência e cisalhamento direto.

ABSTRACT

The mining industry in recent years represents a concern of government agencies and the population, due to accidents that occurred in the state of Minas Gerais, in the municipality of Mariana in 2015 and Brumadinho in 2019, associated with the rupture of the mining tailings containment dams. This accident had a negative impact on the population due to environmental, economic and social losses in the region. Thus, to contribute to the understanding of the stability and safety of tailings deposits, this work aims at the geotechnical characterization of an iron ore tailings, originating from the Pico Mine, in the state of Minas Gerais, Brazil. Laboratory tests were carried out for physicochemical characterization, and to define the shear strength envelope, under saturated and unsaturated conditions. In this context, the strength parameters in the direct shear test of the saturated iron ore tailings friction dissipation of 47° and for the strength envelope for the tailings close to the residual in a saturated condition of 36° . Furthermore, the results obtained in unsaturated condition consisted of implementing a model based on an empirical hyperbolic function, to adjust the experimental data, and finally, to analyze the variations in the effective friction angle. Its implementation indicated that the loss of moisture does not affect the tailings resistance.

Key words: Iron ore tailings, saturated, unsaturated, strength envelope, direct shear test.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1. Rejeito de minério de ferro	11
3.2. Características geotécnicas	13
3.3. Parâmetros de resistência.....	14
3.4. Conceitos básicos sobre o estado crítico	14
3.5. Modelo Mohr-Coulomb-Vilar (MCV).....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1. Caracterização do rejeito	18
4.1.1. Caracterização química e mineralógica.....	19
4.1.2. Análise granulométrica.....	19
4.1.3. Densidade real dos grãos	21
4.1.4. Limites de Consistência	22
4.2. Compactação	23
4.3. Cisalhamento direto	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1. Caracterização da amostra.....	26
5.1.1. Análise granulométrica.....	26
5.1.2. Limites de Consistência	27
5.1.3. Análise morfologia e química	28
5.1.4. Densidade real dos grãos	30
5.2. Compactação	31
5.3. Cisalhamento direto	34
5.3.1. Condição Saturada.....	34
5.3.2. Condição não saturada	39
6. CONCLUSÃO.....	46
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma dos processos de mineração do ferro. (Albuquerque Filho, 2004)	12
Figura 2. Curvas granulométricas de rejeito de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (Pereira, 2005)	13
Figura 3. Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb. Fonte: Mattos, 2014.....	14
Figura 4. Representação do Estado crítico. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).	15
Figura 5. Comportamento do solo ao Cisalhamento. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978)....	16
Figura 6. (a) e (b) Linha de Estado Crítico (CSL) e (c) Linha de Estado Crítico com tensão normal em escala logarítmica. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).....	16
Figura 7. Linha do Estado Crítico. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).	17
Figura 8. Relação entre a sucção matricial e a coesão aparente para determinação dos parâmetros a e b Fonte: Reis e Vilar (2004).	18
Figura 9. A) Planta de desague piloto construída na Mina do Pico. (B) Aterro experimental formado com os rejeitos arenosos filtrados e espessados. (Relatório de projeto Vale S.A., apud Boccamino, 2017).....	19
Figura 10. Ensaio de análise granulometria por meio da sedimentação. (a) amostra de rejeito disperso em água destilada em repouso para sedimentar. (b) Leituras de temperatura e do densímetro imerso na proveta.....	21
Figura 11. Execução do ensaio de densidade dos grãos, com transferência da amostra para o picnômetro com auxílio do funil de vidro.	22
Figura 12. Aparelhagem necessária para realização da determinação do Limite de Liquidez, segundo a NBR-6459/1984, e Limite de Plasticidade, segundo a NBR-7180/1984. Os equipamentos utilizados são Casagrande, placa de vidro, recipiente para guardar amostra, espátula em lâmina, balança, pisseta e proveta.	23
Figura 13. Ensaio de compactação Proctor. (a) Amostra compactada com energia de compactação de 9,91 kg.cm/cm ³ , (b) retirada da amostra compactada do molde cilíndrico.	24
Figura 14. Amostras armazenadas para perda de umidade ao ar ambiente.....	25
Figura 15. Distribuição granulométrica do rejeito cianita realizado por sedimentação pelas empresas comerciais Egis (Lab.A) e Brazilian Rockhounds (Lab.B) com uso de defloculante hexametafosfato e curva granulométrica por difração a laser (Malvern).	26
Figura 16. Realização de ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade. (a) Preparação da amostra no aparelho Casagrande, para determinação do limite de liquidez. (b) Deslizamento da amostra com apenas 3 golpes. (c) Fragmentação da amostra antes de se atingir 3 mm de diâmetro.	28

Figura 17. Difratograma de raio-X da amostra de rejeito, com presença de quartzo e hematita em maiores proporções, e a goethita, muscovita e caulinita, em menores proporções.....	29
Figura 18. Fotomicrografias do rejeito obtidos na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (a) partículas com dimensões aproximadas de 90 μm , variando de subarredondados a angulosos, com presença de material fino envolto da partícula. (b) Partículas menores de 400 μm , variando de subarredondadas a angulosas, com partículas menores levemente arredondadas, e presença de partículas tabulares de hematita. (c) Partículas menores a equivalente de 200 μm , subarredondadas a angulosas, e partículas tabulares de hematita.....	30
Figura 19. Densidade dos grãos de rejeito de minério de ferro estudados anteriormente e densidade dos grãos determinados pelo Lab. A, em vermelho, e Lab B, em preto. Fonte: Modificado de Sotomayor, 2018.....	31
Figura 20. Curva de compactação Proctor Normal.....	32
Figura 21. Identificação da densidade seca dos grãos (ρ_d) de cada compactação Proctor realizada a próximo a umidade ótima de compactação do Proctor normal.....	33
Figura 22. Água na base do cilindro do Proctor após a compactação.....	34
Figura 23. Resultados do ensaio de cisalhamento direto, saturado, com tensão normal de 50, 100 e 200 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal, em cada tensão normal aplicada, com o ponto da ruptura estabelecido na tensão cisalhante de pico (τ_{pico}). (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal ocorrido durando o cisalhamento, em cada tensão normal aplicada.	35
Figura 24. Resultados do ensaio de cisalhamento direto para o rejeito residual, saturado, com tensão normal de 50, 100 e 200 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal do rejeito residual, em cada tensão normal aplicada. (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal ocorrido durando o cisalhamento do rejeito residual, em cada tensão normal aplicada.	36
Figura 25. Envoltórias de resistência do rejeito de minério de ferro, determinados no primeiro cisalhamento com ângulo de atrito $\Phi' = 47^\circ$ e para o rejeito próximo do residual com ângulo de atrito de $\Phi R = 36^\circ$	38
Figura 26. Resultados do ensaio de cisalhamento direto não saturado, com tensão normal 19 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal de cada corpo de prova identificados pelo seu teor de umidade, e o ponto da ruptura é estabelecido na tensão cisalhante de pico (τ_{pico}). (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal ocorrido durando o cisalhamento, em cada amostra.	39
Figura 27. Resultados do ensaio de cisalhamento direto residual não saturado, com tensão normal 19 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal de cada corpo de prova identificados pelo seu teor de umidade, sem apresentar ponto de	

ruptura. (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal de cada corpo de prova	40
Figura 28. Envoltórias de resistência do rejeito de minério de ferro, em condição saturada e não saturada, ambos com ângulo de atrito $\Phi' = 47^\circ$ para o primeiro cisalhamento, e ângulo de atrito de $\Phi_R = 36^\circ$ para o rejeito próximo do residual em condição saturada.	42
Figura 29. Envoltória de resistência estimada segundo o modelo de Vilar (2006), da amostra cisalhada não saturada, com teor de umidade de 11,64%.....	43
Figura 30. Comparação entre (a) envoltória determinada no ensaio de cisalhamento direto saturado e (b) envoltória determinada pelo método de Vilar (2006).	44
Figura 31. Comparação entre (a) envoltória do rejeito residual determinada no ensaio de cisalhamento direto saturado e (b) envoltória determinada pelo método de Vilar (2006).	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros da curva de distribuição granulométrica, com determinação diâmetro efetivo (D10), D30, D50, coeficiente de não uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura do rejeito (Cc).....	27
Tabela 2. Resultado da densidade dos grãos do rejeito de minério de ferro, obtidos pelo laboratório A e B.....	31
Tabela 3. Resultados da compactação Proctor Normal com a umidade ótima de compactação e sua respectiva densidade seca dos grãos (ρ_d).	32
Tabela 4. Resultados obtidos de umidade e densidade seca dos grãos (ρ_d), para cada compactação Proctor.	33
Tabela 5. Resultados obtidos de cada amostra cisalhada, com seus respectivos valores de tensão normal aplicada (σ_N), tensão cisalhante de pico atingida (τ_{pico}), umidade, grau de saturação, índice de vazios e densidade dos grãos (ρ_d).....	37
Tabela 6. Valores de ângulo de atrito e coesão das envoltórias de resistência do primeiro cisalhamento e cisalhamento residual.	38
Tabela 7. Resultados obtidos de cada amostra cisalhada em condição não saturada, com seus respectivos valores de tensão normal aplicada (σ_N), tensão cisalhante de pico atingida (τ_{pico}), umidade, grau de saturação, índice de vazios e densidade dos grãos (ρ_d).	41
Tabela 8. Parâmetros de resistência do rejeito, para amostras saturadas e não saturadas, do primeiro cisalhamento e do cisalhamento residual.	43

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, o minério foi fundamental para o desenvolvimento da sociedade e atualmente são imprescindíveis em nosso dia a dia. A mineração é uma atividade econômica de suma importância, para geração de empregos, arrecadação de impostos, exportação de produtos, tecnologia e desenvolvimento do país. Claramente, a extração mineral gera impacto ao meio ambiente, mas se tomadas as devidas precauções, o impacto pode ser minimizado.

Nos últimos anos, dois grandes acidentes envolvendo rompimentos de barragens de rejeitos ocorreram na região do Quadrilátero Ferrífero. Sendo eles, a barragem de rejeito de Fundão, em Mariana no ano de 2015, e a barragem da Mina do Feijão, em Brumadinho no ano de 2019. Estes acidentes causaram grandes impactos ambientais e sociais na região. Após estas catástrofes ambientais, a população e os órgãos governamentais aumentaram a pressão na indústria mineral para que fossem adotados procedimentos que minimizem os riscos do empreendimento. Com isto, o meio técnico busca alternativas para estocagem de rejeitos e realização de pesquisas para sua caracterização, afim de minimizar o potencial de risco das barragens.

Com o intuito de diminuir os riscos a vida da população que se estabelecem a jusante da barragem e para o meio ambiente, são fundamentais estudos de parâmetros geotécnicos dos rejeitos. Com isto, a presente pesquisa determina os parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro, oriunda da Mina do Pico, estado de Minas Gerais, e gerenciada pela Vale S.A., afim de estabelecer a construção da barragem e seu gerenciamento de modo mais seguro e minimizar eventuais riscos de rompimento.

2. OBJETIVOS

Este projeto tem como objetivo principal definir a envoltória de resistência de um rejeito de minério de ferro, na condição saturada e não saturada. Na condição não saturada é aplicado o modelo de Vilar (2006) para estimar as envoltórias de resistência ao cisalhamento experimental.

Também é um objetivo do estudo a caracterização química e física do rejeito.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Rejeito de minério de ferro

As reservas de minério de ferro brasileira representa 19,8% das reservas mundiais, com teor médio de 46,2% de ferro, sendo o segundo maior produtor no *ranking* mundial. Os

principais estados detentores de reservas de minério de ferro são, Minas Gerais com 74,4% das reservas e teor médio de 41,1%, Pará com 19,5% das reservas e teor médio de 65,6% e Mato Grosso do Sul com 2,2% das reservas e teor médio de 63,7%. (Brasil, 2020).

Segundo Pereira (2005), Minas Gerais apresenta grandes reservas de minério de ferro localizados na região do Quadrilátero Ferrífero, com área de aproximadamente 7000 km². Empresas mineradoras exploram o mineral na região resultando em significativos volumes de resíduos, incluindo os rejeitos e os estéreis.

O beneficiamento do minério de ferro e lavra geram quantidades significativa de rejeito e estéreis, com razão média de 2/1 entre o produto final e a geração de rejeito (Abrão, 1987).

Os estéreis são materiais considerados sem valor comercial proveniente das atividades de lavra, sendo depositados em forma de pilhas em talvegues e encostas próximo da lavra. Os rejeitos são resíduos oriundos do processo de beneficiamento mineral, depositados sob forma de polpa ou lama em reservatórios conhecidos como barragens de rejeito.

A extração do minério de ferro compreende diversas atividades em que irá determinar as características dos resíduos no processo. As características finais variam conforme a tecnologia empregada no processo industrial e a qualidade da matéria prima. Portanto, os rejeitos apresentam características, físico-químicas, geotécnicas e mineralógicas variadas (Fernandes, 2005).

Os processos essenciais na mineração para obtenção de minério de ferro são representados na Figura 1 (Albuquerque Filho, 2004).

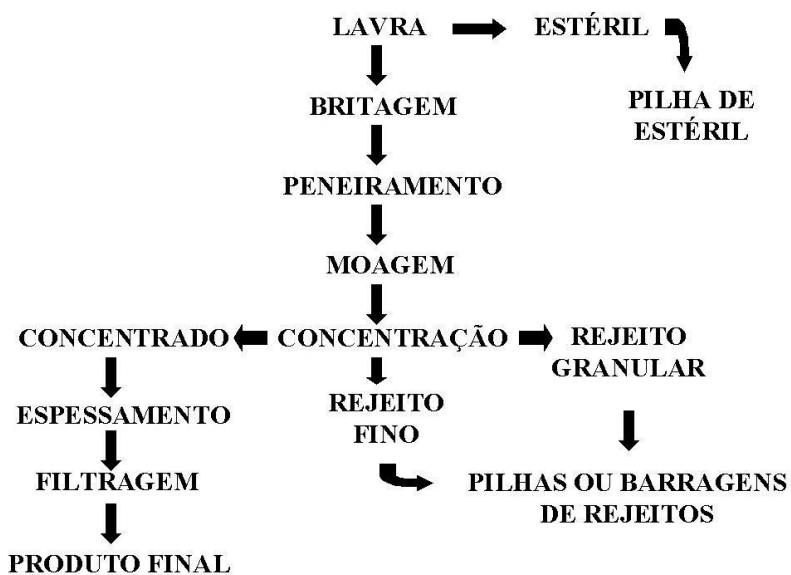


Figura 1. Fluxograma dos processos de mineração do ferro. (Albuquerque Filho, 2004).

3.2. Características geotécnicas

Os rejeitos de minério de ferro, segundo Fernandes (2005), apresentam características heterogêneas, devido as diferenças do processo de beneficiamento do minério, tipo de minério ou a variabilidade das frentes de lavra e disposição na barragem.

O rejeito é constituído por partículas de composição físico-química, mineralógica e granulométrica distintas, no qual está relacionado a característica da jazida, o processo de exploração e beneficiamento do minério. Portanto, o rejeito pode variar de materiais finos e plásticos até materiais arenosos e não plásticos (Albuquerque Filho et al., 2004).

Segundo Ribeiro (2000), a variação granulométrica do rejeito na barragem está associada a diversos fatores. A deposição das partículas ocorre em localidades distintas devido a forma, tamanho e densidades das partículas. Além disto, a vazão, velocidade de descarga, concentração e modificação de direção de descarga do rejeito influência na variabilidade granulométrica na barragem.

A Figura 2 apresenta as diferentes curvas granulométricas de distintos rejeitos de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais (Pereira, 2005).

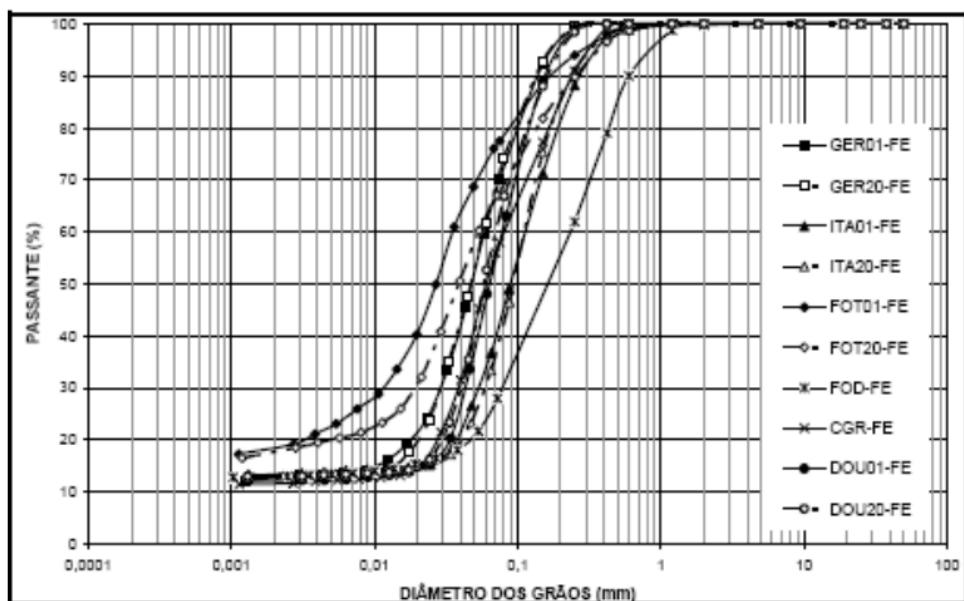


Figura 2. Curvas granulométricas de rejeito de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (Pereira, 2005).

Os valores do peso específico de rejeitos de minério de ferro em Minas Gerais corresponderam a valores superiores aos de areias quartzosas, variando entre 3,73 a 4,51 g/cm³ (Espósito, 1995). Para areias quartzosas, os valores encontrados ficam na faixa de 2,6 a 2,7 g/cm³ (Lambe e Whitman, 1979). De acordo com Lopes (2000), a concentração de ferro (Fe) se comparado a concentração de sílica (SiO₂) no rejeito, corresponde a uma proporção de 3:1. Essa alta concentração de ferro influência diretamente no peso específico dos grãos.

3.3. Parâmetros de resistência

Segundo Souza Pinto (2000), características coesivas e friccionais entre partículas do solo, determinam o comportamento resistivo do solo ao cisalhamento, definindo a tensão cisalhante máxima suportado até a sua ruptura. A resistência do solo é influenciada conforme a distribuição granulométrica, densidade os grãos e o teor de umidade no solo (Mckyes et al., 1994). Para solos arenosos, o ângulo de atrito entre partícula influênciaria totalmente a resistência ao cisalhamento, entretanto, para solos argilosos a influência depende principalmente da coesão solo, além do ângulo de atrito.

No critério Mohr-Coulomb, a ruptura do solo ocorre quando a tensão cisalhante alcança o valor de tensão cisalhante de resistência do material, no plano de resistência. A envoltória de resistência são geralmente curvas, mas para um intervalo de tensão normais pode ser ajustada em uma reta. Coulomb então, propôs uma da reta de resistência e está representado a seguir:

$$\tau = c + \sigma \tan\Phi \text{ (Equação 1)}$$

Onde: τ é a tensão de cisalhamento na ruptura; σ é a tensão normal na ruptura; c é o intercepto coesivo; Φ é o ângulo de atrito interno.

Esta equação expressa a envoltória de ruptura, em um estado multiaxial de tensões, como mostrado na Figura 3.

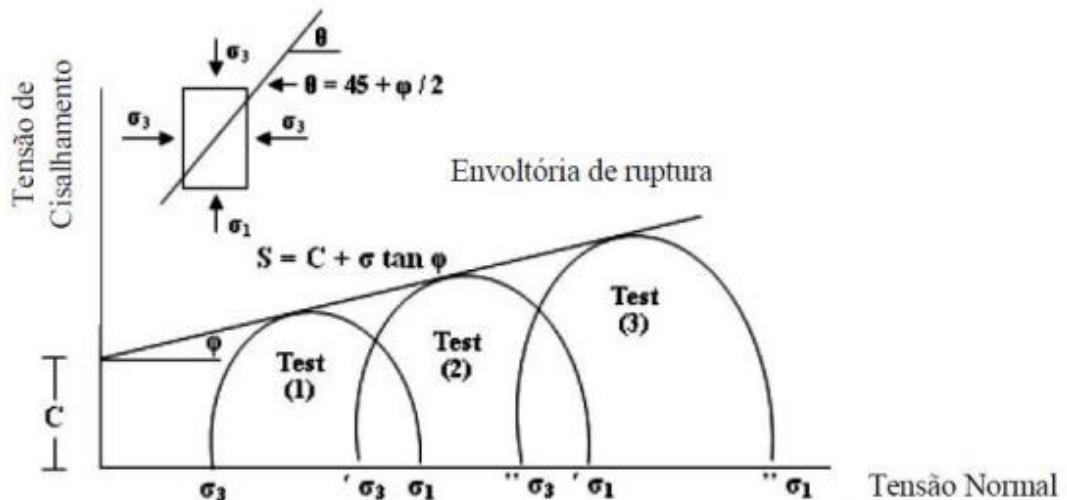


Figura 3. Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb. Fonte: Mattos, 2014.

3.4. Conceitos básicos sobre o estado crítico

Na década de 1950, Roscoe et al., (1958) realizou os primeiros modelos do estado crítico com base na teoria da plasticidade e estimou a existência de uma superfície de estado limite. Parry (1960) por meio de resultados de uma série de ensaios triaxiais de compressão

na condição drenada e não drenada em amostras de argilas, plotou em um gráfico os pontos de ruptura destes ensaios, no qual concluiu a formação de uma reta que passa pela origem do plano σ' : p' e uma linha curva no espaço $v:p'$ acompanhando o formato da curva de compressão normal.

Segundo Parry (1960), a Linha de Estado Crítico é definida pela reta formada pelos pontos de ruptura nos ensaios drenados. Portanto, as amostras que inicialmente são pré-adensadas irão a ruptura “quando o estado de tensão tocar a linha de estado crítico, independente da trajetória de tensão da amostra” (Slongo, 2008).

Para que o solo apresente condição de estado crítico, as deformações plásticas deste solo podem evoluir, mas sem que apresente variação em seu volume e nas tensões efetivas aplicadas ou no estado de tensão efetivas (Slongo, 2008).

A relação entre tensão normal, cisalhante e o índice de vazios em relação ao estado crítico estão indicados na Figura 4. Segundo Atkinson & Brandsby (1978), a condição de estado crítico foi alcançada após cerca de 10% de deformação da amostra, associado com o estado residual em que a orientação de partículas ainda não havia sido alcançada. O estado de orientação de partículas está representado na Figura 5.

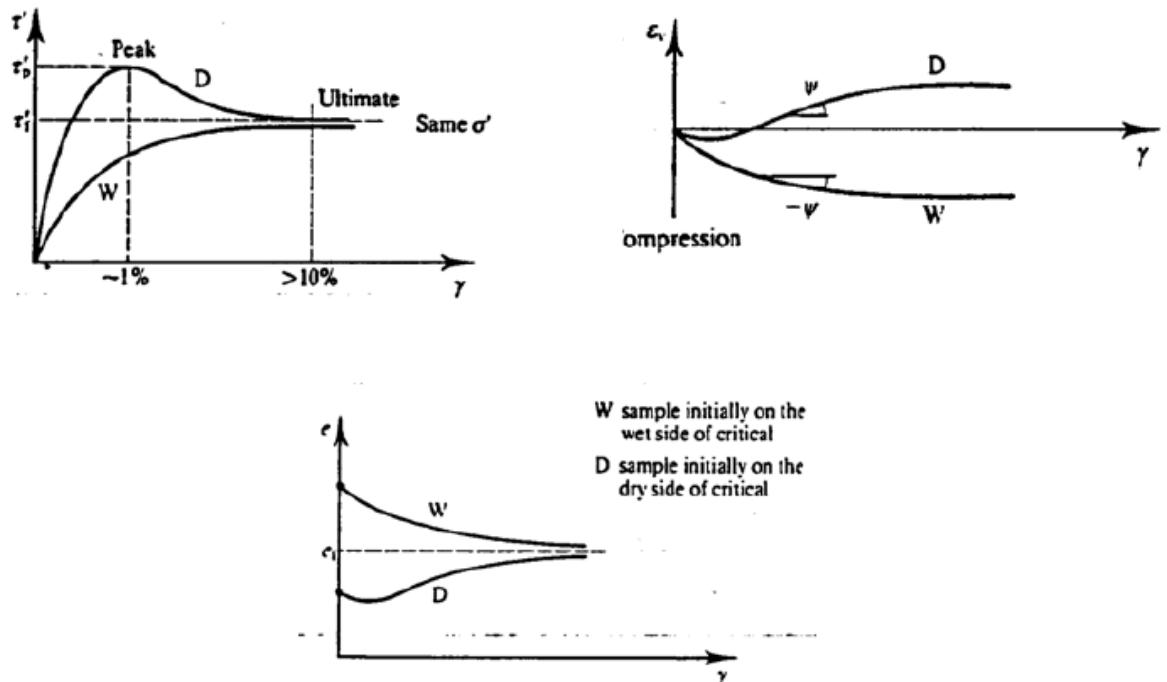


Figura 4. Representação do Estado crítico. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).

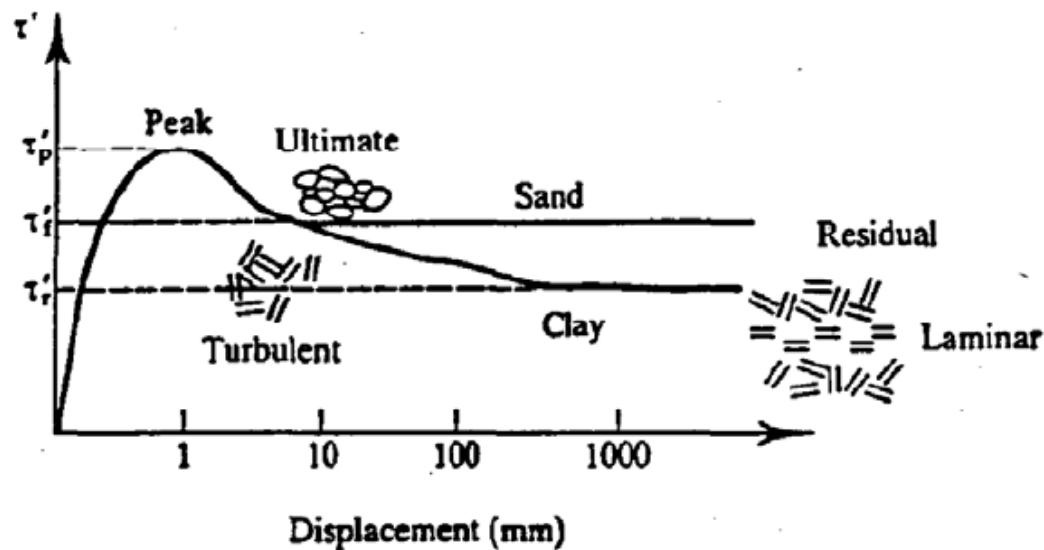


Figura 5. Comportamento do solo ao Cisalhamento. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).

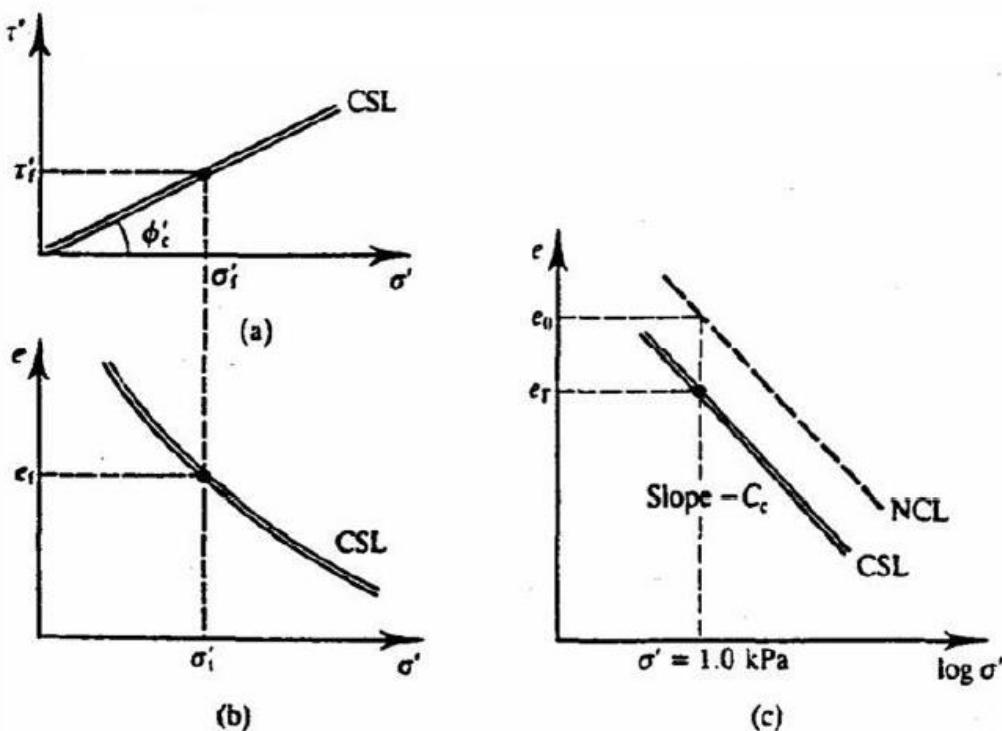


Figura 6. (a) e (b) Linha de Estado Crítico (CSL) e (c) Linha de Estado Crítico com tensão normal em escala logarítmica. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).

As equações que se seguem, apresentam o estado crítico onde o subscrito f da tensão e o índice de vazios representa o estado crítico ou estado último de ruptura (Slongo, 2008). A linha de compressão normal e do estado crítico possui a mesma inclinação, C_c (Figura 6c). O parâmetro e_0 acaba por definir uma posição na linha de compressão normal e o parâmetro e_f , na linha de estado crítico. O critério de Mohr-Coulomb na ruptura com coesão equivalente a

zero e ângulo de atrito crítico (ϕ'_c) é dado pela Equação 2. A Equação 3 apresenta o índice de vazios no estado último de ruptura.

$$\tau'_f = \sigma'_f \tan \phi'_c \text{ (Equação 2)}$$

$$e_f = e'_f \log \sigma'_f \text{ (Equação 3)}$$

De acordo com Slongo (2008), no estado crítico o solo continua a sofrer deformação cisalhante sem que apresente alteração da tensão cisalhante ou tensão normal ou índices de vazios e o deslocamento está associado ao escoamento turbulento. Durante o cisalhamento, “todos os solos, em última análise, atingem o seu estado crítico (desde que o fluxo continue turbulento), sem que haja dependência do estado de tensão inicial”. Portanto, inicialmente a tensão cisalhante última ou crítica (τ'_f) para o lado seco e úmido da linha crítica é a mesma, pois apresentam o mesmo índice de vazios e tensão efetiva.

A Linha do Estado Crítico indicado na Figura 7 representa uma idealização do estado último ou crítico de areias e argilas. Entretanto, para grãos de maiores dimensões a variação de volume durante o adensamento e cisalhamento pode apresentar rupturas dos grãos de solo, e a aplicação de grandes deformações não é necessária para identificação de seu comportamento completo (Slongo, 2008).

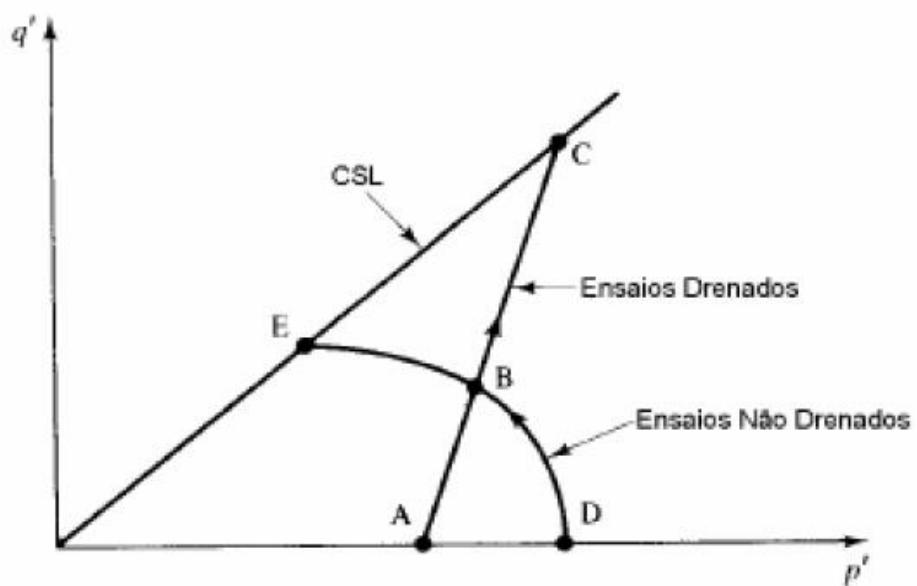


Figura 7. Linha do Estado Crítico. Fonte: Atkinson & Brandsby (1978).

3.5. Modelo Mohr-Coulomb-Vilar (MCV)

Villar (2006) propôs um método de estimativa da resistência em solos não saturadas em função da sucção, com uso de uma equação empírica (Equação 4).

$$\tau = c + (\sigma_n - u_a) \tan \Phi' \text{ (Equação 4)}$$

Onde: τ é a resistência ao cisalhamento; c é o intercepto coesivo; Φ' é o ângulo de atrito efetivo; σ_n é a tensão normal; u_a é a poro pressão do ar.

Segundo Vilar (2006), a relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção matricial, não se comporta de modo linear, pois há uma diminuição no ângulo de atrito interno em relação à sucção com o aumento da sucção matricial, tendendo a valores constantes. Com isto, a equação hiperbólica foi ajustada (Equação 5).

$$c = c' + \psi / (a + b\psi) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: c é o intercepto coesivo; c' é o intercepto coesivo efetivo do solo na condição saturada; ψ é a sucção matricial de interesse; a e b são os parâmetros de forma da hipérbole.

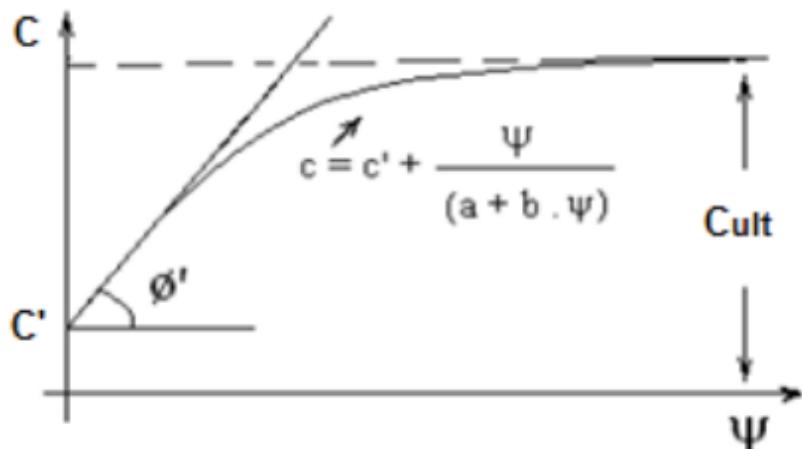


Figura 8. Relação entre a sucção matricial e a coesão aparente para determinação dos parâmetros a e b Fonte: Reis e Vilar (2004).

Os parâmetros a e b são determinados através de parâmetros de resistência e coesão aparente obtidos em ensaios de solo com umidade residual com alta sucção matricial (Equação 6 e 7). O autor também sugeriu uma equação para sucção matricial no limite do intervalo de interesse (Equação 8).

$$a = 1 / \tan \Phi' \quad (\text{Equação 6})$$

$$b = 1 / (c_{ult} - c') \quad (\text{Equação 7})$$

$$b = (1/c_m - c') - (1 / \psi \tan \Phi') \quad (\text{Equação 8})$$

Vilar (2006) também propôs assumir que a sucção matricial pouco afeta a resistência, em solos secos ao ar. Onde, segundo ele, a coesão aparente com umidade residual última pode ser determinado em amostras secas ao ar em ensaios de resistência convencionais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização do rejeito

Para o presente estudo será utilizado o rejeito de minério de ferro itabirítico com origem a Mina do Pico, localizada no município de Itabirito no estado de Minas Gerais, e gerenciada

pela Vale S.A. O projeto prevê uma área de 224 hectares, com altura de até 80 metros e um empilhamento de 135 milhões m³ de rejeitos e material estéril.

Segundo Boccamino (2017), cerca de 70% do total dos rejeitos produzidos na Mina do Pico foi classificado como rejeitos arenosos, constituídos por areia e silte, no qual são submetidos à processos de espessamento e filtragem à vácuo, até atingir a condição não saturada. Os outros 30% apresentam granulometria fina (silto-agilosa) e são depositados em pilhas após o processo de espessamento. Neste trabalho, apenas o rejeito granular será estudado.



Figura 9. A) Planta de desague piloto construída na Mina do Pico. (B) Aterro experimental formado com os rejeitos arenosos filtrados e espessados. (Relatório de projeto Vale S.A., apud Boccamino, 2017).

4.1.1. Caracterização química e mineralógica

O rejeito foi submetido a ensaio de difração de Raios-X (DRX) pelo método do pó, para caracterização química e mineralógica, com uso do equipamento *Bruker* modelo *D8 Advance Da Vinci* com detector *Lynxeye* e ótica *Twin-Twin*. A interpretação dos dados é processada no software *Suite Diffracplus* e nos bancos de dados PDF-2 (ICDD) versão 2009 e COD (*Crystallographic Open Database*). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Difratometria de Raios X (LDRX) do NAP-Geoanalítica USP, no Instituto Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP).

Ademais, foram realizadas análises físicas dos grãos, como marca de moagem, tamanho, forma dos grãos e análises químicas, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com uso do equipamento de marca *LEO* modelo 440i do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, presente dentro do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP).

4.1.2. Análise granulométrica

Para determinação da curva granulométrica do rejeito, utilizou-se dois métodos de estudos, o método de difração a laser (*Malvern*) e o método de sedimentação e peneiramento fino.

A análise granulométrica realizada no equipamento *Malvern* visou analisar o tamanho das partículas por difração a laser de baixo ângulo (*LALLS – Low Angle Laser Light Scattering*). Este método correlaciona o tamanho das partículas com a luz incidente detectada através das descontinuidades no fluxo do fluído, no qual as partículas estão dispersas em movimento.

Esta análise foi realizada utilizando o equipamento acessório *Hydro 2000MU*, para amostras em suspensão, com uso de uma alíquota da amostra destorroada colocada em uma solução de água e 3 gotas de hexametafosfato de sódio (10%) com tempo de ultrassom de 2 minutos, com velocidade da bomba de 2500 rpm e calibração do equipamento com índice de refração do quartzo e hematita. Os gráficos foram gerados pelo software *Mastersize da Malvern v. 5.60*. Este ensaio foi realizado no Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP).

As análises granulométricas por sedimentação e peneiramento fino, foram realizadas em dois laboratórios comerciais na cidade de São Paulo, Egis e Brazilian Rockhounds, sendo o primeiro sob orientação da aluna de doutorado do instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Mariane Borba de Lemos e o segundo laboratório sob a supervisão da aluna do presente projeto. Os laboratórios comerciais Egis e Brazilian Rockhounds, estão denominados como Lab. A e Lab. B, respectivamente. O ensaio de análise granulométrica realizado pelos dois laboratórios, seguiram a norma NBR-7181 com combinação de sedimentação e peneiramento.

Na Figura 10 está representado o ensaio de análise granulométrica por meio da sedimentação, seguindo as orientais da norma NBR-7181.



Figura 10. Ensaio de análise granulometria por meio da sedimentação. (a) amostra de rejeito disperso em água destilada em repouso para sedimentar. (b) Leituras de temperatura e do densímetro imerso na proveta.

4.1.3. Densidade real dos grãos

Em função da mineralogia, o peso específico dos sólidos pode variar e a presença de minérios pode aumentar muito o valor de densidade dos grãos (δ). Devido a isto, a densidades dos grãos foram calculadas segundo a norma NBR-6508/1984. Ensaio este, desenvolvido nos laboratórios comerciais Egis e Brazilian Rockhounds.

A determinação da densidade dos grãos (δ), segundo a NBR-6508/1984, utiliza como instrumentação, picnômetro de 500 cm³, termômetro, funil de vidro e bomba a vácuo. A massa específica dos grãos é determinada segundo a equação a seguir e com uso da tabela de massa específica da água na temperatura t de ensaio.

$$\delta = (M_1 \times 100 / (100 + h)) / ([M_1 \times 100 / (100+h)] + M_1 - M_2) \times \delta_t \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: δ massa específica dos grãos, em g/cm³; M_1 massa do solo úmido; M_2 massa do picnômetro+solo+água, na temperatura t de ensaio; M_3 massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, na temperatura t de ensaio; h é a umidade inicial da amostra; δ_t é a massa específica da água na temperatura t de ensaio.



Figura 11. Execução do ensaio de densidade dos grãos, com transferência da amostra para o picnômetro com auxílio do funil de vidro.

4.1.4. Limites de Consistência

Os limites de consistência referem-se ao limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Para sua determinação, utilizou-se as normas NBR-6459/1984 e NBR-7180/1984, para definir o limite de liquidez e limite de plasticidade, respectivamente.

Segundo a NBR-6459/1984, foram utilizados o aparelho de Casagrande, afim de determinar a umidade do rejeito com que as bordas inferiores da canelura se unem, sob ação de 25 golpes. Obtendo por fim, um gráfico mono-logarítmico com ao menos 6 pontos interpolados em uma linha reta, relacionando a umidade da amostra em porcentagem e o número de golpes.

O limite de plasticidade foi determinado segundo NBR-7180/1984 no qual visava moldar o rejeito em um cilindro de 10 cm de comprimento com 3 mm de diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro.

A aparelhagem necessária para realização destes ensaios, estão representados na Figura 12.

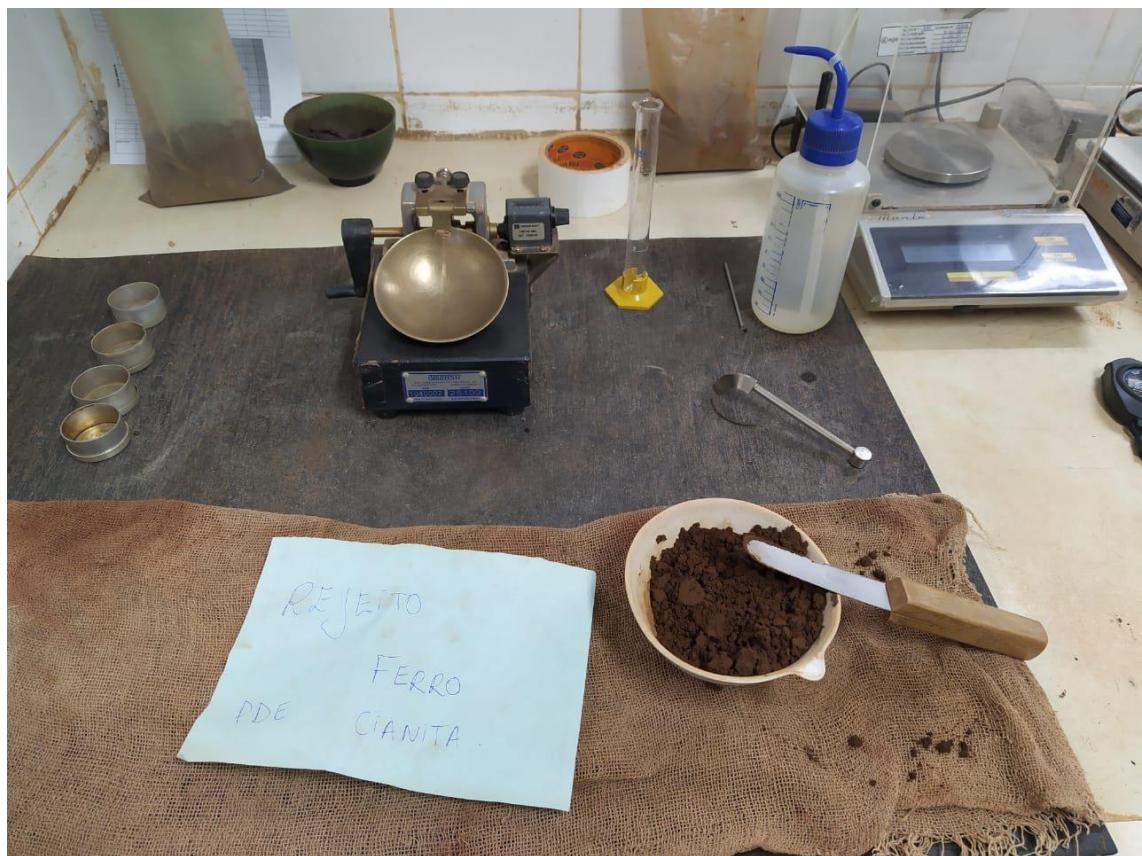


Figura 12. Aparelhagem necessária para realização da determinação do Limite de Liquidez, segundo a NBR-6459/1984, e Limite de Plasticidade, segundo a NBR-7180/1984. Os equipamentos utilizados são Casagrande, placa de vidro, recipiente para guardar amostra, espátula em lâmina, balança, pisseta e proveta.

4.2. Compactação

A energia utilizada para realização do ensaio de compactação Proctor foi de 9,91 kg.cm/cm³. Esta energia está entre a energia normal (5,5 kg.cm/cm³) e a Intermediária (12,9 kg.cm/cm³). Desta forma o procedimento de compactação foi realizado utilizando-se 5 camadas e 26 golpes por camada. A umidade de compactação foi estabelecida com base na umidade ótima do Proctor normal, que foi de 12,6%. O ensaio foi realizado seguindo as recomendações da norma NBR 7182 (ABNT, 1986). A Figura 13a, registro fotográfico da amostra compactada segundo uma energia de compactação de 9,91 kg.cm/cm³. A Figura 13b apresenta a amostra retirada do molde cilíndrico. Os resultados obtidos no ensaio de compactação foram para moldar os corpos de prova do ensaio de cisalhamento direto.



Figura 13. Ensaio de compactação Proctor. (a) Amostra compactada com energia de compactação de $9,91 \text{ kg.cm/cm}^3$, (b) retirada da amostra compactada do molde cilíndrico.

4.3. Cisalhamento direto

Com objetivo de determinar a envoltória de resistência do rejeito de minério de ferro, realizou-se o ensaio de cisalhamento direto para determinar os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito interno, se baseando no critério de Mohr-Coulomb.

O equipamento utilizado de marca *Wykeham Farrance*, pertence ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e o procedimento realizado durante o ensaio seguiu a norma internacional ASTM - *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions* (ASTM D3080).

Após a realização da compactação Proctor do material, utilizou-se um molde metálico quadrilátero com lados de 60 mm e altura de 20 mm, para moldar os corpos de prova para realização do cisalhamento direto. A quantidade do material foi baseada de acordo com o volume do molde.

Todos os corpos de prova foram colocados na caixa de cisalhamento com os seguintes conjuntos de materiais: papel filtro, placa porosa e placa ranhurada. Para medir o deslocamento verticais e horizontais da amostra, utilizou-se um transdutor do tipo *LVDT* (*Linear Variable Diferencial Transformer*). As forças horizontais foram registradas segundo um anel de carga.

Os ensaios foram realizados em duas condições: saturada e a não saturada.

6.2.1.1. Condição saturada

Três corpos de prova foram submetidos ao cisalhamento direto realizados em condição saturada/saturada, com tensão normal equivalente a 50, 100 e 200 kPa. Os corpos

de prova foram submetidos ao adensamento sob a tensão normal escolhida (50, 100 ou 200 kPa) e saturadas, com os deslocamentos verticais monitorados e anotados.

Após a etapa de adensamento, com os corpos de prova já estabilizados, foi submetido a cisalhamento sob uma velocidade de 0.0183 mm/min. Após a finalização do primeiro processo de cisalhamento foi induzido manualmente no corpo de prova, dez idas e vindas, na tentativa de se obter a condição de resistência residual no rejeito. Após este procedimento aguardou-se cerca de 1 hora para o cisalhamento final. Este procedimento foi repetido para todos os corpos de prova em condição saturada.

Ao final do ensaio, o corpo de prova foi retirado e o teor de umidade determinado. Após o resultado da umidade, foram calculados o índice de vazios, grau de saturação e densidade seca dos corpos de prova.

6.2.2.1. *Condição não saturada*

Os três corpos de prova foram moldados no mesmo dia de realização do cisalhamento. Apenas um dos corpos de prova foi submetido ao molde e cisalhamento logo após a compactação. Para os demais foram separadas porções do Proctor para perda de umidade em temperatura ambiente do laboratório, sendo um deles coberto com um papel filme, por cerca de 2 dias e depois embrulhado com alumínio, e o outro sem cobertura. As amostras ficaram armazenadas em temperatura ambiente por cerca de 4 dias e depois moldados (Figura 14).



Figura 14. Amostras armazenadas para perda de umidade ao ar ambiente.

Para os ensaios na condição não saturada, os corpos de prova foram submetidos ao adensamento sob a tensão normal de 19 kPa. Neste caso apenas com o peso do pendural foi utilizado. A escolha desta tensão, para os ensaios na condição não saturada, foi feita com o objetivo de se definir a envoltória o mais próximo possível da condição de tensão nula, como é a proposta do modelo de Vilar (2006). Após esta etapa o corpo de prova submeteu-se ao

cisalhamento sob uma velocidade de 0.0183 mm/min.. Após a finalização do primeiro processo de cisalhamento foi induzido manualmente ao corpo de prova, dez idas e vindas. Após este procedimento aguardou-se cerca de 1h para o cisalhamento final. Este procedimento foi repetido para cada corpo de prova experimental.

Ao final do ensaio, cada corpo de prova foi retirado e o teor de umidade determinado. Após o resultado da umidade, foram calculados o índice de vazios, grau de saturação e densidade seca.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização da amostra

5.1.1. Análise granulométrica

O rejeito de minério de ferro apresentou a seguinte curvas granulométricas de frequência acumulada, Figura 15, pelo método de sedimentação com uso de defloculante hexametafosfato e difração a laser. Analisando o comportamento das curvas, é possível observar resultados semelhantes entre os laboratórios comerciais e a curva granulométrica obtida pela difração a laser.

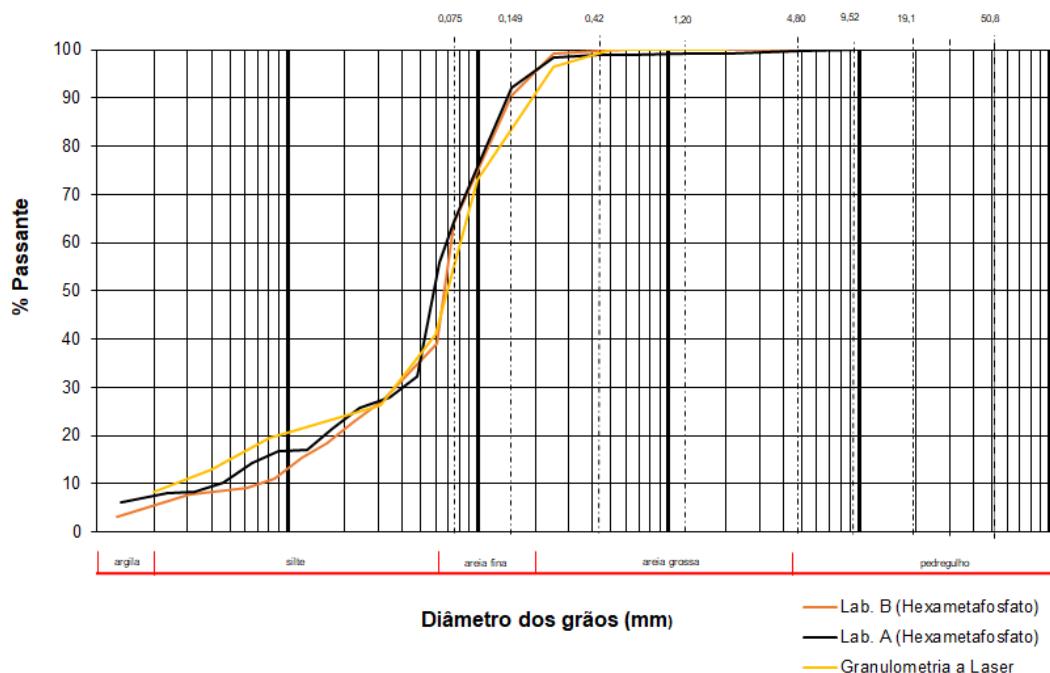


Figura 15. Distribuição granulométrica do rejeito cianita realizado por sedimentação pelas empresas comerciais Egis (Lab.A) e Brazilian Rockhounds (Lab.B) com uso de defloculante hexametafosfato e curva granulométrica por difração a laser (Malvern).

Observando as curvas granulométricas é possível determinar o coeficiente de não uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) (Tabela 1). Como analisado na Tabela 3, o Lab. A e Lab. B, apresentou uma uniformidade média de diâmetro de partículas, entretanto, a granulometria a laser resultou em desuniformidade de diâmetro de partículas. Apenas o Lab. B correspondeu a um rejeito bem graduado, com resultado entre 1 e 3. Porém, o Lab. A e a granulometria a laser determinou que o rejeito é mal graduado. Deve-se destacar que durante o processo do ensaio de sedimentação o rejeito apresenta uma espuma sobrenadante que dificulta a determinação precisa e acurada da densidade. Este aspecto pode ter influenciado as diversas curvas obtidas no trecho fino.

Tabela 1. Parâmetros da curva de distribuição granulométrica, com determinação diâmetro efetivo (D_{10}), D_{30} , D_{50} , coeficiente de não uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura do rejeito (C_c).

	Lab. A	Lab. B	Granulometria Laser
D_{10}	0,004	0,007	0,002
D_{30}	0,035	0,036	0,037
D_{60}	0,068	0,072	0,080
C_u	14,780	10,140	30,770
C_c	3,920	2,540	6,580

5.1.2. Limites de Consistência

Os limites de Atterberg está relacionado a presença de material final e o comportamento específico deste material na amostra. Os ensaios foram realizados seguindo as normas NBR-6459/1984 e NBR-7180/1984.

Na determinação do limite de liquidez, a amostra deslizava no aparelho de Casagrande assim que se iniciava a contagem de quedas, invalidando o princípio da norma NBR-6459/1984 (Figura 16a e 16b). Além disto, a elaboração de cilindros para determinação de limite de plasticidade, era impossibilitada devido a fragmentação da amostra antes de ser atingir 3 mm de diâmetro, como determinado pela norma NBR-7180/1984 (Figura 16c). Portanto, a amostra foi classificada como não plástica, mesmo apresentando um teor de partículas $< 2\mu\text{m}$ de aproximadamente 8%.

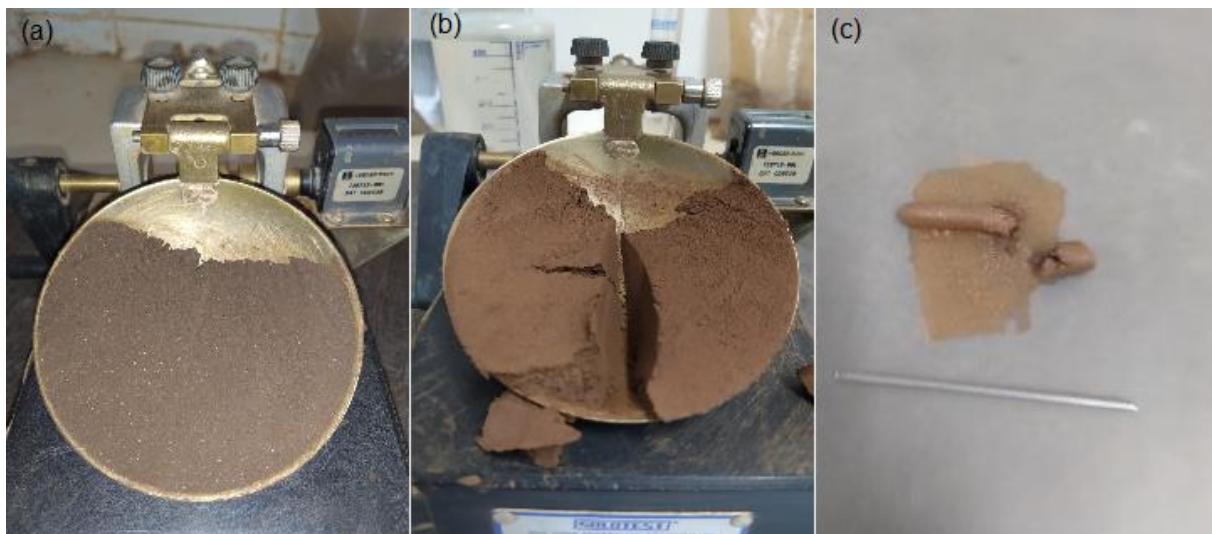


Figura 16. Realização de ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade. (a) Preparação da amostra no aparelho Casagrande, para determinação do limite de liquidez. (b) Deslizamento da amostra com apenas 3 golpes. (c) Fragmentação da amostra antes de se atingir 3 mm de diâmetro.

Seguindo a classificação unificada dos solos (SUCS), este rejeito é classificado como ML, com característica de silte e areias muito finas de baixa plasticidade.

5.1.3. Análise morfologia e química

As fases minerais presentes na amostra de rejeito obtidas por difração de raios-X, são observadas no difratograma na Figura 17. De acordo com os dados obtidos, o rejeito estudado é composto consideravelmente por quartzo e hematita, sendo a goethita, muscovita e caulinita, minerais que ocorrem em menores proporções.

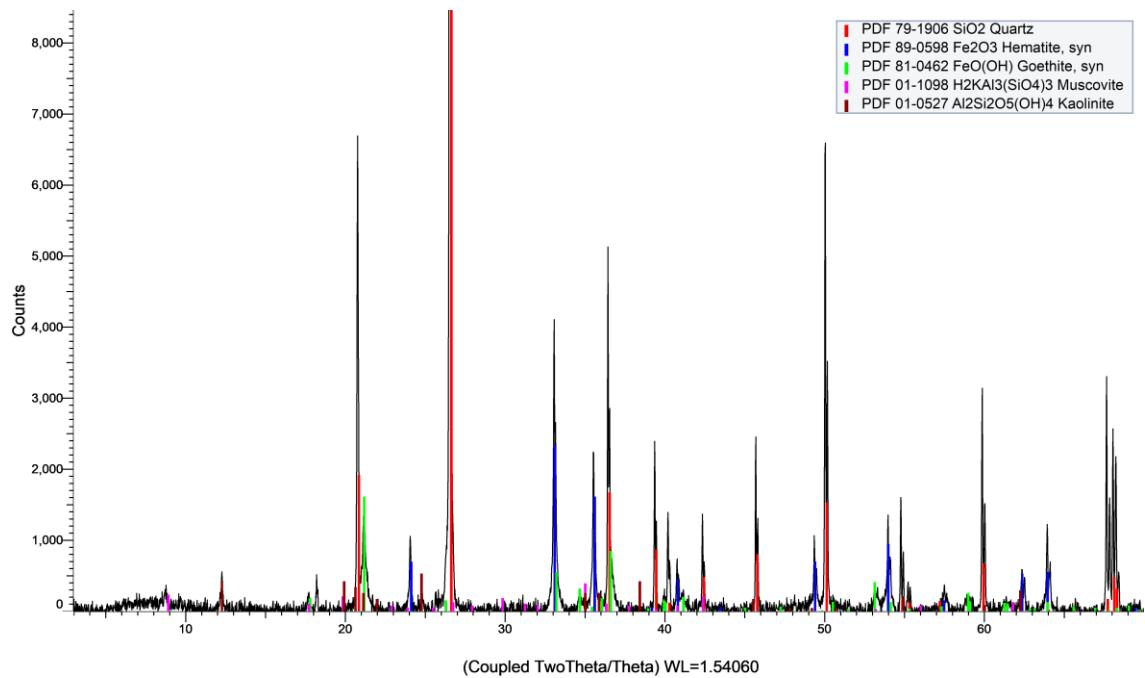


Figura 17. Difratograma de raio-X da amostra de rejeito, com presença de quartzo e hematita em maiores proporções, e a goethita, muscovita e caulinita, em menores proporções.

Com as análises realizadas na microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível analisar morfológicamente e quimicamente a disposição das partículas presente no rejeito. As presenças de partículas de maiores dimensões, com aproximadamente 90 µm, ocorrem variando de subarredondadas a angulosas, Figura 18a, representados predominantemente por grãos de quartzo no qual evidenciou altos teores de SiO₂. Além disto, aderidos a estas partículas observou-se material fino a pulverulento, característico de argilominerais. Partículas de menor dimensão, Figura 18b e 18c, variam de subarredondadas a angulosas de composição quartzosa, e partículas com formas tabulares de hematita. Partículas muitas finas, analisadas na Figura 18b estão levemente arredondados.

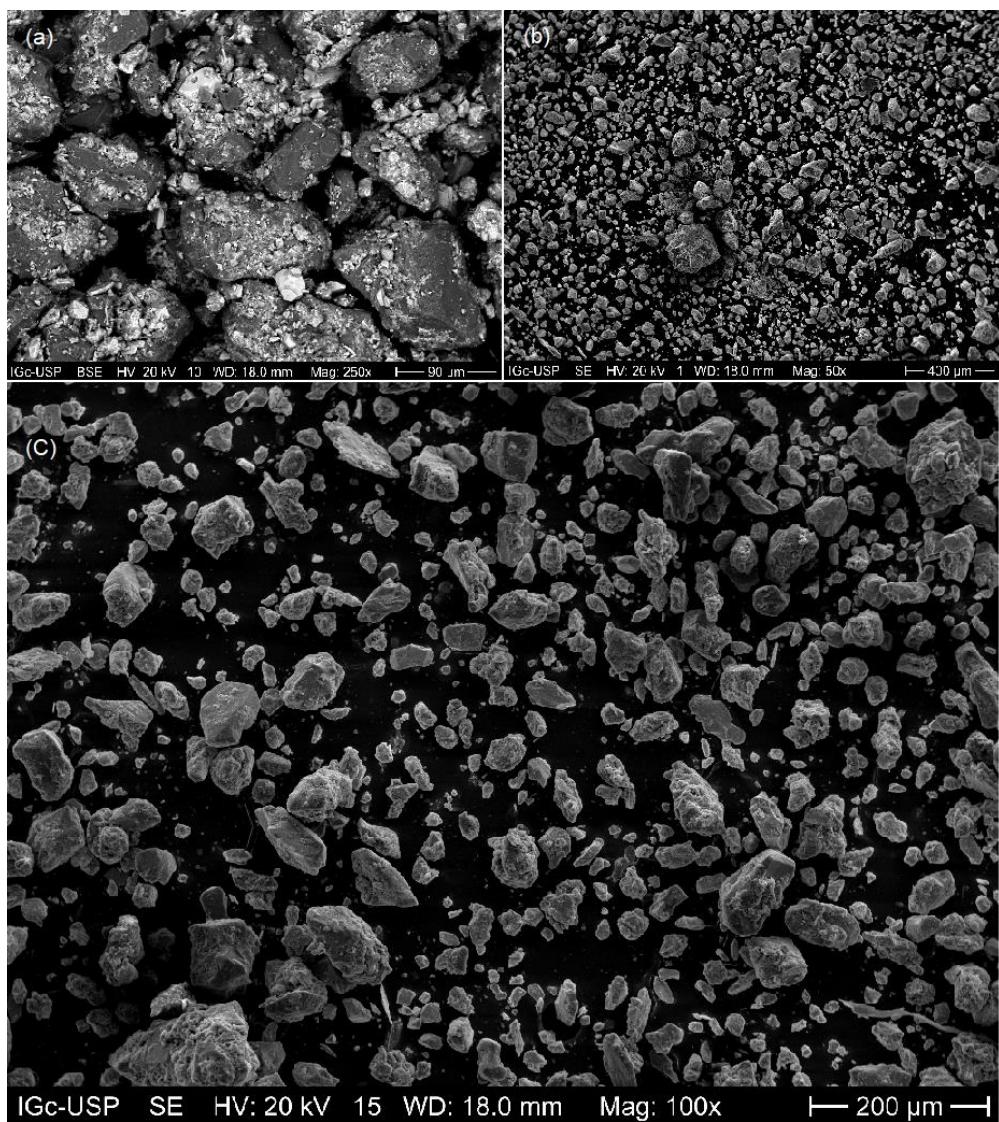


Figura 18. Fotomicrografias do rejeito obtidos na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (a) partículas com dimensões aproximadas de 90 μm , variando de subarredondados a angulosos, com presença de material fino envolto da partícula. (b) Partículas menores de 400 μm , variando de subarredondadas a angulosas, com partículas menores levemente arredondadas, e presença de partículas tabulares de hematita. (c) Partículas menores a equivalente de 200 μm , subarredondadas a angulosas, e partículas tabulares de hematita.

Com as fotomicrografias foi possível analisar a distribuição das partículas, evidenciando a predominância das partículas na fração granulométrica areia fina e a alta concentração de quartzo e hematita na trama mineral. Com relação a grau de esfericidade, a amostra foi caracterizada com baixa esfericidade de partículas.

5.1.4. Densidade real dos grãos

A presença acentuada de partículas de ferro neste rejeito, cuja massa específica está em torno de 5,25 g/cm³, e de partículas de quartzo em torno de 2,65 g/cm³, tende a influenciar

e apresentar uma massa específica do rejeito dentro desta faixa de variação. Por meio do método do picnômetro os laboratórios comerciais, Lab. A e B, resultaram em valores próximos entre si de densidade dos grãos (Tabela 2). Nesta pesquisa, os valores obtidos para o rejeito de minério de ferro são de 2,976 e 3,07 g/cm³. Seguindo as pesquisas existentes na literatura, observa-se que os valores obtidos nesta pesquisa, representados em vermelho e preto na Figura 19, estão dentro da faixa de 2,75-3,30 g/cm³, determinados de estudos anteriores para rejeitos de minério de ferro.

Tabela 2. Resultado da densidade dos grãos do rejeito de minério de ferro, obtidos pelo laboratório A e B.

	Lab. A	Lab. B
Dens. dos Grãos (g/cm ³)	2,976	3,07



Figura 199. Densidade dos grãos de rejeito de minério de ferro estudados anteriormente e densidade dos grãos determinados pelo Lab. A, em vermelho, e Lab B, em preto. Fonte: Modificado de Sotomayor, 2018.

5.2. Compactação

O ensaio de compactação consistiu em duas etapas, a primeira para determinação da curva de compactação do Proctor Normal deste rejeito, com resultado representado na Figura 20, e determinação da umidade ótima de compactação e densidade seca dos grãos (ρ_d), apresentados na Tabela 3.

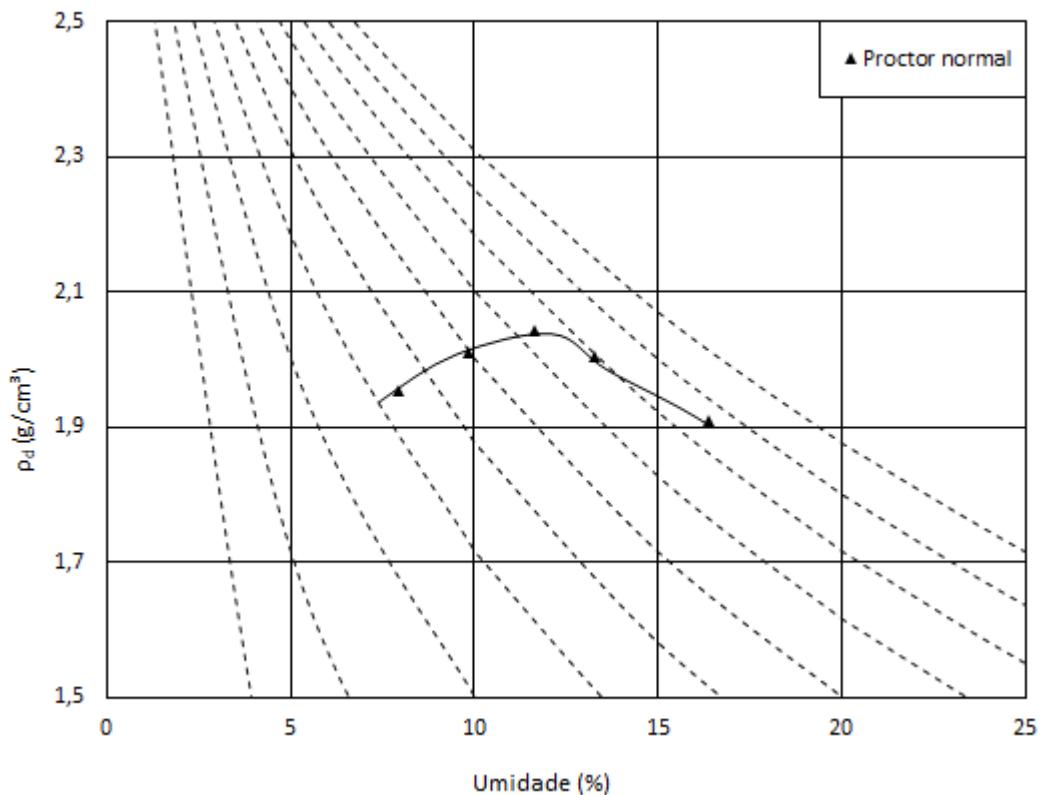


Figura 20. Curva de compactação Proctor Normal.

Tabela 3. Resultados da compactação Proctor Normal com a umidade ótima de compactação e sua respectiva densidade seca dos grãos (ρ_d).

	ρ_d (g/cm³)	Umidade Ótima (%)
Proctor Normal	2,04	12,6

Na segunda etapa, realizou a compactação do rejeito para moldagem de corpos de prova a serem utilizados no cisalhamento direto. Esta compactação executada com umidade próxima a ótima do Proctor normal, com 5 camadas e 26 batidas, apresentou energia de compactação superior ao do Proctor normal, equivalente a 9,91 kg.cm/cm³, e densidade seca dos grãos (ρ_d) superior ao máximo determinado. Seguindo com a mesma metodologia de compactação, três compactações Proctor foram realizados e todos estão representados na Figura 21, evidenciando o aumento da densidade seca dos grãos (ρ_d) em relação ao Proctor normal em decorrência do aumento de números de camadas adotados. A Tabela 4 apresenta os resultados de umidade, densidade seca dos grãos (ρ_d) e o grau de compactação (GC) em relação ao Proctor normal para cada compactação.

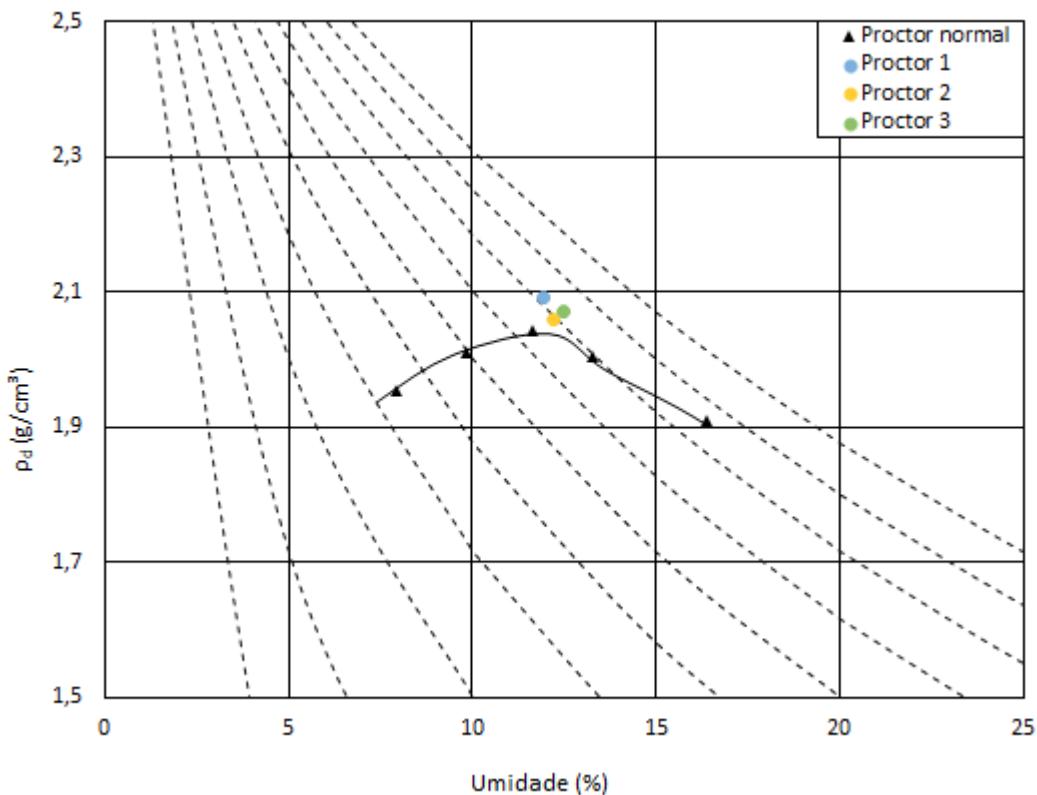


Figura 21. Identificação da densidade seca dos grãos (ρ_d) de cada compactação Proctor realizada a próximo a umidade ótima de compactação do Proctor normal.

Tabela 4. Resultados obtidos de umidade e densidade seca dos grãos (ρ_d), para cada compactação Proctor.

	ρ_d (g/cm³)	Umidade (%)	GC
Proctor 1	2,092	11,95	102,55%
Proctor 2	2,059	12,20	100,93%
Proctor 3	2,069	12,50	101,42%

Após as três compactações, foi possível observar em cada cilindro de Proctor, a ocorrência de água na base do cilindro, proveniente da amostra compactada (Figura 22).



Figura 22. Água na base do cilindro do Proctor após a compactação.

5.3. Cisalhamento direto

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da amostra de rejeito em condição saturada e não saturada. Os corpos de prova analisados foram submetidos a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, em condição saturada. Para os cisalhamentos não saturadas, a tensão normal sobre as amostras foi realizada apenas com uso do pendural, equivalente a 19 kPa.

Como critério de ruptura do rejeito, foi adotado os pontos de máxima tensão cisalhante denominada como tensão cisalhante de pico. (τ_{pico}), e tensão residual, que o corpo de prova ainda sustenta, após a tensão cisalhante de pico.

5.3.1. Condição Saturada

A Figura 23 apresenta os gráficos obtidos com os ensaios de cisalhamento direto submetidos a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, em condição saturada. A Figura 23a demonstra a curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal do corpo de prova em cada tensão normal aplicada, sendo caracterizado o ponto de ruptura da amostra como a tensão cisalhante de pico (τ_{pico}). A Figura 23b apresenta o deslocamento vertical por deslocamento horizontal de cada corpo de prova da Figura 23a.

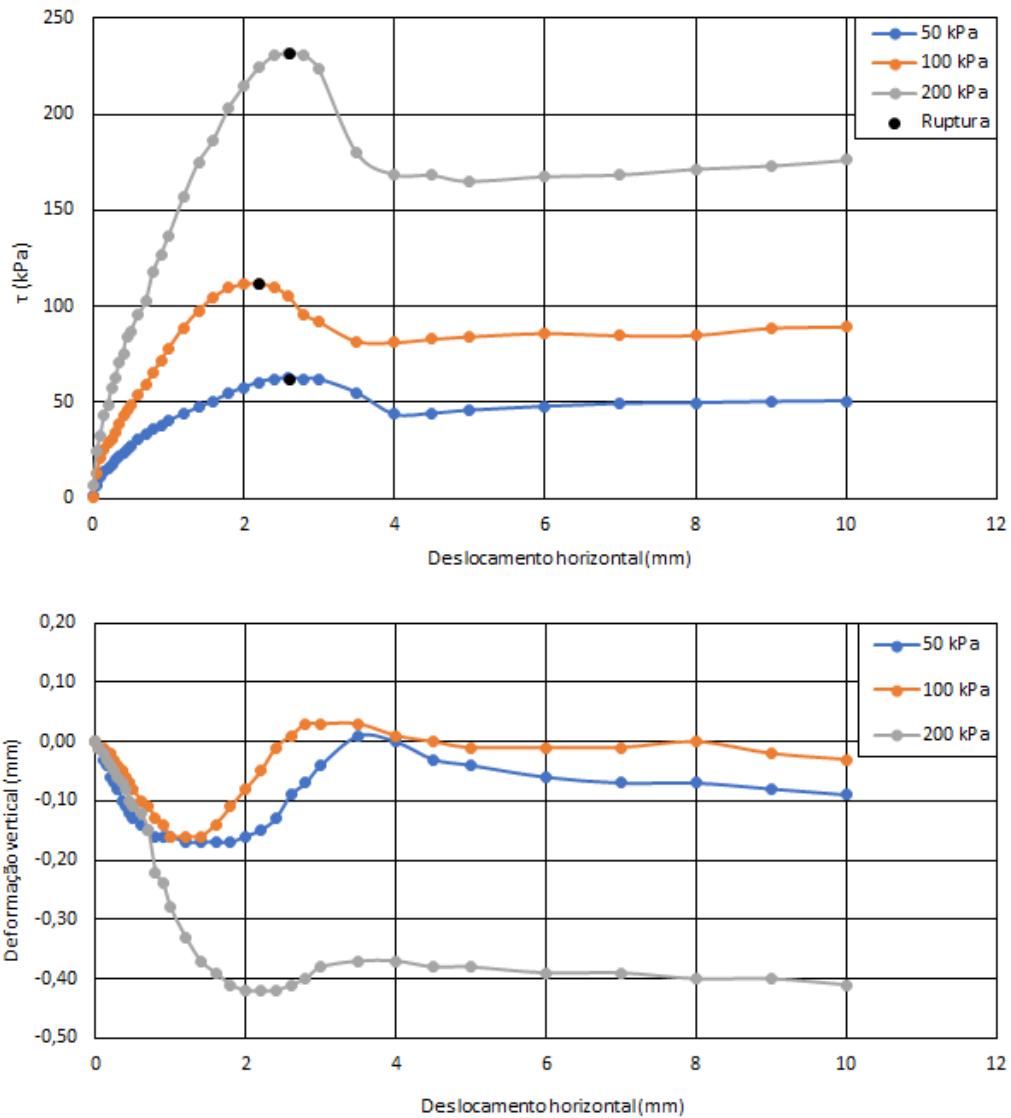


Figura 23. Resultados do ensaio de cisalhamento direto, saturado, com tensão normal de 50, 100 e 200 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal, em cada tensão normal aplicada, com o ponto da ruptura estabelecido na tensão cisalhante de pico (τ_{pico}). (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal ocorrido durante o cisalhamento, em cada tensão normal aplicada.

Na Figura 24 são apresentados os gráficos referentes ao cisalhamento “residual”, ou seja, após 10 idas e vindas, um segundo cisalhamento foi realizado em cada corpo de prova, para determinar o comportamento do rejeito similar ao residual. A Figura 24a demonstra a curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal “residual” dos corpos de prova em cada tensão normal aplicada (50, 100 e 200 kPa), sem apresentar ponto de ruptura já que a amostra se encontra cisalhada. Na Figura 24b são apresentados o deslocamento vertical por deslocamento horizontal, destes corpos de prova apresentados na Figura 24a.

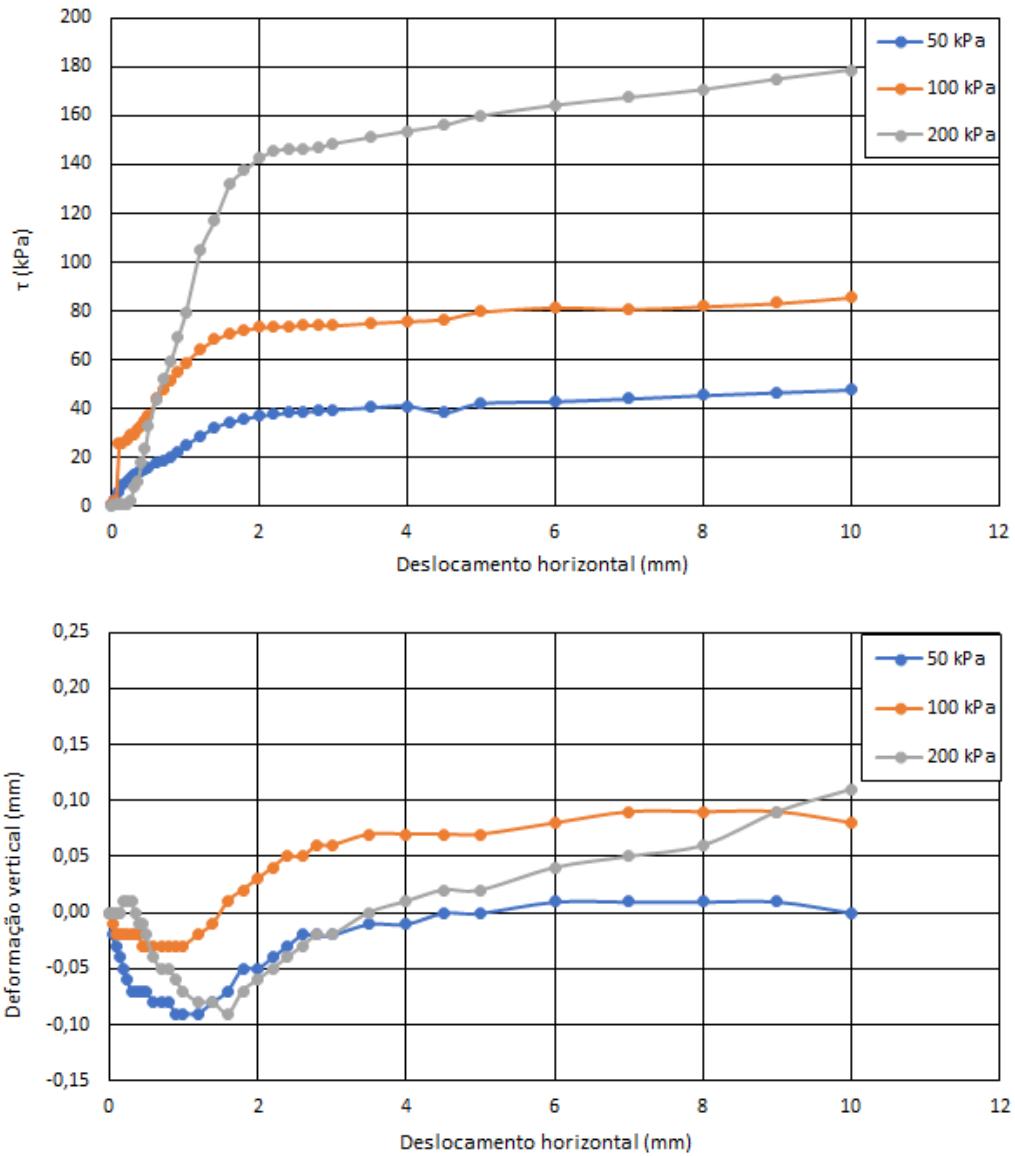


Figura 24. Resultados do ensaio de cisalhamento direto para o rejeito residual, saturado, com tensão normal de 50, 100 e 200 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal do rejeito residual, em cada tensão normal aplicada. (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal ocorrido durante o cisalhamento do rejeito residual, em cada tensão normal aplicada.

A tabela 5 representa os valores da tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) em cada tensão normal aplicada (σ_N), umidade, densidade seca dos grãos (ρ_d), grau de saturação (S) e índice de vazios (e), de cada corpo de prova cisalhado em condição saturada.

Tabela 5. Resultados obtidos de cada amostra cisalhada, com seus respectivos valores de tensão normal aplicada (σ_N), tensão cisalhante de pico atingida (τ_{pico}), umidade, grau de saturação, índice de vazios e densidade dos grãos (ρ_d).

Amostra	σ_N (kPa)	τ_{pico} (kPa)	Umidade (%)	S (%)	e	ρ_d (g/cm³)
CP-01	50	39,72	14,83	49,3	0,81	1,84
CP-02	100	71,37	14,49	48,18	0,74	1,91
CP-03	200	148,54	12,86	42,73	0,89	1,76

Analizando a resistência do rejeito, nota-se um aumento da tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) conforme se aplica uma tensão normal maior. Após o cisalhamento, ou seja, após a tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) há uma queda de tensão até sua estabilização. Observando o comportamento da curva tensão deslocamento do rejeito, observa-se que não há tensão cisalhante de pico (τ_{pico}), e sim há um aumento progressivo da tensão cisalhante até atingir uma tensão cisalhante máxima, semelhante ao da estabilização atingida após a ruptura no primeiro cisalhamento.

As envoltórias de resistência foram definidas por meio de uma aproximação linear entre os pontos da ruptura no software *Excel*, utilizadas para calcular os parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito. Os resultados das envoltórias são apresentados na Figura 25. Também foram definidas as envoltórias da área corrigida, ou seja, os pontos das tensões foram ajustados descontando o seu deslocamento no decorrer do ensaio e assim estabelecendo uma aproximação linear entre elas. As amostras do primeiro cisalhamento atingiram uma tensão cisalhante de pico (τ_{pico}), representada como ponto da ruptura, e do cisalhamento residual atingiram uma tensão cisalhante máxima, representados na Figura 25, assim como suas respectivas envoltórias de resistências. A envoltória não corrigida e a envoltória corrigida não apresentaram diferenças entre valores de coesão e ângulo de atrito para estes ensaios.

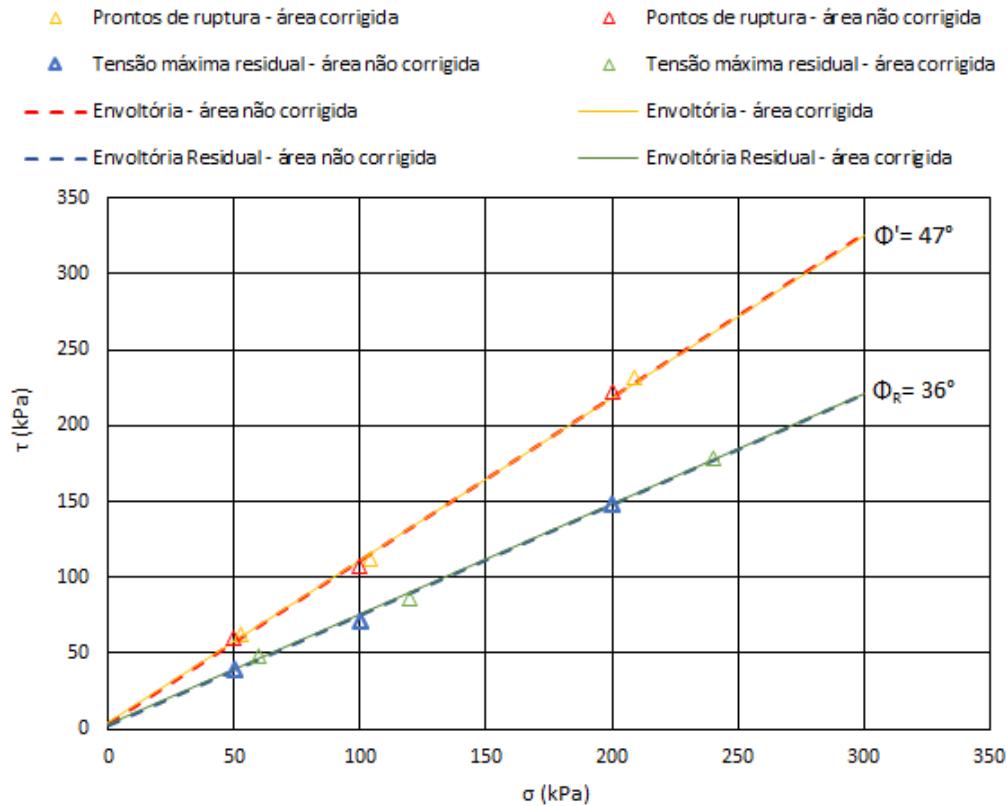


Figura 25. . Envoltórias de resistência do rejeito de minério de ferro, determinados no primeiro cisalhamento com ângulo de atrito $\Phi'= 47^\circ$ e para o rejeito próximo do residual com ângulo de atrito de $\Phi_R= 36^\circ$.

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros de resistência obtidos para o rejeito de minério de ferro, como ângulo de atrito e coesão, no primeiro cisalhamento e cisalhamento residual.

Tabela 6. Valores de ângulo de atrito e coesão das envoltórias de resistência do primeiro cisalhamento e cisalhamento residual.

	Primeiro Cisalhamento	Cisalhamento Residual
ϕ'	47°	36°
c' (kPa)	4	3

Ao analisar as envoltórias e os parâmetros de resistência, observa-se que a envoltória do primeiro cisalhamento atinge valores superiores de tensão cisalhante que o rejeito residual, com parâmetros de resistência equivalentes a 4 e 47° , para coesão e ângulo de atrito, respectivamente. Esta variação ocorre devido ao rejeito residual estar cisalhados, caracterizando uma diminuição da coesão e ângulo de atrito, para 3 e 36° , respectivamente. Este comportamento era esperado, conforme os registros acadêmicos anteriores.

5.3.2. Condição não saturada

Em condição não saturada, os corpos de prova com umidade de 0,8%, 7,46% e 11,64%, foram submetidos ao cisalhamento com tensão normal de 19 kPa. Os resultados obtidos do cisalhamento estão representados na Figura 26. A Figura 26a demonstra a curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal de cada corpo de prova, identificados por seu respectivo teor de umidade. Nesta Figura 26a, o ponto de ruptura de cada amostra é definido como a tensão cisalhante de pico (τ_{pico}). Já a Figura 26b representa o deslocamento vertical por deslocamento horizontal de cada corpo de prova cisalhados apresentados na Figura 26a.

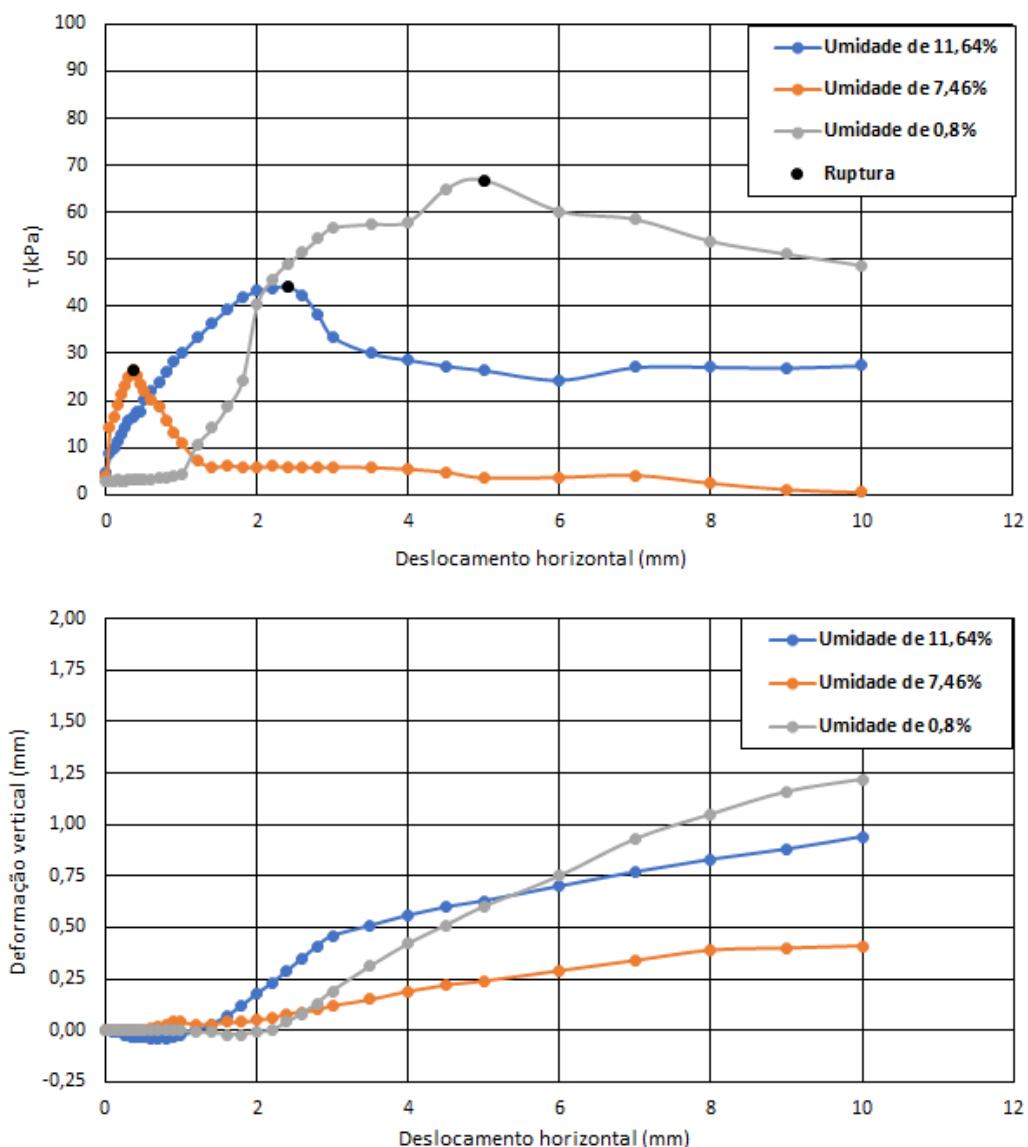


Figura 26. Resultados do ensaio de cisalhamento direto não saturado, com tensão normal 19 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal de cada corpo de prova identificados pelo seu teor de umidade, e o ponto da ruptura é estabelecido na tensão cisalhante de pico (τ_{pico}). (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal ocorrido durante o cisalhamento, em cada amostra.

A Figura 27 exibe os dados adquiridos no cisalhamento residual dos corpos de prova, após as 10 idas e vindas com tensão normal de 19 kPa. Assim como ocorreu com os corpos de prova saturados no cisalhamento residual, o rejeito não saturado também não apresentou tensão cisalhante de pico (τ_{pico}), porém a tensão cisalhante aumentou progressivamente até sua estabilização, atingindo uma tensão cisalhante máxima semelhante ao da estabilização após a ruptura no primeiro cisalhamento (Figura 27a). A Figura 27b apresenta o deslocamento vertical por deslocamento horizontal destes corpos de prova.

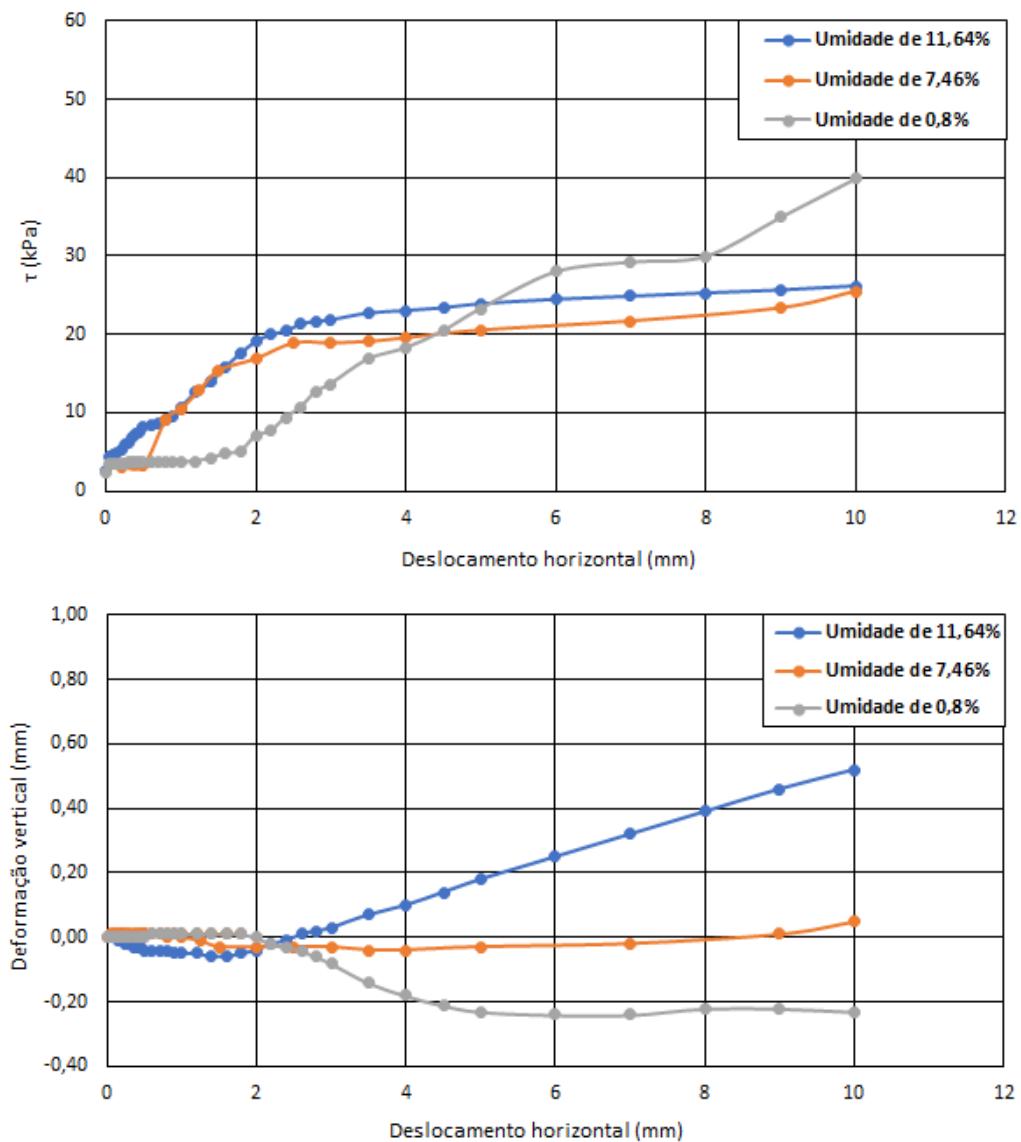


Figura 27. Resultados do ensaio de cisalhamento direto residual não saturado, com tensão normal 19 kPa. (a) Curva de tensão cisalhante por deslocamento horizontal de cada corpo de prova identificados pelo seu teor de umidade, sem apresentar ponto de ruptura. (b) Gráfico de deslocamento vertical por deslocamento horizontal de cada corpo de prova.

Analizando a Figura 27a é possível identificar uma anomalia do comportamento resistivo da amostra ao ser submetido ao cisalhamento. Esta anomalia é observada apenas no corpo de prova com umidade de 7,46%, onde a sua tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) foi

inferior a tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) da amostra com 11,64% de umidade, comportamento não comum para este determinado material. Este resultado ocorreu devido a caixa exterior da bipartida, do cisalhamento direto, não estar completamente alocada na placa de apoio com rolamentos. Este incidente no momento de montagem do cisalhamento da amostra com 7,46% de umidade, descredibilizou o resultado deste corpo de prova. Portanto, apenas os resultados das amostras com 0,8% e 11,64% de umidade, serão considerados para a discussão.

A tabela 7 indica os resultados obtidos de tensão normal (σ_N (kPa)), tensão cisalhante máxima (τ máx (kPa)), umidade, grau de saturação (S), índice de vazios (e) e a densidade seca (ρ_d (g/cm³)) de cada corpo de prova ensaiado em condição não saturada.

Tabela 7. Resultados obtidos de cada amostra cisalhada em condição não saturada, com seus respectivos valores de tensão normal aplicada (σ_N), tensão cisalhante de pico atingida (τ_{pico}), umidade, grau de saturação, índice de vazios e densidade dos grãos (ρ_d).

CP-Não Saturado	σ_N (kPa)	τ máx (kPa)	Umidade (%)	S (%)	e	ρ_d (g/cm ³)
CP-04	19	42,44	11,64	38,64	0,71	1,94
CP-05	19	26,34	7,46	24,81	0,66	2,01
CP-06	19	61,24	0,80	2,68	0,66	2,00

Segundo Lambe & Whitman (1972), para solos granulares com o mesmo coeficiente de uniformidade e granulometrias iguais, compactadas com a mesma energia e alcançando valores de índices de vazios distintos, apresentam ângulo de atrito análogos. Visto que o rejeito de estudo se enquadra nas características físicas, citadas por eles, onde o rejeito apresenta as mesmas características de compactação, o ângulo de atrito determinado no primeiro cisalhamento saturado foi replicado nos cisalhamentos não saturados, ou seja, para estimar a envoltória de resistência das amostras não saturadas, com tensão normal de 19 kPa, foi utilizado o ângulo de atrito efetivo determinado no primeiro cisalhamento saturado. Os resultados das envoltórias de cisalhamentos estão representados na Figura 28, no qual aborda todas as envoltórias de resistência do rejeito já determinados.

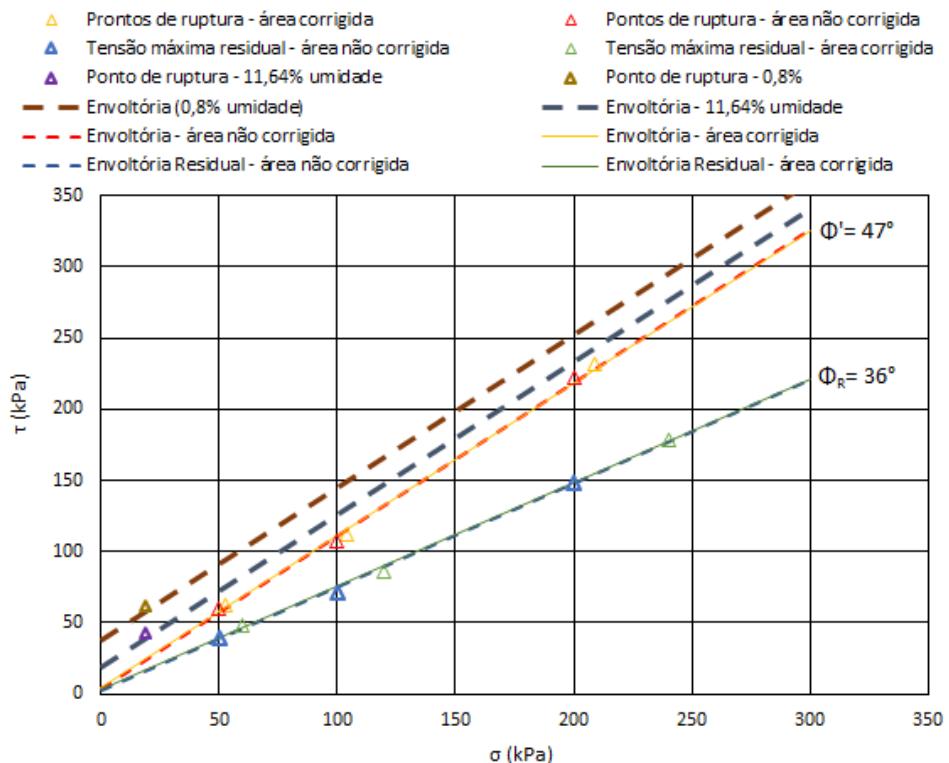


Figura 28. Envoltórias de resistência do rejeito de minério de ferro, em condição saturada e não saturada, ambos com ângulo de atrito $\Phi' = 47^\circ$ para o primeiro cisalhamento, e ângulo de atrito de $\Phi_R = 36^\circ$ para o rejeito próximo do residual em condição saturada.

Analizando as envoltórias, há um aumento da tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) e da coesão nas amostras conforme diminui o teor de umidade, ou seja, para amostras mais secas, a coesão e a tensão cisalhante de pico (τ_{pico}) tende a aumentar. Conforme representado na Figura 28, para as envoltórias das amostras não saturadas, há um acréscimo de coesão aparente (C_a) em relação a amostras saturadas, devido a menor umidade.

Na tabela 8 são apresentados os parâmetros de resistência das envoltórias definidas por meio de ensaio de cisalhamento direto para o rejeito, cisalhados em condição saturada e não saturada, do primeiro cisalhamento e cisalhamento residual. A Tabela 8 apresenta a diminuição da coesão e ângulo de atrito efetivo do primeiro cisalhamento, para o cisalhamento residual, realizados em condição saturada. Também é notado nas amostras cisalhadas em condição não saturada, um acréscimo da coesão aparente (C_a) em relação as amostras em condição saturada, e o aumento da tensão cisalhante de pico (τ_{pico}), com a diminuição do teor de umidade.

Tabela 8. Parâmetros de resistência do rejeito, para amostras saturadas e não saturadas, do primeiro cisalhamento e do cisalhamento residual.

	Saturado		Não saturada	
	Primeiro Cisalhamento	Cisalhamento Residual	Primeiro Cisalhamento (11,46%)	Primeiro Cisalhamento (0,8%)
ϕ	47°	36°	47°	47°
c(kPa)	4	3	19	38

Com o intuito de aprimorar as análises da resistência do rejeito de minério de ferro, a metodologia proposta por Vilar (2006) foi aplicada. Segundo a metodologia de Vilar (2006), a envoltória de resistência ao cisalhamento para solos não saturados em função da sucção não é linear. Com base nisto, o proposto método utiliza os parâmetros de tensão eficazes de amostras saturadas, secas ao ar ambiente ou amostras submetidas a controle de sucção, para estabelecer uma relação hiperbólica empírica, afim de ajustar os dados experimentais e estimar a envoltória de resistência para solos não saturadas.

Com uso do método do Vilar (2006), foi estimado a envoltória de resistência para os cisalhamentos não saturado. Para sua aplicação, a sucção da amostra foi estimada com base nos valores utilizados por Vilar (2006), cujo os dados correspondem ao de sucção determinados de amostras secas ao ar. Com o uso dos parâmetros já determinados no ensaio de cisalhamento direto como: ângulo de atrito efetivo, densidade seca dos grãos e umidade das amostras. O método foi aplicado e apresentou o seguinte resultado (Figura 29).

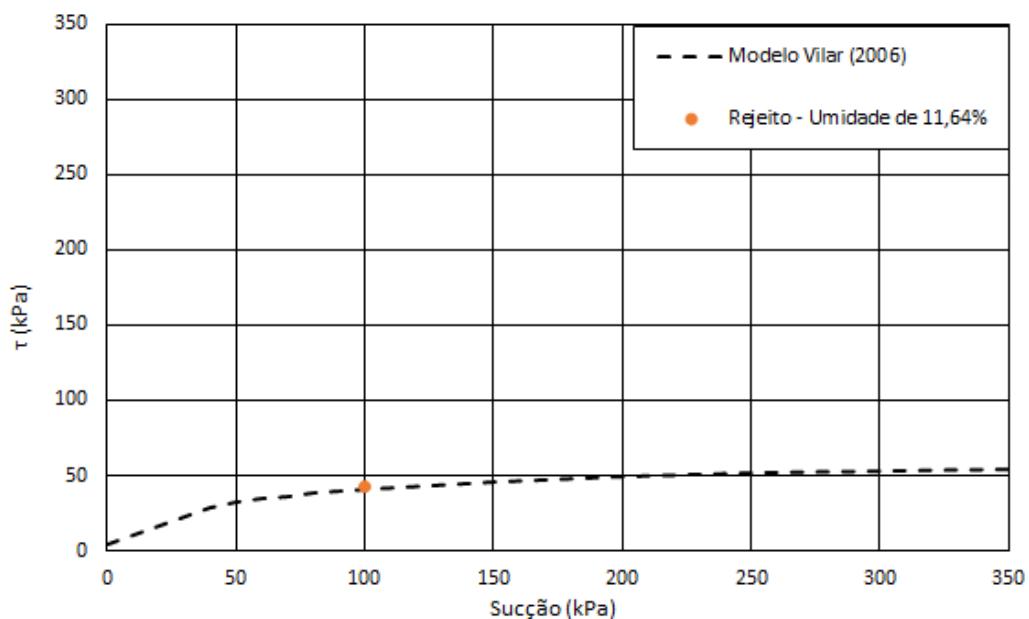


Figura 29. Envoltória de resistência estimada segundo o modelo de Vilar (2006), da amostra cisalhada não saturada, com teor de umidade de 11,64%.

Considerando também o método de Fredlund *et al.* (1996), onde produziu uma relação linear entre a resistência de cisalhamento e a sucção até a entrada de ar no solo. Vilar (2006)

estabeleceu que a tensão normal estabelecida no momento do cisalhamento, é equivalente a contribuição da sucção matricial na amostra em solos saturados. É, portanto, possível analisar tal relação linear entre as envoltórias determinadas através do modelo de Vilar (2006) e ensaio de cisalhamento direto saturado.

Para compreender melhor a variação da envoltória de resistência utilizando o método proposto por Vilar (2006), a Figura 30, mostra a comparação entre a envoltória determinada segundo o ensaio de cisalhamento direto em condição saturada e a envoltória determinada pelo método. Na Figura 30b, observamos uma resistência máxima atingida para sucção na ordem de 100 kPa, seguindo para a estabilização da resistência após este ponto.

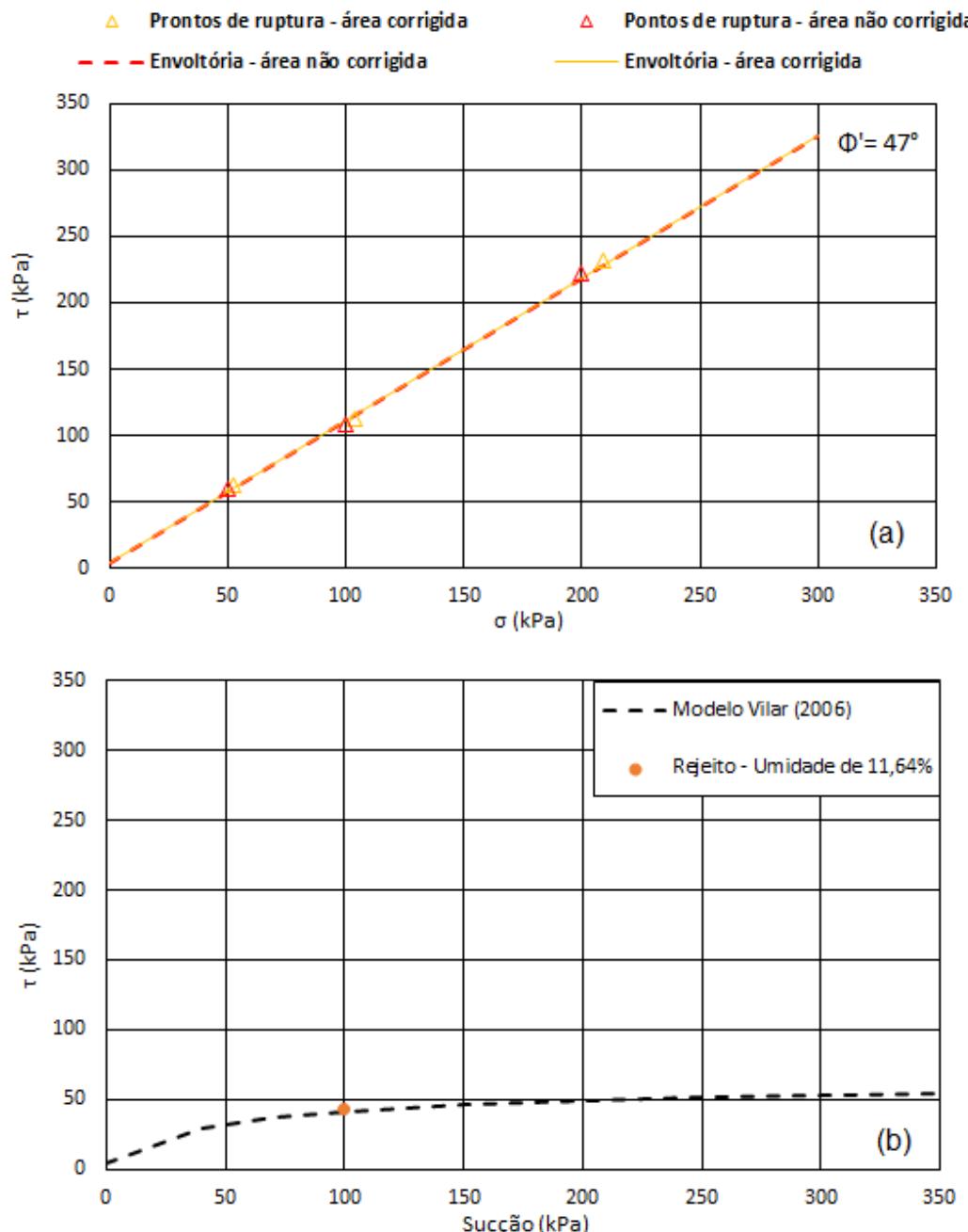


Figura 30. Comparação entre (a) envoltória determinada no ensaio de cisalhamento direto saturado e (b) envoltória determinada pelo método de Vilar (2006).

A Figura 31 compara as envoltórias determinadas no cisalhamento residual saturada e a envoltória estabelecida pelo método. Na Figura 31b, observamos uma resistência máxima atingida para sucção inferior a 100 kPa, seguindo para uma estabilização da resistência.

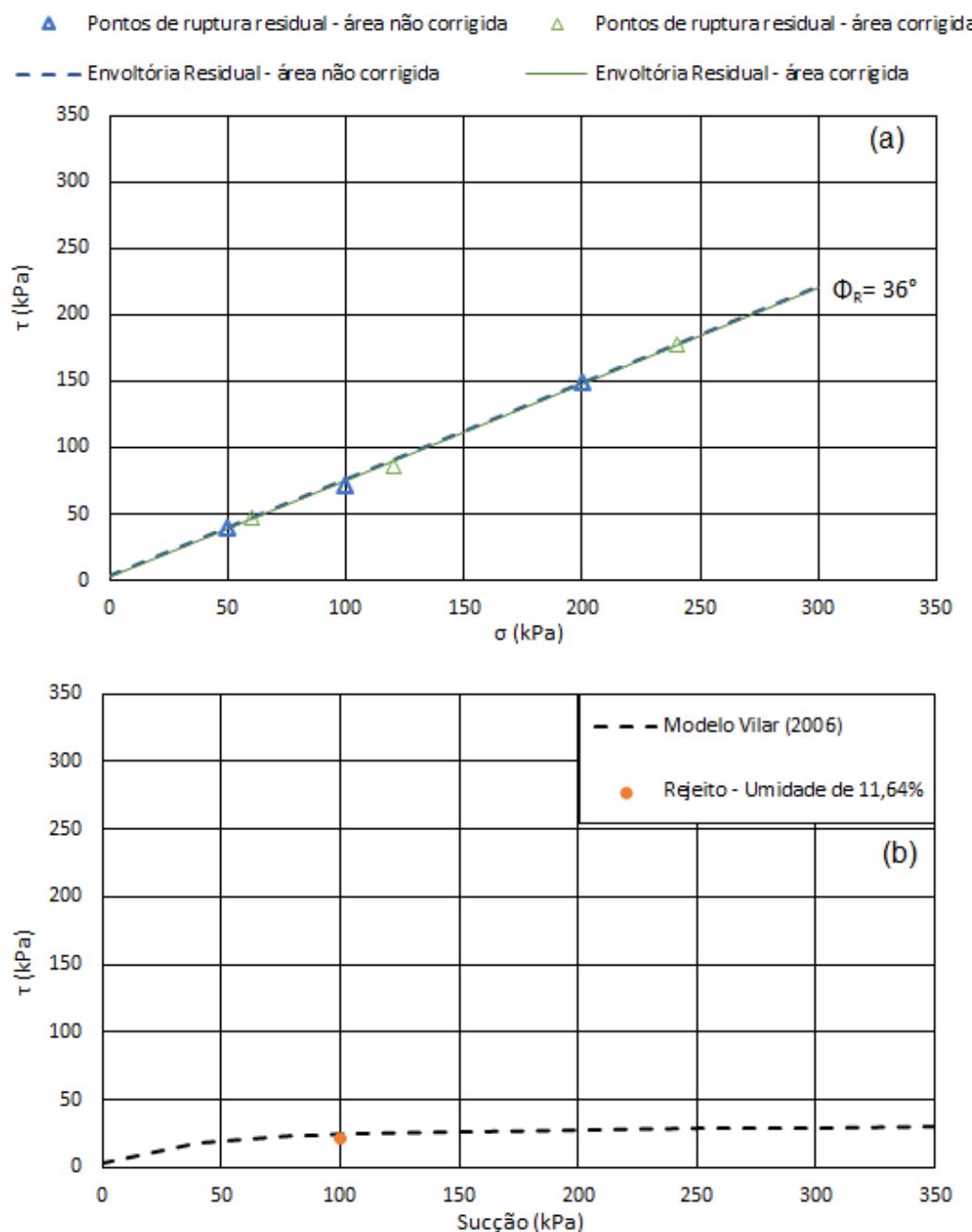


Figura 31. Comparação entre (a) envoltória do rejeito residual determinada no ensaio de cisalhamento direto saturado e (b) envoltória determinada pelo método de Vilar (2006).

É importante destacar que as envoltórias de resistência representadas na Figura 28, traçadas adotando-se o ângulo de atrito efetivo de 47° e obtido na condição saturada, são, desta forma, paralelas. Porém, os aumentos da coesão devido a sucção não variam linearmente, mas hiperbolicamente, como sugerido por Vilar (2006). Sendo este resultado, também verificado nas envoltórias de resistência residual. Também se concluiu a partir das

Figuras 30 e 31, que não há perda de resistência do rejeito com a secagem do material. No entanto, este aspecto deve ser confirmado por meio de ensaios com valores mais elevados de sucção.

6. CONCLUSÃO

Compreender as características geotécnicas de um rejeito se faz necessário para garantir maior segurança na sua adequada disposição. Com isto, foi realizado uma caracterização química e física para um rejeito de minério de ferro, da Mina do Pico no estado de Minas Gerais, Brasil. Além disso, foi definido a envoltória de resistência em condições saturadas e não saturadas. Adicionalmente, a envoltória de resistência residual também foi determinada. Com as análises dos resultados obtidos nos ensaios geotécnicos, concluiu-se que:

- O rejeito de minério de ferro ensaiado, segundo a classificação unificada é um solo ML de característica silte a areia muito fina.
- O material apresentou-se como não plástico mesmo com teor de partículas $< 2\mu\text{m}$ de aproximadamente 8%.
- A densidade seca máxima ($\rho_{d\text{máx}}$) do material obtida com a energia do Proctor normal foi de 2,04 e o teor de umidade ótima de 12,6%.
- No presente estudo, o material foi compactado com uma energia ligeiramente superior ao do Proctor normal e isto gerou um material com grau de compactação (GC) de 102,55% para o primeiro Proctor, 100,93% para o segundo e 101,42% para o terceiro, em relação a energia normal.
- O ângulo de atrito efetivo obtido no ensaio de cisalhamento direto do material saturado, foi de 47° .
- O ângulo de atrito efetivo “residual” obtido no ensaio de cisalhamento direto do material saturado foi de 36° .
- O ensaio realizado com o material seco ao ar foi utilizado para aplicar o modelo de Vilar (2006) tendo indicado que o material atinge uma resistência máxima por aumento de sucção para um valor de sucção da ordem de 100 kPa. Não observou perda de resistência com a secagem do material.
- A aplicação do modelo para resistência residual em condição não saturada, indicou também uma resistência máxima por aumento de sucção para um valor de sucção inferior a 100 kPa, seguido por uma estabilização da resistência mesmo com o aumento da sucção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6508: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1984, 8 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 3 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7181: Solo - Análise Granulométrica. Método de Ensaio. 1984, 13 p.
- Abrão, P.C., 1987. Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil. An. Simp. Barragens de Rejeito e Deposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Rio de Janeiro, RJ, 1:1-9.
- Albuquerque Filho, L. H., Ribeiro, L. F. M., Pereira, E. L., & Gomes, R. C., 2004. Avaliação da Densidade In Situ de uma Barragem de Rejeitos de Mineração de Ferro com o Penetrometer. In Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Philadelphia, 2004
- Atkinson, J.H.; Bransby, P.L., 1978. The mechanics of soils – an introduction to critical state soil mechanics. Maidenhead: Mc Graw-Hill.
- Brasil, A. D. M. (2020). Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Available in:<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/copy_of_AMB2019_anobase2018_FINAL.pdf>. Access, 01 (2020).
- Espósito, T. J., 1995. Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 159p.
- Fernandes, G., 2005. Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 250p.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D., & Barbour, S. L., 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. Canadian geotechnical journal, 33(3), 440-448.
- Lambe, W. T. & Whitman, R. V., 1972. Mecanica de Suelos. Centro Regional de Ayuda Técnica, Buenos Aires, México. 582p.

- Lopes, M. C. O., 2000. Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência nos Parâmetros de Resistência. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 157p.
- Mattos, J. R. G., 2014. Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul.
- Mckeyes, E.; Nyamugafata, P. & Nyamapfene, K.W., 1994. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. *Soil Till. Res.*, 29:357-366.
- Parry, R.H.G., 1960. Triaxial Compression and Extension Test on Remolded Saturated Clay. *Geotechnique*, London, Vol. 10, pp166-180.
- Pereira, E. L., 2005. Estudo Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estatístico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto. 185p.
- Reis, R. M., & Vilar, O. M. 2004. Resistência ao cisalhamento de dois solos residuais de gnaisse não saturados. V Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, 1, 109-114.
- Ribeiro, L. F. M., 2000. Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 232p.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., Wroth, C. P., 1958. On the Yielding of Soils. *Geotechnique*, 8(1), pp. 22-52.
- Slongo, G.R., 2008. Desenvolvimento de um Sistema Triaxial Servo-Controlado e Avaliação do Comportamento Mecânico de um Solo Residual de Biotita Gnaisse. [Dissertação de Mestrado]: Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Souza Pinto, C., 2000. Curso Básico de Mecânica dos Solos 2000, 3era ed., vol. 1. São Paolo, Oficina de textos, pp. 253-255.
- Vilar, O. M. A., 2006. A Simplified Procedure to Estimate the Shear Strength Envelope of Unsaturated Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 43, p. 1088-1095.