



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RAFAEL SPINELLI ALVES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITO DE MINERAÇÃO  
ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

Porto Alegre  
2023

RAFAEL SPINELLI ALVES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITO DE MINERAÇÃO  
ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Festugato  
Coorientador: Msc. Eng. Maiki Mafessoli

Porto Alegre  
2023

RAFAEL SPINELLI ALVES

## **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITO DE MINERAÇÃO ARTIFICIALMENTE CIMENTADO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil” e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador, obtendo conceito **A**.

Porto Alegre, 29 de agosto de 2023.

---

Prof. Lucas Festugato  
Orientador

---

MSc. Maiki Mafessoli  
Coorientador

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Lucas Festugato,  
Orientador  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

MSc Maiki Mafessoli.  
Coorientador  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Dr. Hugo Carlos Scheuermann Filho  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Dr. Sergio Filipe Veloso Marques  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais por me oportunizarem o melhor ensino ao longo da minha vida acadêmica, a qual resultou na conclusão do curso de Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e pelo apoio incondicional durante o período de graduação.

Ao meu irmão, Felipe, pelos momentos de descontração que me ajudaram a enfrentar o período de estudo intenso durante o curso.

À minha namorada, Laura, que me acompanhou durante cada passo dessa jornada, desde momentos difíceis a comemorações de cada vitória. Sei que isso é uma das várias etapas que passaremos juntos, e estou ansioso para muitas outras conquistas ao teu lado.

Aos meus sogros e cunhada, pelo suporte e incentivo durante a faculdade e por me acolherem para momentos de lazer e de estudo também.

Aos meus melhores amigos, “Mygonos”, pela amizade e irmandade, e por proporcionarem tantos momentos e histórias inesquecíveis, que ajudaram a tirar o foco da faculdade quando necessário.

À Equipe Azambuja Engenharia, por todo o ensinamento e crescimento pessoal e profissional, apoio, contribuições e por compreenderem todas as vezes que precisei me ausentar para a conclusão deste trabalho.

Registro, também, um agradecimento especial ao meu orientador, Lucas Festugato, por todo conhecimento transmitido, pelo empenho, dedicação, conversas, revisões e sugestões, para que este trabalho fosse entregue com qualidade.

À equipe do LEGG, Laboratório de Engenharia e Geotécnica e Geotecnologia Ambiental, pela disponibilidade e suporte durante a realização dos ensaios necessários para a realização deste trabalho de conclusão. Em especial, ao Maiki e ao Luís, pelas conversas e ajudas no desenvolvimento dos ensaios para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, Dailson, Estevão e Lucas, pela parceria, amizade, aprendizados e bons momentos dentro e fora da Universidade

Por fim, agradeço aos demais amigos e familiares, que acompanharam e contribuíram, de alguma forma, durante a conclusão desse curso.

“Do what you can’t”

Casey Neistat

## RESUMO

ALVES, RAFAEL SPINELLI. **Comportamento mecânico de rejeito de mineração artificialmente cimentado**. 2023. 54p. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre.

A extração e o beneficiamento do minério pela indústria da mineração têm grande impacto no ecossistema do Brasil. Isso ocorre devido ao mal armazenamento desses rejeitos, que, posteriormente, são depositados em grande quantidade em sistemas de barragens, causando riscos significativos de derramamentos. Considerando este cenário, fez-se necessária a exploração de novas formas de depositar esses resíduos. Este trabalho analisou o comportamento mecânico de um resíduo de mineração de ferro (rejeito granular). O resíduo foi reforçado com cimento e foi submetido à ensaios de resistência a compressão simples, diametral, *slant shear* e velocidade de pulso ultrassônico. Com isso, analisou-se a possibilidade de utilizar essa mistura em pilhas de resíduos de mineração, a fim de evitar o uso das barragens e, conseqüentemente, desastres ambientais. Após o estudo, foi possível comprovar que a técnica de estabilização química com cimento Portland CP V-ARI viabiliza a criação de pilhas de rejeitos estabilizados de resistência adequada. Alguns exemplos de comprovação de resultados do estudo são os que seguem: a efetividade da cimentação é maior em misturas mais compactas, nas quais, tanto a resistência à compressão, quanto a resistência a tração é mais intensificada. Além disso, a cimentação é mais eficaz em misturas compactas, com maior intensificação da resistência à compressão diametral. A análise dos resultados obtidos no ensaio de pulso ultrassônico mostrou que o módulo de rigidez inicial do material é influenciado pelo teor de cimento de forma semelhante à resistência à compressão simples e diametral. Dessa forma, pôde-se perceber o evidente impacto do teor de cimento no aumento do módulo de rigidez inicial. Em suma, quanto maior for a quantidade de cimento no rejeito de mineração de ferro, maior será o módulo de rigidez inicial.

**Palavras-chave:** Rejeito de Mineração. Cimento Portland. Estabilização de Solos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais substâncias produzidas no Brasil (IBRAM, 2022).....	14
Figura 2 - Alçamento a montante. (VICK, 1983).....	15
Figura 3 - Alçamento a jusante. (VICK, 1983).....	15
Figura 4 - Etapas do processo de estabilização do solo com cimento. (CDIT, 2002).....	18
Figura 5 – Influencia da tensão confinante no comportamento tensão-deformação de uma rocha frágil e porosa. (ELLIOT E BROWN, 1985). ....	20
Figura 6 – Comportamento idealizado para solos estruturados, nos quais a parcela coesiva é dominante. (COOP e ATKINSON, 1993).....	21
Figura 7 – Comportamento idealizado para solos estruturados, nos.....	21
Figura 8 - Molde Corpo de Prova.....	23
Figura 9 - Curva granulométrica do rejeito de mineração <i>flotation</i> . (MAFESSOLI, Maiki. 2022).....	26
Figura 10 - Curva de compactação do rejeito de mineração <i>flotation</i> . (MAFESSOLI, Maiki. 2022).....	27
Figura 11 - Ensaio de Velocidade de Pulso.....	29
Figura 12 - Ensaio de Resistencia à Compressão Simples.....	30
Figura 13 - Ensaio de Resistencia à Compressão.....	31
Figura 14 - Corpo de prova rompido após o Ensaio de Resistencia à Compressão Diametral.....	32
Figura 15 - Slant Shear Test. (SCHULZ, 2020).....	33
Figura 16 - Bases para o Slant Shear Test. (SCHULZ, 2020).....	34
Figura 17 – Resistencia à compressão simples em função do teor de cimento para $\gamma_d$ de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m <sup>3</sup> e 7 dias de cura. ....	36
Figura 18 – Resistencia à compressão simples em função da porosidade com teor de cimento variando de 1 a 5% e 7 dias de cura. ....	37
Figura 19 – Resistencia à compressão simples em função do índice $\eta/Civ$ para $\gamma_d$ de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m <sup>3</sup> e 7 dias de cura. ....	38
Figura 20 – Resistencia à compressão diametral em função do teor de cimento para $\gamma_d$ de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m <sup>3</sup> e 7 dias de cura. ....	39
Figura 21 – Resistencia à compressão diametral em função do índice $\eta/Civ$ para $\gamma_d$ de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m <sup>3</sup> e 7 dias de cura. ....	40
Figura 22 – Módulo de rigidez inicial em função do teor de cimento variando de 1 a 5% e 7 dias de cura.....	41
Figura 23 – Módulo de rigidez inicial em função da porosidade com teor de cimento.....	42
Figura 24 – Módulo de rigidez inicial em função do índice $\eta/Civ$ para.....	43
Figura 25 – Módulo de rigidez inicial em função da resistência à compressão diametral com teor de cimento variando de 1 a 5% e 7 dias de cura.....	44
Figura 26 – Relação entre a tensão normal e a tensão cisalhante para o rejeito de mineração de ferro. ....	45
Figura 27 – Forma de ruptura das amostras submetidas ao ensaio.....	45

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Limites de consistência do RMF. (MAFESSOLI, Maiki. 2022) ....27



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>MINERAÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Mineração no Brasil.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Métodos de disposição .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Barragens.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>FUNDAMENTOS DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Técnicas de Estabilização de Solos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Estabilização de Solos com Cimento .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Ensaios de Caracterização .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Massa Específica Real dos Grãos.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Granulometria .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Limites de Atteberg .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Moldagem e Cura das Amostras .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Rejeito de Minério de Ferro .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CPV - ARI).....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Água.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>VARIAVEIS INVESTIGADAS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>ENSAIOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Ensaios de Caracterização .....</b>	<b>26</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Ensaio de Velocidade de Pulso.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Ensaio de Resistencia a Compressão Simples.....</b>	<b>29</b>

3.4.4	Ensaio de Resistencia à Tração por Compressão Diametral .....	31
3.4.5	Slant Shear Test.....	32
4	RESULTADOS .....	35
4.1	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA .....	35
4.2	Características dos Corpos de Prova para os ensaios de resistência à compressão simples ( $qu$ ), resistência à compressão diametral ( $qt$ ) e velocidade de pulso ultrassônico ( $G_0$ ).....	35
4.2.1	Resistência à compressão simples em função do teor de cimento.....	35
4.2.2	Resistência à compressão simples em função da porosidade .....	36
4.2.3	Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/Civ$ .....	37
4.2.4	Resistência à compressão diametral em função do teor de cimento ....	38
4.2.5	Resistência à compressão diametral em função do índice $\eta/Civ$ .....	39
4.2.6	Módulo de rigidez inicial em função do teor de cimento .....	40
4.2.7	Módulo de rigidez inicial em função da porosidade.....	41
4.2.8	Módulo de rigidez inicial em função do índice $\eta/Civ$ .....	42
4.2.9	Relação entre modulo de rigidez inicial e resistência a compressão diametral .....	43
4.2.10	<i>Slant Shear Test</i> .....	44
5	CONCLUSÃO.....	47
5.1	Ensaio de Caracterização.....	47
5.2	Ensaio de Resistência à Compressão Simples, de Velocidade de Pulso Ultrassônico e de Resistência à Compressão Diametral.....	47
5.3	Ensaio <i>Slant Shear</i> .....	48
6	REFERÊNCIAS.....	49

## 1 INTRODUÇÃO

A importância da indústria da mineração para a economia brasileira é indiscutível. Entretanto, a extração e o beneficiamento do minério resultam em grandes quantidades de rejeitos, que são depositados em sistemas de barragens, causando impactos significativos no ecossistema brasileiro. Atualmente, as barragens de rejeitos expressam grande risco de derramamentos e um baixo grau de eficiência de armazenagem. Além disso, o setor passa por um grande desafio: a maneira como esses rejeitos são descartados após a extração de minérios. Em 2015, esse número somava 310 milhões de toneladas de resíduos, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

As falhas nas barragens de mineração não são recentes: a primeira reportada ocorreu em 1889, nos Estados Unidos, e as consequências dos rompimentos são imensuráveis. Além desse, é possível citar, o incidente ocorrido em Brumadinho, no dia 25 de janeiro em 2019, no estado de Minas Gerais. Foi considerado o segundo maior desastre industrial do século: 270 pessoas perderam a vida. Apesar do tempo decorrido desde o incidente, ainda não foram completamente explicadas as causas para o rompimento da barragem. Porém os danos causados pelo derramamento de 12 milhões de metros cúbicos tiveram um grande impacto ambiental e social, especialmente na região de Brumadinho.

Com isso, para o melhor entendimento do funcionamento de uma barragem, é necessário conhecimento geotécnico, estrutural e de execução de obra para poder realizar o depósito de rejeitos em segurança (Pimenta e Zingano, 2016). Além disso, a análise de viabilidade de uma nova disposição do rejeito é necessária devido aos efeitos de liquefação, ocasionados pela grande porcentagem de água nesses rejeitos (LINDOLFO SOARES, 2010, p. 832), que ocasionam o rompimento das barragens.

Como alternativa ao tradicional método de disposição em barragens, a indústria mineradora brasileira passou a empregar a técnica de empilhamento de rejeitos de mineração. O rejeito é filtrado, diminuindo o teor de água do mesmo; após, as pilhas são compactadas em camadas sucessivas, visando reduzir o espaço entre partículas e aumentar estabilidade da pilha. Junto a esses processos, sistemas de drenagem são

inseridos conforme o empilhamento ocorre, para evitar problemas relacionados à água e minimizar o risco de vazamento e infiltração.

Considerando a relevância econômica da indústria da mineração e a conseqüente produção de rejeitos de mineração, associadas à necessidade de garantir a segurança das cidades próximas às minas, é imprescindível explorar novas formas de disposição desses resíduos. É fundamental implementar medidas que possam evitar desastres, como os que já ocorreram, e elevar os níveis de segurança das regiões onde existe atividade mineradora. Com o intuito de descobrir novas soluções para esse cenário, algumas pesquisas foram desenvolvidas pela UFRGS (e.g. Festugato et al., 2013, 2015; Consoli et al., 2022, 2023, Mafessoli, 2022), analisando o comportamento mecânico de resíduo de mineração de ferro.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de um resíduo de mineração de ferro, denominado rejeito granular, artificialmente cimentado. As misturas rejeito cimento foram submetidas à ensaios de resistência a compressão simples e diametral, *slant shear* e medida de velocidade de pulso ultrassônico, considerando diferentes condições de moldagem (peso específico aparente seco de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m<sup>3</sup>, teor de umidade ótimo de 12,8%, tempo de cura de 7 dias e teor de cimento na faixa de 1 a 5%). Dessa forma, avaliou-se a possibilidade de utilização do rejeito cimentado para fins de aplicação em pilhas, evitando, assim, o uso das barragens.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa do trabalho, serão apresentados os principais tópicos relacionados a adição de cimento no rejeito de mineração de ferro além de conceitos pertinentes a presente pesquisa.

### 2.1 MINERAÇÃO

Segundo Mesquita, Carvalho e Ogand (2016), a mineração é o ato de extração e beneficiamento de minerais a partir do seu estado natural, junto com a exploração de minas, com o objetivo de tornar o material extraído negociável, evitando a alteração irreversível da sua condição primária.

Segundo o IBRAM, mineração é a soma de atividades destinadas a pesquisar, mensurar, descobrir, tratar, beneficiar, extrair e, por fim, transformar recursos minerais em benefícios sociais e econômicos. Além disso, de acordo com Carvalho et al. (2018), a mineração engloba as seguintes etapas:

- a) Prospecção;
- b) Pesquisa;
- c) Lavra; e
- d) Descomissionamento de mina.

A Lavra é etapa geradora de resíduos. No Brasil, pode ser subterrânea, garimpo (manual ou mecânico), céu aberto e dragagem. Conforme descrito pelo DNPM (2004), a atividade de lavra é composta por uma série de operações coordenadas que visam garantir a exploração econômica de uma jazida. Essas operações englobam a perfuração, desmonte de rocha, carregamento e transporte.

A extração desse material cria uma quantidade significativa de impactos ambientais. Como exemplo, pode-se citar o despejo do material restante após o tratamento e beneficiamento, que necessita de uma manipulação adequada. Esse material secundário da mineração tem grande volume de produção e, conseqüentemente, características diferentes de seu material de origem.

### 2.1.1 Mineração no Brasil

A atividade de mineração no Brasil tem uma história de mais de 300 anos, mas os métodos e ferramentas utilizados eram primitivos. Os processos de beneficiamento e tratamento não levavam em consideração a preservação do meio ambiente, resultando no descarte descontrolado de uma grande quantidade de resíduos na natureza.

No século XVIII, com o surgimento da revolução industrial, ocorreram avanços significativos no tratamento de minérios. No entanto, foi no final do século XIX e início do século XX que ocorreu o maior desenvolvimento no beneficiamento de minérios. Isso resultou em uma maior demanda pela extração de minerais e, conseqüentemente, um aumento na produção de resíduos (LUZ & LINS, 2010). Como resultado desse aumento, tornou-se necessário encontrar uma maneira de lidar com esses resíduos, geralmente localizados próximos a corpos d'água. Assim, a construção de barragens e diques de contenção tornou-se crucial para o descarte e contenção desses resíduos, dando origem às primeiras barragens de contenção de rejeitos no século XX (IBRAM, 2016).

Os minerais encontrados no Brasil estão classificados em dois grupos: metálicos e não metálicos. De acordo com dados do anuário mineral brasileiros de 2020 (ANM, 2020a), 80% da produção pertence aos metálicos. Dentre eles, estão ferro, manganês, nióbio e ouro.



Figura 1 - Principais substâncias produzidas no Brasil (IBRAM, 2022).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o Brasil possui uma das maiores produções de minério do mundo: em 2021, o valor gerado por essa extração foi de 339,15 bilhões de reais. Um dos Estados que mais representa essa grande produção é Minas Gerais, que possui 40,2% da produção nacional.

## 2.2 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

### 2.2.1 Métodos de disposição

Existem diferentes métodos de disposição de rejeitos, incluindo subaquática, subterrânea e a céu aberto, sendo este último o mais comumente utilizado. Na disposição de rejeitos a céu aberto, pode-se dispor os rejeitos em pilhas controladas ou em estruturas de contenção, como barragens. Essas estruturas são preenchidas por meio do transporte do material para o local ou por bombeamento, na Figura 2 e na Figura 3 são representados os métodos de alteamento a montante e a jusante.

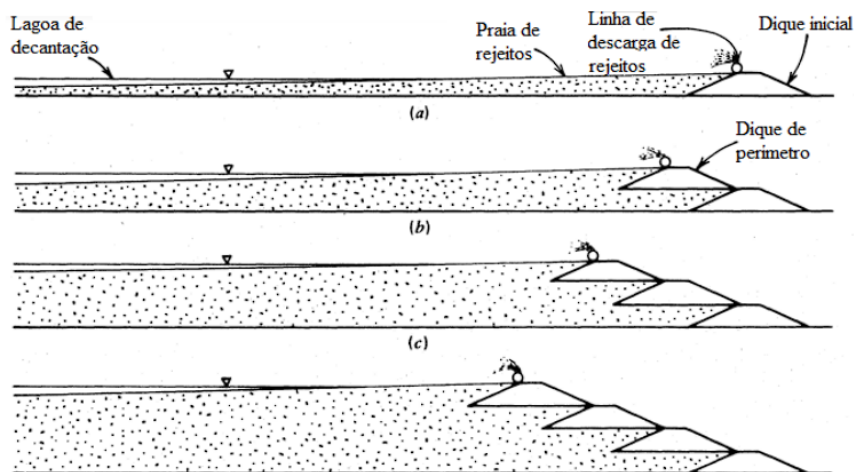


Figura 2 - Alteamento a montante. (VICK, 1983).

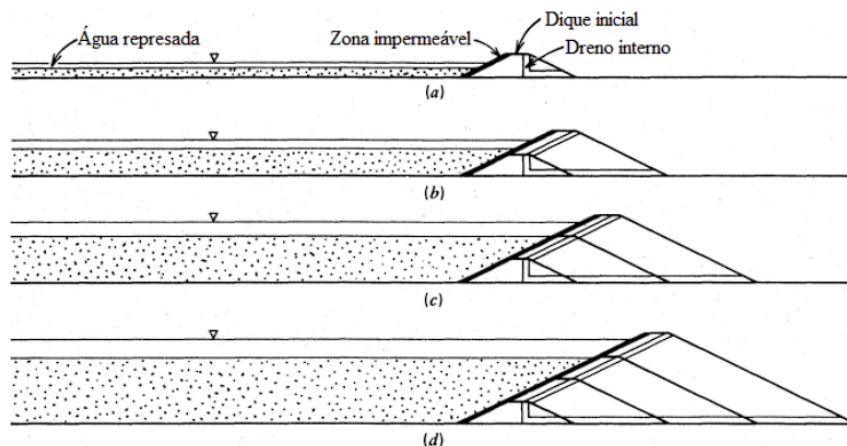


Figura 3 - Alteamento a jusante. (VICK, 1983).

No caso específico das barragens de rejeito de minério de ferro, é comum utilizar barragens de contenção, em que o minério é armazenado na forma de polpa (GOMES,

2009). No entanto, esse método possui desvantagens, incluindo impactos ambientais negativos, como a destruição da fauna e flora, danos à vegetação e o alto consumo de água.

### **2.2.2 Barragens**

A ABNT NBR 13028 (2017) define como barragens de mineração estruturas com finalidade de acumular, conter ou decantar rejeitos de mineração e outros tipos de materiais derivados da mineração, podendo, ou não, ter a presença de água nessas estruturas. Além disso, a norma engloba as seguintes estruturas: barragens, diques, reservatórios, barramentos e cavas.

As barragens são executadas em 3 técnicas, a montante onde o material é colocado a montante do corpo principal, sendo uma técnica menos segura, a jusante, onde o material é acrescentado a jusante da barragem existente e geralmente é o método mais seguro, por fim, a linha de centro combina elementos das duas técnicas anteriores.

Por ser o mais barato, o método de barragem a montante é o mais utilizado no Brasil. Entretanto, necessita de uma grande área para a disposição dos rejeitos, além de estruturas de contenção para suportar o grande volume de material que a compõe. O maior problema relacionado a esse método é o grande risco de ruptura. De acordo com o estudo realizado por Azam e Li (2010), a taxa de ruptura de barragens mundialmente corresponde 1,2% nos últimos 100 anos, sendo 100 vezes maior que a taxa de ruptura para barragens de armazenamento de água.

Após os desastres ocorridos em Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais, houve uma crescente pressão para proibir o uso da técnica de alteamento a montante no Brasil. Como resposta a essa demanda, entrou em vigor em 30 de setembro a Lei nº 14.066, que proíbe a construção de barragens utilizando esse método.

Isso motivou a ampliação dos estudos acerca de métodos alternativos para a disposição de rejeito que atendam as necessidades ambientais, econômicas e sociais para que se respeite a lei, além de realizar a disposição correta do rejeito de mineração. De acordo com Stela, Duarte e Pereira (2020), o método de filtração é a melhor escolha para a disposição de rejeitos de minério de ferro, pois realiza o reaproveitamento da água e reduz a área de disposição do rejeito.



## **2.3 FUNDAMENTOS DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

Todas as obras utilizam, como base de apoio, o solo. Contudo, não é sempre que o solo é de boa qualidade; com isso, faz-se necessária a utilização de maneiras de reforçar o solo, alterando algumas características para que possam resistir aos esforços que atuam no mesmo.

Conforme mencionado por Senço (2001), a estabilização do solo consiste em proporcionar-lhe a capacidade de resistir a deformações e rupturas ao longo de todo o período em que sua finalidade requer o cumprimento dessas características. Para Gondim (2008), a estabilização do solo busca reduzir os custos provenientes do uso de desses materiais para aterro ou a mobilização desses materiais em grande escala.

### **2.3.1 Técnicas de Estabilização de Solos**

As técnicas de estabilização de solos são divididas em 3 grupos, de acordo com Cristelo (2001):

a) Estabilização Mecânica:

Se dá através de melhorias nas características dos solos a partir de uma reorganização de suas partículas, através de uma mudança de graduação por adição ou remoção de partículas de solo e/ou alterando sua composição granulométrica.

b) Estabilização Física:

É a alteração das propriedades do solo através dos efeitos do calor e da eletricidade, visando uma melhoria de curto ou longo prazo.

c) Estabilização Química:

As características do solo são modificadas permanentemente por meio de aditivos, dentre eles cimento, betume ou cinza volante.

### **2.3.2 Estabilização de Solos com Cimento**

O cimento Portland é um material utilizando em escala global, sendo comumente utilizado na estabilização de solos. Em decorrência da adição de cimento são amplamente reconhecidos como uma solução estabelecida em projetos de engenharia.

O processo de estabilização se dá em 4 etapas (CDIT, 2002):

- a) Hidratação do agente cimentante;
- b) Reação de troca iônica;
- c) Formação dos produtos de hidratação do cimento; e
- d) Formação dos produtos resultantes.

A Figura 4 mostra a sequência dos mecanismos de estabilização utilizando cimento.



Figura 4 - Etapas do processo de estabilização do solo com cimento. (CDIT, 2002)

Quando se trata de solos tratados com cimento, as reações de hidratação acontecem em semanas, resultando em um aumento significativo da resistência em um curto período de tempo (TOMASI, 2018). Outro fator importante é que ainda é possível ocorrer reações pozolânicas, que proporcionam uma resistência ainda maior ao solo tratado (CDIT, 2002).

Em suma, o melhoramento do solo com cimento causa um aumento na resistência e rigidez, altera os limites de consistência e diminui a compressibilidade.

Entre as várias publicações sobre solos estabilizados com cimento, se destaca Clough *et al.* (1981), que verifica que misturas de areias artificialmente cimentadas possuem um comportamento de acordo com a densidade da mistura, a quantidade de agente cimentante e distribuição granulométrica.

Coop e Atkinson (1993) observaram que a incorporação de cimento ao solo resultava em efeitos adicionais no comportamento, como a modificação da distribuição granulométrica e da estrutura interna nos solos estabilizados com cimento, evidenciada pela ocupação dos vazios pelo agente cimentante.

Já autores como Gens e Nova (1993), Leroueil e Vaughan (1990) observaram que materiais estruturados sob compressão triaxial têm comportamentos distintos em baixas e altas tensões confinantes. Em baixas tensões, apresentam resistência de pico seguida de redução com o aumento das deformações, enquanto em altas tensões exibem comportamento mais dúctil, sem um pico pronunciado e com tendência à diminuição de volume.

Alem disso, estudos anteriores realizados por Elliot e Brown (1985) em rochas frágeis e porosas por meio de ensaios triaxiais evidenciaram a influência das tensões confinantes no comportamento tensão-deformação do material. Foi observada uma transição entre um comportamento frágil/dilatante em baixas tensões confinantes, com deformações do tipo "*strain softening*", e um comportamento dúctil/compressivo em altas tensões confinantes, com deformações do tipo "*strain hardening*". Os resultados obtidos por Elliot e Brown (1985) são mostrados na Figura 5.

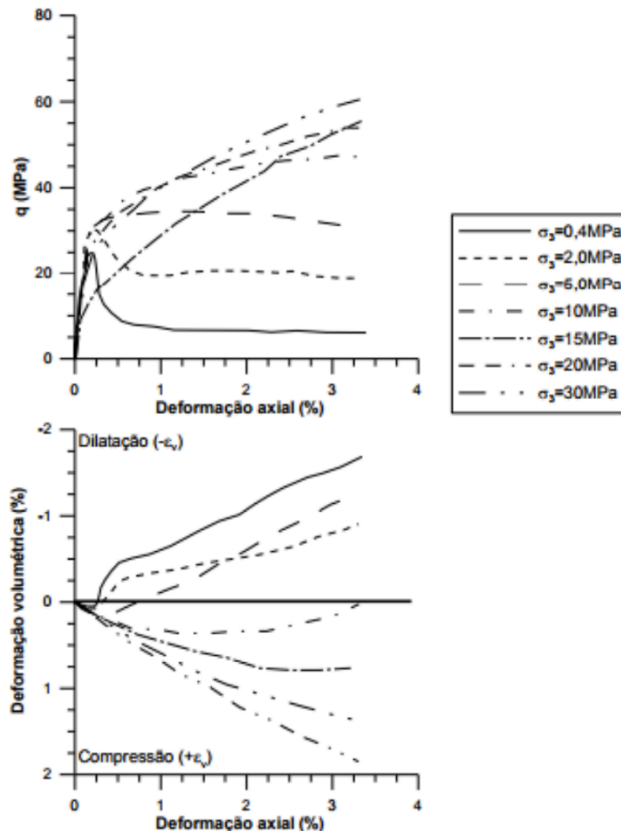


Figura 5 – Influencia da tensão confinante no comportamento tensão-deformação de uma rocha frágil e porosa. (ELLIOT E BROWN, 1985).

Coop e Atkinson (1993) destacam que em solos cimentados artificialmente, a resistência de pico sob baixas tensões de confinamento é influenciada pela componente coesiva do material, enquanto em altas tensões de confinamento ocorre uma transição para um comportamento puramente friccional. Os autores definem três classes de comportamento durante o ensaio de compressão triaxial em solos estruturados, com a predominância da componente coesiva em relação à componente friccional. A Figura 6 e Figura 7 apresentam o comportamento descrito pelos autores.

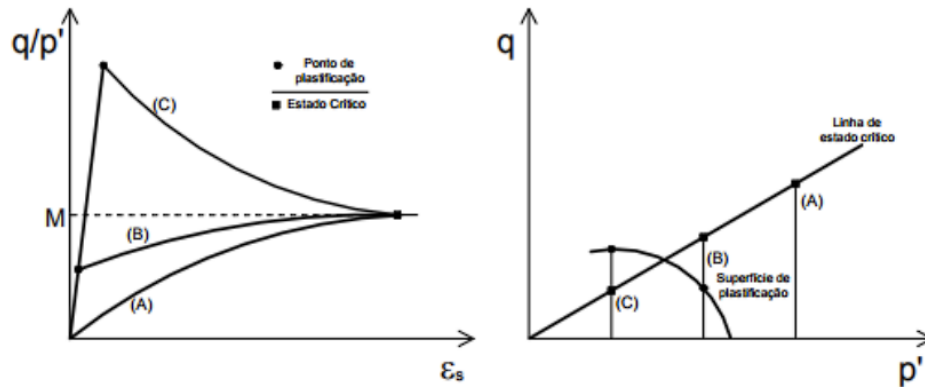


Figura 6 – Comportamento idealizado para solos estruturados, nos quais a parcela coesiva é dominante. (COOP e ATKINSON, 1993).

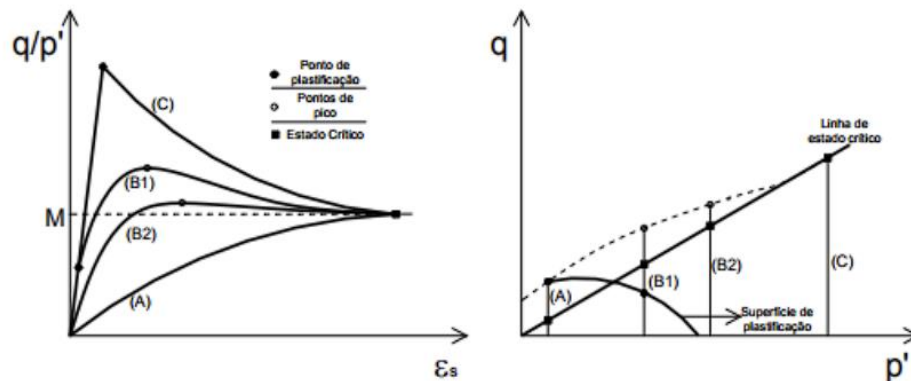


Figura 7 – Comportamento idealizado para solos estruturados, nos quais a parcela friccional é dominante. (COOP e ATKINSON, 1993).

Além desses estudos, Ingles e Metcalf (1972) estudaram a influência da taxa de cimentação no solo, e viram que uma adição de pequenas quantidades de cimento (até 2%), modificam as propriedades do solo, enquanto misturas com maior teor de cimento alteram completamente as propriedades do solo.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados para a realização deste trabalho, além dos métodos utilizados na pesquisa.

#### **3.1 MÉTODOS**

##### **3.1.1 Ensaios de Caracterização**

O material estudado teve sua caracterização geotécnica realizada a partir da determinação da massa específica real dos grãos, granulometria e limites de Atterberg.

##### **3.1.2 Massa Específica Real dos Grãos**

O ensaio para a determinação da massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ ) seguiu as diretrizes da ABNT NBR 16916 (ABNT, 2021).

##### **3.1.3 Granulometria**

Para a determinação da granulometria, foi realizado peneiramento com sedimentação do rejeito de mineração, seguindo os preceitos indicados na ABNT NBR 7181 (ABNT, 2018).

##### **3.1.4 Limites de Atteberg**

Os limites de consistência para esse trabalho foram realizados conforme a ABNT NBR 6459 (ABNT, 2017).

##### **3.1.5 Moldagem e Cura das Amostras**

Os procedimentos para a moldagem dos corpos de prova, que englobavam a secagem do material, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade, usaram como referência a ABNT NBR 6457 (2016).

A moldagem dos corpos de prova envolveu os seguintes processos: pesagem, mistura, moldagem, desmoldagem, armazenamento e cura. Foram verificados os teores de umidade da amostra a partir das partes restantes desta.

Os corpos de prova utilizados para este trabalho possuem as seguintes dimensões:

$50 \pm 0,2$  mm de diâmetro e  $100 \pm 0,5$  mm de altura (Figura 8).



Figura 8 - Molde Corpo de Prova.

O início do processo de moldagem deu-se a partir da mistura do rejeito de mineração cimentado com a quantidade necessária de água destilada para atingir o teor de umidade ótimo. Após esse processo, a amostra foi dividida em 3 partes, para sua posterior compactação no corpo de prova em 3 camadas. Entre as camadas intermediárias, foi realizada a escarificação, visando aumentar a aderência entre as camadas. O molde do corpo de prova foi lubrificado com desmoldante para a melhor desmoldagem.

Após a retirada do corpo de prova do molde, esse foi pesado e teve suas dimensões medidas com um paquímetro digital, no topo, base e meio, e sua altura foi medida em três direções distintas. Os valores utilizados nos cálculos foram retirados a partir da média aritmética entre as 3 medidas. O corpo de prova foi acondicionado em um saco hermético e armazenado no laboratório para o período de cura de 6 dias.

De acordo com a ABNT NBR 12024 (ABNT, 2012), os corpos de prova são considerados adequados para ensaios caso cumpram os seguintes critérios: grau de compactação dentro de uma variação de 98% a 102% em relação ao valor alvo; teor de umidade dentro de uma variação de  $\pm 0,5\%$  em relação ao valor alvo; diâmetro dentro de uma variação de  $\pm 1\%$  em relação ao valor alvo; altura dentro de uma variação de  $\pm 2\%$  em relação ao valor alvo; e ambos não ultrapassando 2 mm.

É importante salientar que o peso específico aparente seco dos corpos de prova foi determinado através da divisão do peso seco do rejeito e do cimento pelo volume total do corpo de prova. Com o objetivo de manter constante o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) dos corpos de prova, à medida que o teor de cimento ( $C_i$ ) aumentava, uma pequena quantidade de rejeito foi substituída por cimento Portland. Uma vez que o peso específico real dos grãos de cimento ( $3,15 \text{ g/cm}^3$ ) é maior do que o do rejeito ( $2,916 \text{ g/cm}^3$ ), para calcular a porosidade (ou índice de vazios), foi utilizado um peso específico composto, levando em consideração as porcentagens de rejeito e cimento em cada corpo de prova específico. Dessa forma, a porosidade pode ser calculada utilizando a Equação 1 (CONSOLI *et al.*, 2007; 2011b; 2019a):

$$\eta = 100 - 100 \left[ \frac{\gamma_d}{\frac{C_i}{100}} \left( \frac{1}{\gamma_{sr}} + \frac{C_i}{\gamma_{sr}} \right) \right] \quad \text{Equação (1)}$$

### 3.2 MATERIAIS

A pesquisa fez uso dos seguintes materiais:

- a) Rejeito de Minério de Ferro;
- b) Água destilada;
- c) Cimento Portland de Alta Resistência - CPV - ARI.



### 3.2.1 Rejeito de Minério de Ferro

O rejeito de minério de ferro, material utilizado neste trabalho, foi fornecido por uma empresa mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Esse material foi escolhido devido a sua grande abundância no Brasil, visto que é um dos metais mais minerado em território nacional.

### 3.2.2 Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CPV - ARI)

O cimento CPV – ARI foi utilizado nessa pesquisa devido a seu rápido ganho de resistência em um curto período. Sua massa específica é igual a  $3,15 \text{ g/cm}^3$ , segundo o fabricante. A massa específica aparente, de acordo com o fabricante, é de  $0,9 \text{ g/cm}^3$  a  $1,2 \text{ g/cm}^3$  para a temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

### 3.2.3 Água

Foi utilizada água destilada para realizar os ensaios de caracterização, incluindo ensaios de compressão simples, diametral,  $G_0$  e cisalhamento inclinado. O processo de destilação ocorreu no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG), a partir da água potável fornecida pela rede pública do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (RS).

## 3.3 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As características dos corpos de prova para os ensaios de resistência e de velocidade de pulso ultrassônico foram: peso específico aparente seco de 18,8, 19,8 e  $20,8 \text{ kN/m}^3$ , teor de umidade ótimo de 12,8%, tempo de cura de 7 dias e teor de cimento na faixa de 1 a 5%, sendo um total de 54 corpos de provas moldados. Já para o ensaio de *Slant Shear*, foram moldados 9 corpos de provas cúbicos, com peso específico aparente seco de  $19,8 \text{ kN/m}^3$ , teor de umidade ótimo de 12,8%, tempo de cura de 7 dias e teor de cimento de 3%

### 3.4 ENSAIOS

#### 3.4.1 Ensaios de Caracterização

Os resultados dos ensaios de caracterização do rejeito de mineração *flotation*, com exceção do ensaio do limite de liquidez e limite de plasticidade, são apresentados nas imagens a seguir:

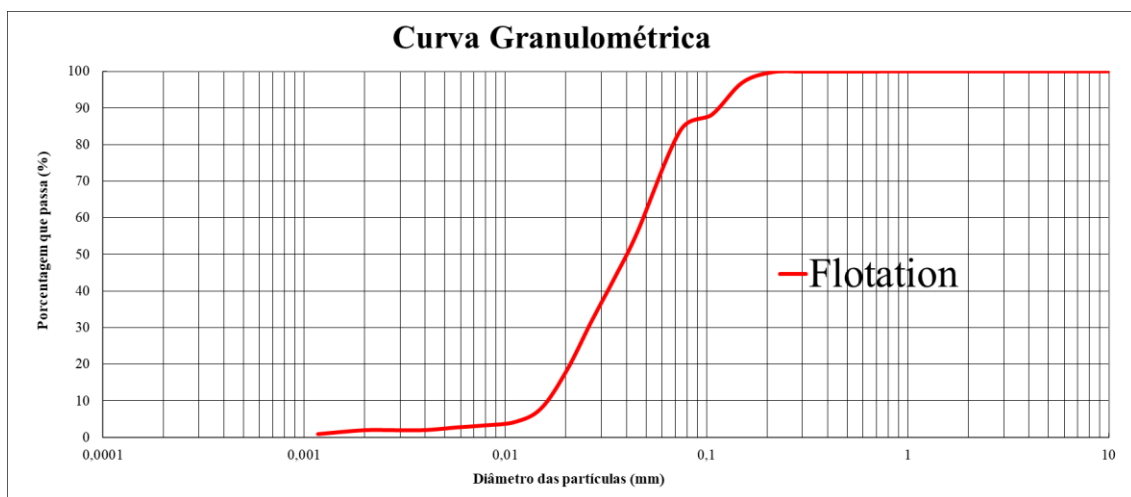


Figura 9 - Curva granulométrica do rejeito de mineração *flotation*. (MAFESSOLI, Maiki. 2022)

Para o ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade, verificou-se a impossibilidade de executar o ensaio, devido a sua granulometria semelhante à de um solo moderadamente granular, com isso o  $I_p = NP$ , ou seja, não-plástico. Na Tabela 1, são apresentados os resultados encontrados na literatura, juntamente com os resultados obtidos neste estudo. É possível perceber que os resultados são semelhantes aos mencionados na bibliografia, em sua grande maioria, com valores de  $I_p =$  não plástico (NP) próximos aos citados por ANTT (2018), Boscov (2008), Campanha (2011), Gentil (2020), Lara et al. (2018), Motta (2008), Oliveira (2013) e Rodrigues (2018). Já para o ensaio de curva de compactação, os resultados obtidos são mostrados na Figura 10, com isso, se chegou num teor de umidade ótimo de 12,8%.

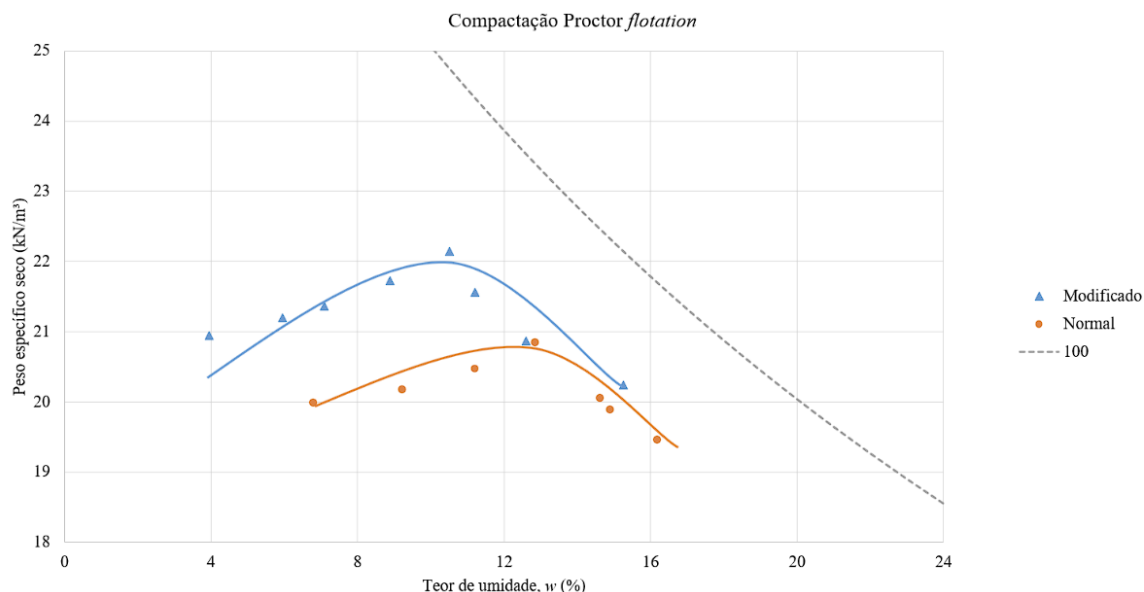


Figura 10 - Curva de compactação do rejeito de mineração *flotation*. (MAFESSOLI, Maiki. 2022)

Tabela 1 – Limites de consistência do RMF. (MAFESSOLI, Maiki. 2022)

Autores	Limite de liquidez, $w_L$ (%)	Limite de plasticidade, $w_P$ (%)	Índice de plasticidade, $I_P$ (%)
Presente estudo	-	-	NP <sup>a</sup>
ANTT (2018)	-	-	NP
Boscov (2008)	-	-	NP
Campanha (2011)	15	10	5
Dutra (2021)	21	15	6
Gentil (2020)	-	-	NP
Lara <i>et al.</i> (2018)	-	-	NP
Motta (2008)	-	-	NP
Oliveira (2013)	-	-	NP
Rodrigues (2018)	-	-	NP

### 3.4.2 Ensaio de Velocidade de Pulso

O ensaio de PUNDIT, também conhecido como ensaio de ultrassom de pulso de impacto, foi desenvolvido por pesquisadores da empresa suíça Proceq SA nos anos 1970. Esta técnica foi criada para avaliar a qualidade do concreto e a integridade estrutural de materiais de construção; entretanto, neste trabalho, foi utilizado com o

rejeito de mineração cimentado, visando uma representação numérica dos parâmetros de rigidez do rejeito. A caracterização desses parâmetros tem influência nos valores de projeto. Segundo Cruz (2008),  $G_0$  é um parâmetro geotécnico de diretriz.

O ensaio se deu a partir do equipamento ultrassônico Pundit LabPlus, da Proceq®, uma unidade de emissão e recepção de ondas de compressão (P) e cisalhamento (S). Esse ensaio foi realizado a partir da medição dos tempos de dispersão dessas ondas pelos corpos de prova cilíndricos, com auxílio do software PundiLab(+), visando o módulo cisalhante inicial ou máximo  $G_0 = G_{máx}$ .

O procedimento de ensaio teve início após o término do período de cura e imersão dos corpos de prova e após a aplicação do *shear* gel (gel que auxilia na transmissão e leitura do sinal). O ensaio utilizou da leitura da onda cisalhante ( $t_s$ ), que consiste no tempo necessário para que essas ondas percorram o corpo de prova em questão. Com base na determinação desse tempo e no conhecimento das dimensões do corpo de prova, foi possível determinar a velocidade de propagação da onda cisalhante, denotada por  $v_s$ . A partir dessa informação, estimou-se o módulo cisalhante em pequenas deformações, usando a Equação 2 (HARA et al., 1974):

$$G_0 = \rho_s \left( \frac{L}{t_s} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

$\rho$  é a massa específica aparente do CP.

$L$  é a distância entre os transdutores (usualmente  $L = h$ , onde  $h$  é a altura média do CP);

$t_s$  é o tempo de deslocamento da onda.

A Figura 11 representa uma foto da realização do ensaio Pundit.



Figura 11 - Ensaio de Velocidade de Pulso.

### 3.4.3 Ensaio de Resistência a Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples é regulamentado pela ABNT NBR 5739, a qual se baseia na norma estadunidense ASTM D5102. É empregado em grande escala dentro da literatura, principalmente analisando a mistura de cimento com solo, pois a partir dele é possível observar os efeitos que as diferentes dosagens de cimento causam no comportamento do solo. Além disso, é um ensaio de execução rápida e simples, não agregando elevado custo para a pesquisa.

Nesta pesquisa, utilizou-se adição de cimento CPV-ARI em 3 porcentagens diferentes, sendo de 1, 3 a 5% de adição. Com isso, após o período de cura de 6 dias, os corpos de provas foram retirados do seu local de armazenamento e foram levados para imersão em água por 1 dia. Assim, o tempo de cura foi de 7 dias, visando reduzir o efeito da sucção (e.g, Consoli et al., 2007, 2010, Festugato et al. 2017). Após o período

de imersão, o ensaio de resistência à compressão simples foi realizado, e é determinado pela Equação 3:

$$q_u = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo,

$Q$  a carga máxima aplicada no corpo de prova;

$D$  o diâmetro do corpo de prova.

Para o rompimento dos corpos de prova, foi utilizado uma célula de carga 10 kN e uma prensa de velocidade constante de 1,14mm/minuto. A Figura 12 apresenta uma foto da realização do ensaio.



Figura 12 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples.

### 3.4.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral, internacionalmente conhecido como *Brazilian Test* é regulado pela ABNT NBR 7222 de 2011, e segue os mesmos princípios do ensaio de compressão simples (célula de carga de 10 kN e velocidade constante), porém o posicionamento do corpo de prova é alterado, posicionado na horizontal.

A resistência  $q_t$  do corpo de prova é determinada pela Equação 4, e os resultados foram anotados em uma planilha eletrônica:

$$q_t = \frac{2Q}{\pi DL} \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo,

Q a carga máxima aplicada no corpo de prova;

D o diâmetro do corpo de prova;

L é o comprimento do corpo de prova.

A Figura 13 apresenta uma foto de como o ensaio é realizado.



Figura 13 - Ensaio de Resistência à Compressão.





Figura 14 - Corpo de prova rompido após o Ensaio de Resistência à Compressão Diametral.

### 3.4.5 Slant Shear Test

O *Slant Shear Test* é normalizado pela ASTM C882/C882M (2015) *Standard Test Method – Bond Strength of Epoxy-Resin Systems used with Concrete by Slant Shear*. Esse ensaio consiste em uma aplicação de carga de compressão em um cubo em 3 ângulos diferentes: 30°, 45° e 60°. A interface entre as superfícies combina tensões normais e cisalhantes. As principais vantagens desse tipo de ensaio estão relacionadas ao fato de que ele apresenta um comportamento semelhante ao da interface em situações práticas, e possui um baixo coeficiente de variação e seu procedimento é simples.

A Figura 15 é um esquema representativo do ensaio, onde a carga vertical é aplicada no corpo de prova, que pode ser decomposta em tensão normal e tensão cisalhante. A interpretação do ensaio é dada por meio do critério de Mohr-Coulomb, analisando as tensões atuantes no corpo de prova.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \delta' \quad (\text{Equação 5})$$



Sendo,

$\tau$  a tensão cisalhante;

$\sigma'$  a tensão normal;

$c'$  é a parcela de coesão efetiva;

$\delta'$  o ângulo de atrito efetivo entre os dois materiais.

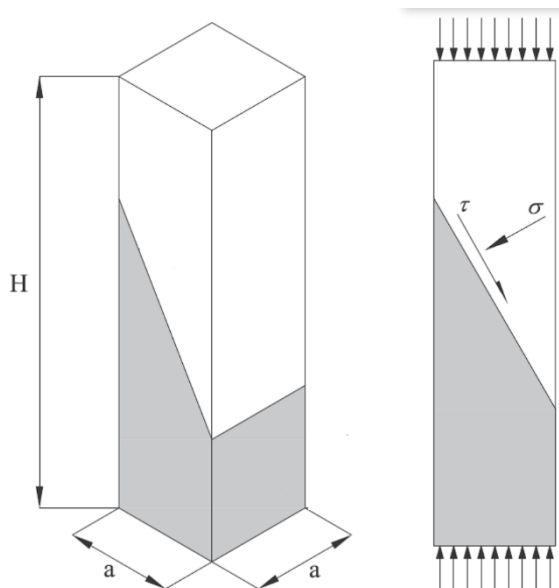


Figura 15 - Slant Shear Test. (SCHULZ, 2020)

Para a realização do ensaio de compressão, foram impressas, na impressora 3D do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG), bases de ABS MG96 com as 3 angulações mencionadas anteriormente. A Figura 12 demonstra a configuração dos caps e sua disposição junto a amostra.

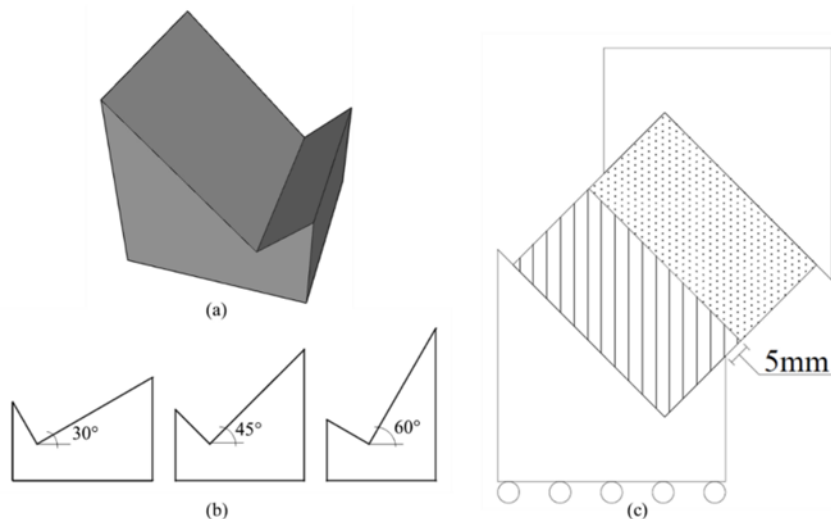


Figura 16 - Bases para o Slant Shear Test. (SCHULZ, 2020)

O procedimento posicionou a amostra em forma de cubo sobre uma base inclinada e apoiou sobre ela, outra base com a mesma inclinação. Em seguida, o conjunto foi submetido a um ensaio de compressão não confinada, no qual uma tensão vertical foi aplicada sobre a parte superior. Essa tensão poderia ser decomposta em uma componente normal e uma componente cisalhante.

A fim de evitar restrições de ruptura e impedir a formação de um plano de cisalhamento na interface, uma folga de 5 mm foi deixada nas laterais das bases em relação à interface do corpo de prova, conforme demonstrado no projeto ilustrado na Figura 16. Além disso, pequenos cilindros de 5 mm de diâmetro, feitos do mesmo material, foram colocados sob a base para permitir o movimento desta durante a aplicação de tensão e evitar o surgimento de atrito entre a base e a placa da prensa hidráulica.

Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura na bancada por um período de 6 dias. Vinte e quatro horas antes do ensaio, os corpos de prova foram imersos em água para alcançar uma condição próxima à saturação e minimizar efeitos de sucção.

Foram conduzidos 9 ensaios *Slant Shear* no total, sendo 3 com uma inclinação de interface de 30°, 3 com 45° e 3 com 60°. A escolha dessas três inclinações foi feita a fim de possibilitar melhor aproximação da envoltória de resistência do material. Além disso, a realização dos ensaios em triplicata para cada inclinação foi adotada para aumentar a confiabilidade dos resultados.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Este capítulo mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples ( $q_u$ ), resistência à compressão diametral ( $q_t$ ), velocidade de pulso ultrassônico ( $G_0$ ) e *slant shear test*.

### 4.2 Características dos Corpos de Prova para os ensaios de resistência à compressão simples ( $q_u$ ), resistência à compressão diametral ( $q_t$ ) e velocidade de pulso ultrassônico ( $G_0$ )

As características dos corpos de prova para este ensaio foram: peso específico aparente seco de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m<sup>3</sup>, teor de umidade ótimo de 12,8%, tempo de cura de 7 dias e teor de cimento na faixa de 1 a 5%.

#### 4.2.1 Resistência à compressão simples em função do teor de cimento

A seguir, são apresentados os resultados referentes a resistência à compressão simples em função do teor de cimento para 7 dias de cura. É notória a grande influência do teor de cimento na resistência a compressão simples do material, ou seja, a resistência é proporcional ao teor de cimento. Além disso, quanto maior o valor de  $\gamma_d$ , maior foi a inclinação das retas ajustadas, indicando um aumento na resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento. Esse fato sugere que a efetividade da cimentação é maior em misturas mais compactas, onde a resistência à compressão é mais intensificada.

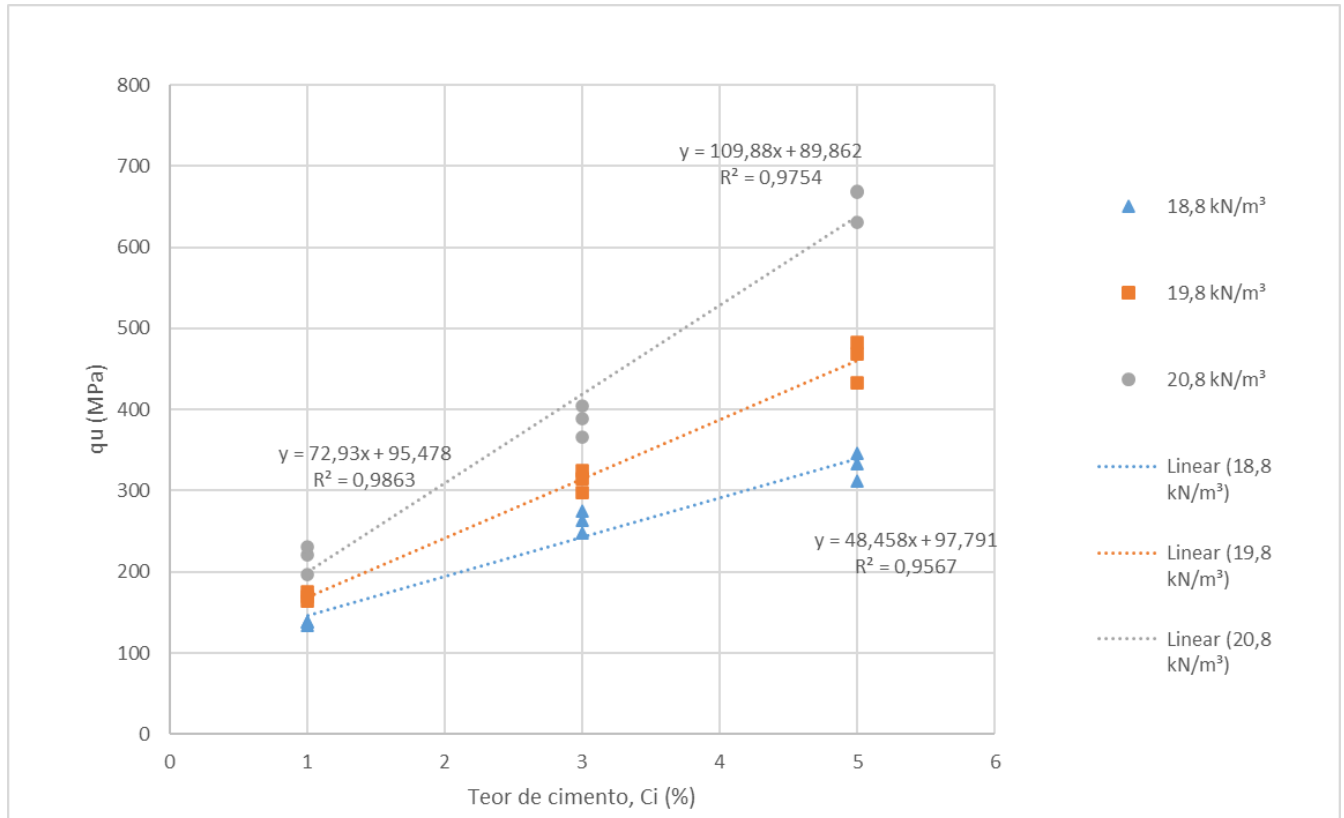


Figura 17 – Resistência à compressão simples em função do teor de cimento para  $\gamma_d$  de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m³ e 7 dias de cura.

#### 4.2.2 Resistência à compressão simples em função da porosidade

Seguindo a mesma lógica empregada do teor de cimento, a porosidade da mistura compactada teve um impacto na resistência à compressão simples no rejeito de mineração. Com isso, é possível notar que, independentemente do teor de cimento, uma menor porosidade do material resulta em maior resistência, devido ao aumento dos contatos e intertravamento entre as partículas do solo. Além disso, a distribuição de tensões e a mobilização de atrito em porosidades mais baixas contribuem para o aumento da resistência à compressão da mistura de rejeito-cimento.

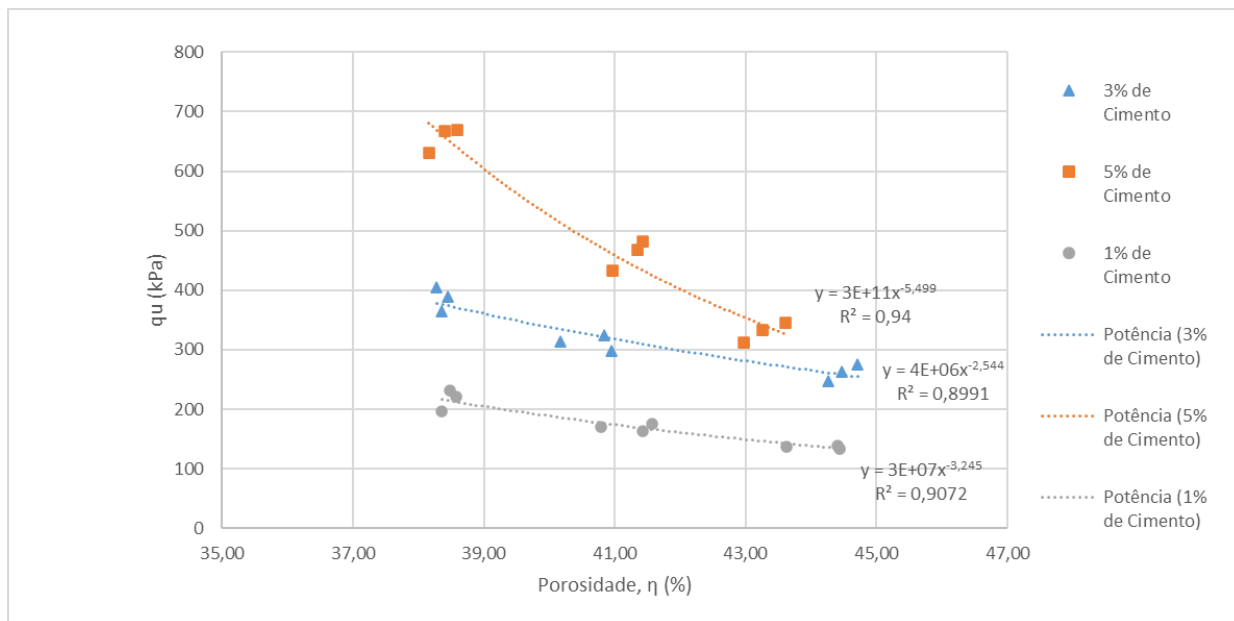


Figura 18 – Resistência à compressão simples em função da porosidade com teor de cimento variando de 1 a 5% e 7 dias de cura.

#### 4.2.3 Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/C_{iv}$

A partir da análise do gráfico, é possível perceber que quanto maior o índice  $\eta/C_{iv}$ , menor é a resistência a compressão simples. É possível notar, também, que, quanto maior é o peso específico aparente seco, maior é a resistência obtida.

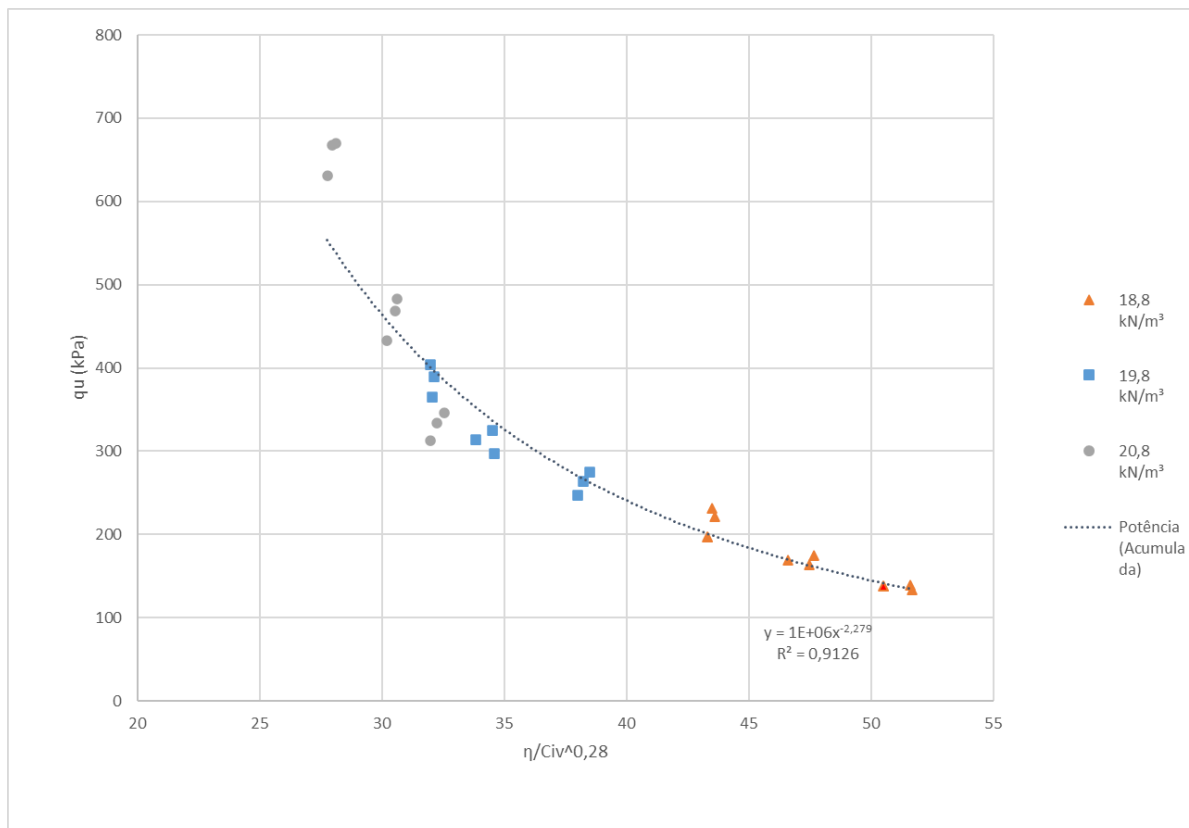


Figura 19 – Resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/C_{iv}$  para  $\gamma_d$  de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m³ e 7 dias de cura.

#### 4.2.4 Resistência à compressão diametral em função do teor de cimento

Da mesma forma que ocorre para a resistência à compressão simples, percebe-se também a grande influência do teor de cimento na resistência à compressão diametral do material; ou seja, quanto maior o teor de cimento, maior o  $q_t$  do material. Com isso, uma alteração pequena em quantidade de cimento, provoca um elevado ganho de resistência.

Outro fator importante que ocorre de maneira similar à resistência a compressão simples, é que a inclinação das retas ajustadas aumentou proporcionalmente ao valor de  $\gamma_d$ , evidenciando um aumento na resistência à compressão diametral em relação ao teor de cimento. Isso indica que a cimentação é mais eficaz em misturas compactas, com maior intensificação da resistência à compressão diametral.

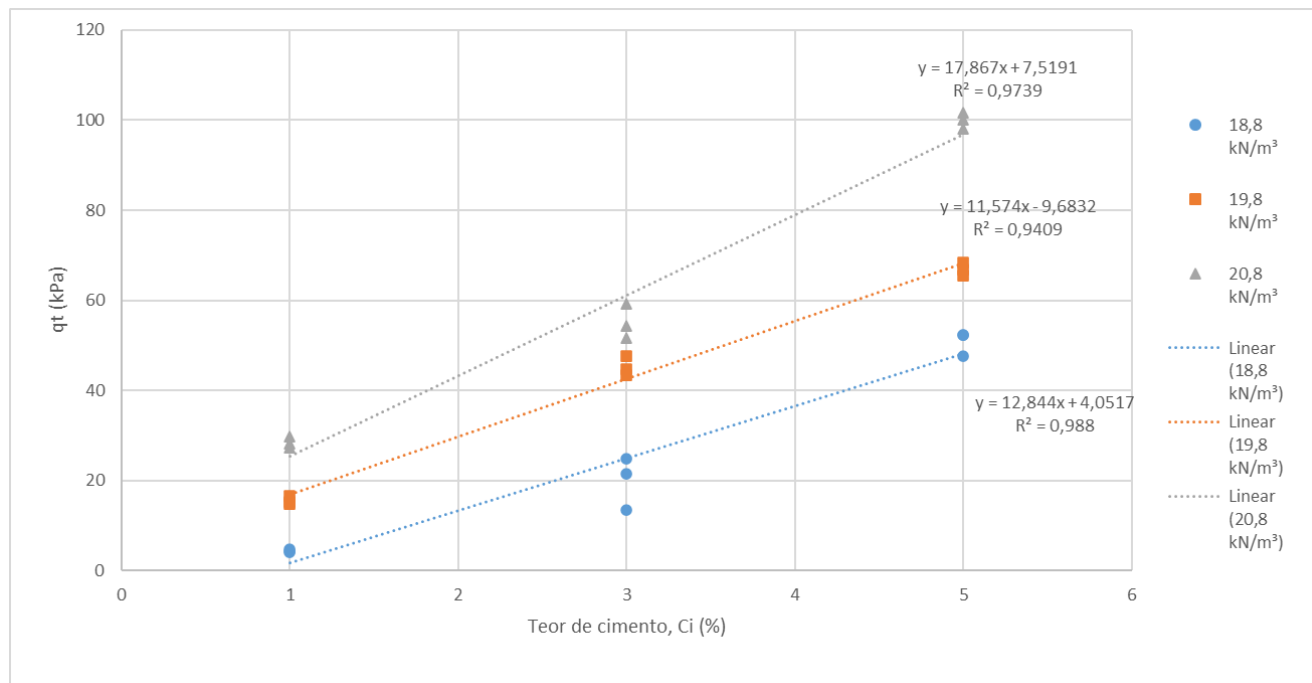


Figura 20 – Resistência à compressão diametral em função do teor de cimento para  $\gamma_d$  de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m³ e 7 dias de cura.

#### 4.2.5 Resistência à compressão diametral em função do índice $\eta/C_{iv}$

Da mesma maneira para a resistência a compressão simples, ao analisar o gráfico de da relação entre  $q_t$  e o índice  $\eta/C_{iv}$ , é evidente que o comportamento para a resistência a compressão diametral teria uma resposta similar, onde um maior valor de  $\eta/C_{iv}$  resulta em menor resistência à compressão simples. Além disso, observa-se que um maior peso específico aparente seco está associado a uma resistência mais elevada.

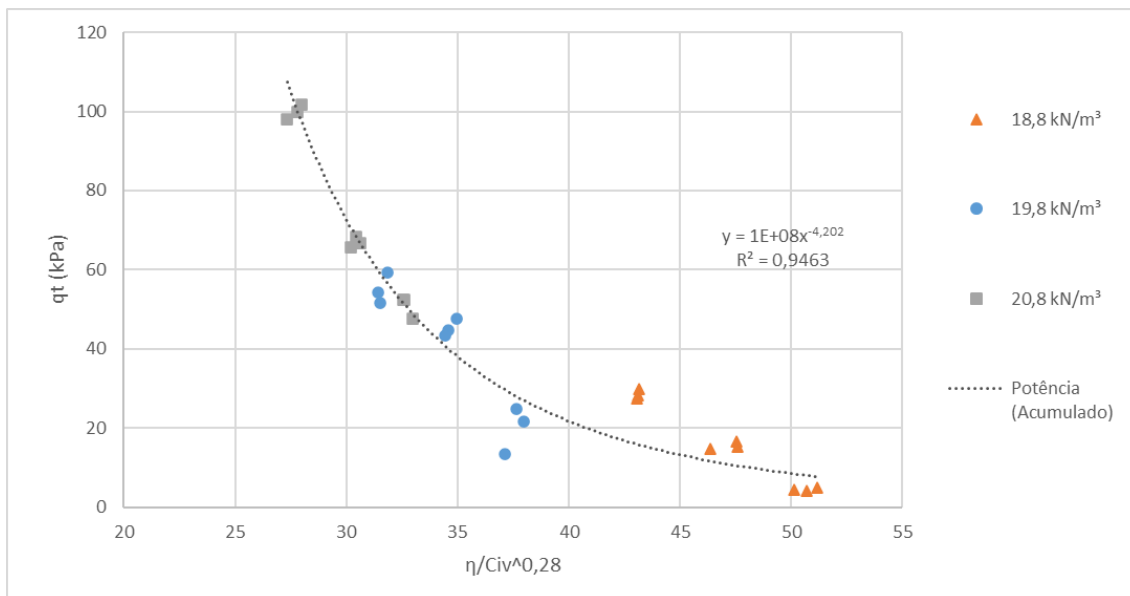


Figura 21 – Resistência à compressão diametral em função do índice  $\eta/C_{iv}$  para  $\gamma_d$  de 18,8, 19,8 e 20,8 kN/m³ e 7 dias de cura.

#### 4.2.6 Módulo de rigidez inicial em função do teor de cimento

A partir da análise dos resultados obtidos no ensaio de pulso ultrassônico, pôde-se perceber que o módulo de rigidez inicial do material é influenciado pelo teor de cimento de forma semelhante à resistência à compressão simples e diametral. Logo, é evidente o impacto do teor de no aumento do módulo de rigidez inicial. Em suma, quanto maior for a quantidade de cimento no rejeito de mineração de ferro, maior será o módulo de rigidez.

Percebe-se, também, que o aumento ocorreu de maneira gradual para o teor de cimento inicial e intermediário, enquanto para a mistura com 5% de cimento, a variação do módulo de rigidez inicial foi mais acentuada, reforçando a influência do cimento no  $G_0$ .



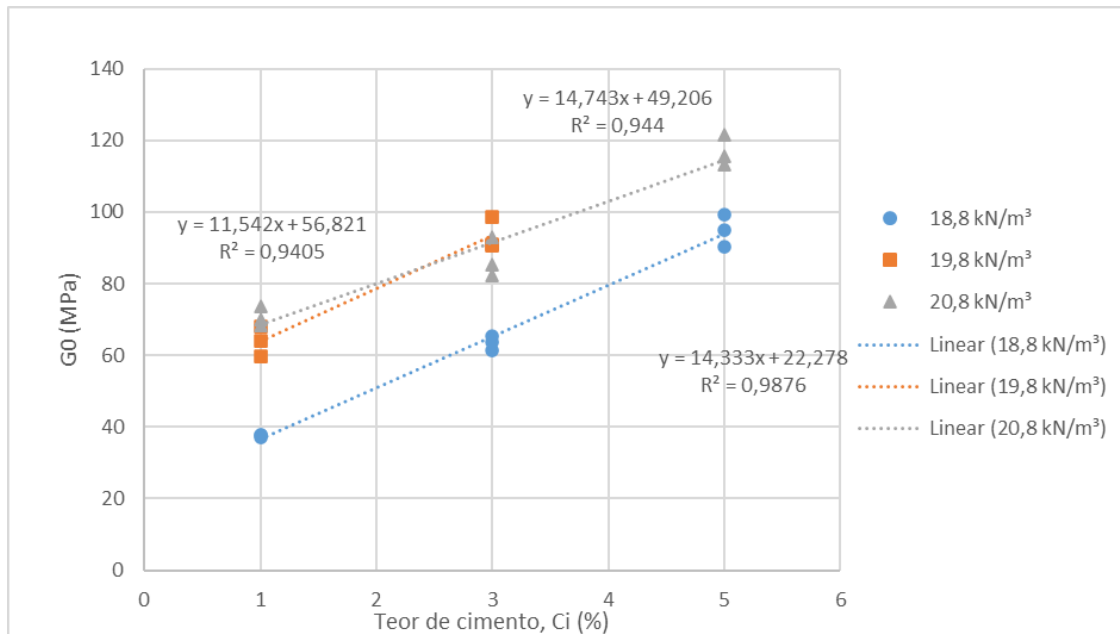


Figura 22 – Módulo de rigidez inicial em função do teor de cimento variando de 1 a 5% e 7 dias de cura.

#### 4.2.7 Módulo de rigidez inicial em função da porosidade

Ao considerar a influência da porosidade da mistura compactada, é possível observar que esta desempenha um papel semelhante ao da resistência à compressão simples no módulo de rigidez inicial do rejeito cimentado. Nesse sentido, a redução da porosidade apresenta um impacto significativo, promovendo ganhos de rigidez devido ao aumento das interações e entrelaçamento das partículas do solo, bem como à melhoria na distribuição das tensões e ao aumento do atrito em porosidades mais baixas.

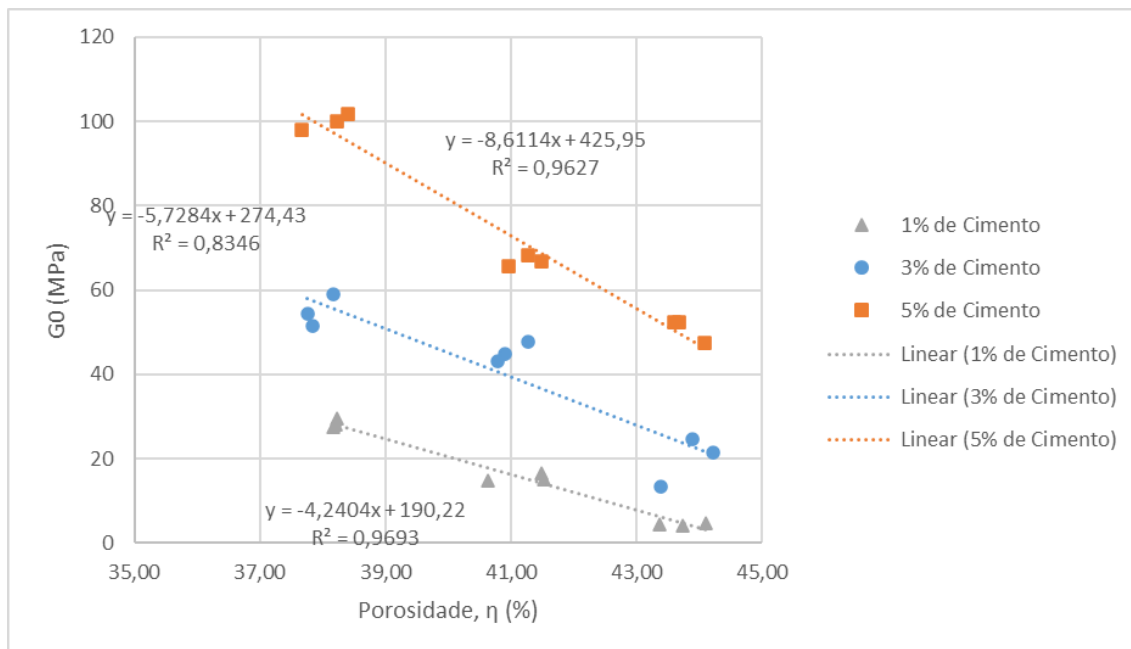


Figura 23 – Módulo de rigidez inicial em função da porosidade com teor de cimento variando de 1 a 5% e 3 dias de cura.

#### 4.2.8 Módulo de rigidez inicial em função do índice $\eta/C_{iv}$

Ao considerar os resultados obtidos a partir do ensaio de velocidade de pulso, verificou-se que o aumento do índice  $\eta/C_{iv}$  é influenciado pela redução do módulo de rigidez inicial. Além disso, ao comparar os valores dos pesos específicos aparentes na condição seca apresentados na Figura 25, constatou-se uma correlação direta com o incremento da rigidez.

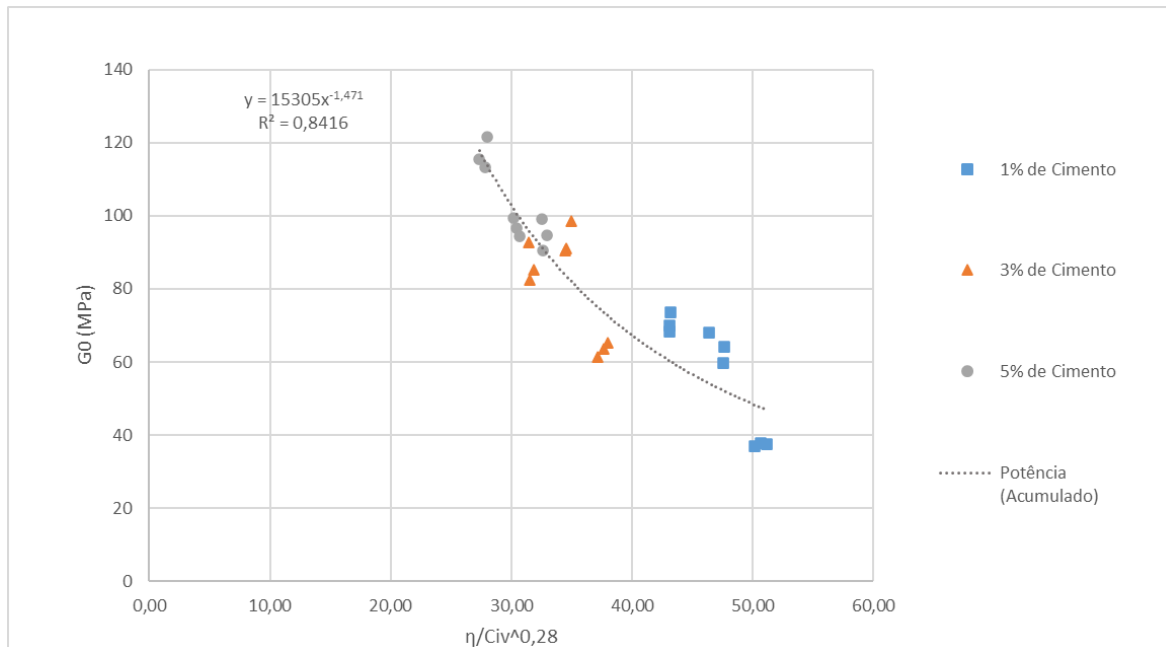


Figura 24 – Módulo de rigidez inicial em função do índice  $\eta/C_{iv}$  para  $\gamma_d$  de 17, 18 e 19 kN/m<sup>3</sup> e 7 dias de cura.

#### 4.2.9 Relação entre módulo de rigidez inicial e resistência a compressão diametral

Após plotar um gráfico com os resultados de  $G_0$  e da  $q_t$ , é notória a influência do aumento da resistência à compressão diametral no aumento do módulo de rigidez inicial. Além disso, é perceptível que houve uma pequena dispersão nos resultados da relação  $G_0/q_t$ . Essa discrepância em alguns pontos está diretamente relacionada à realização dos ensaios de  $G_0$  e  $q_t$ , e pode ser causada por problemas de moldagem, execução inadequada dos ensaios ou até mesmo por questões intrínsecas do instrumento utilizado.

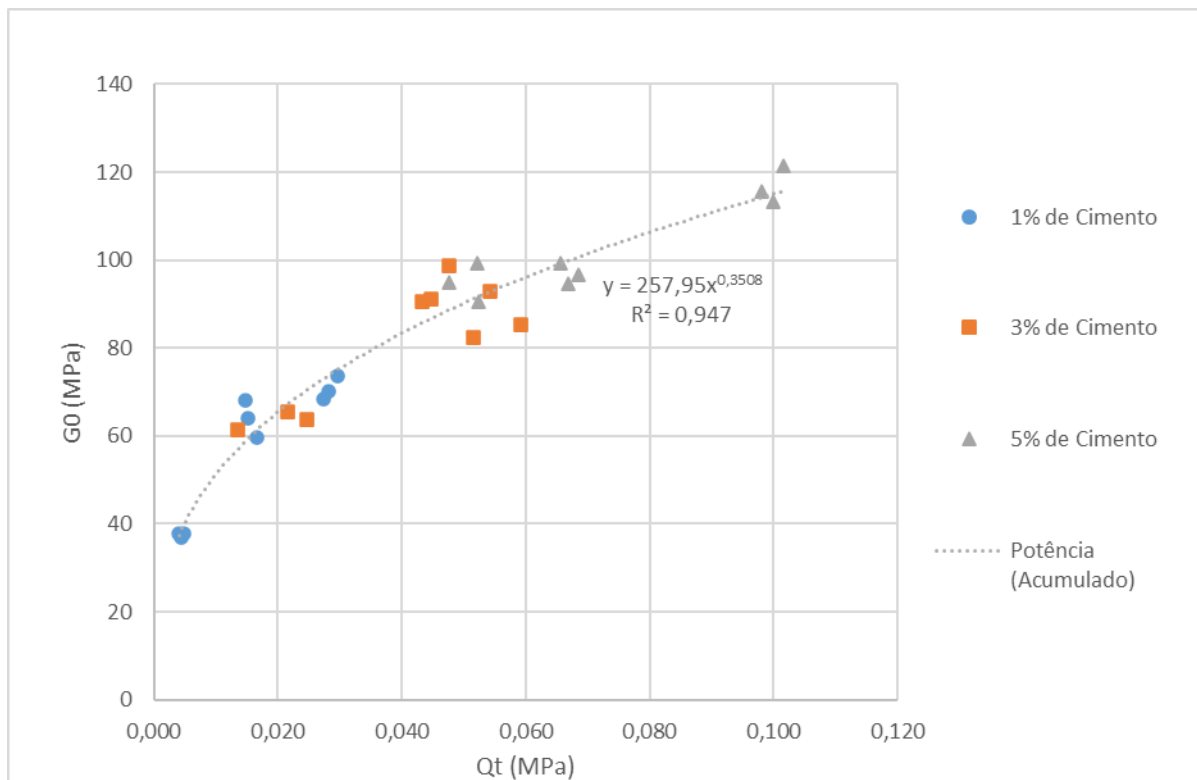


Figura 25 – Módulo de rigidez inicial em função da resistência à compressão diametral com teor de cimento variando de 1 a 5% e 7 dias de cura

#### 4.2.10 *Slant Shear Test*

Com base nos resultados do ensaio de *Slant Shear*, procurou-se avaliar a resposta cisalhante do rejeito de mineração cimentado em estudo, através da determinação dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.

As características dos corpos de prova para este ensaio foram: peso específico aparente seco de 19,8 kN/m<sup>3</sup>, teor de umidade ótimo de 12,8%, tempo de cura de 7 dias e teor de cimento de 3%. Os resultados dos ensaios de *Slant Shear* para os ângulos de 30, 45 e 60 graus estão apresentados na Figura 26.

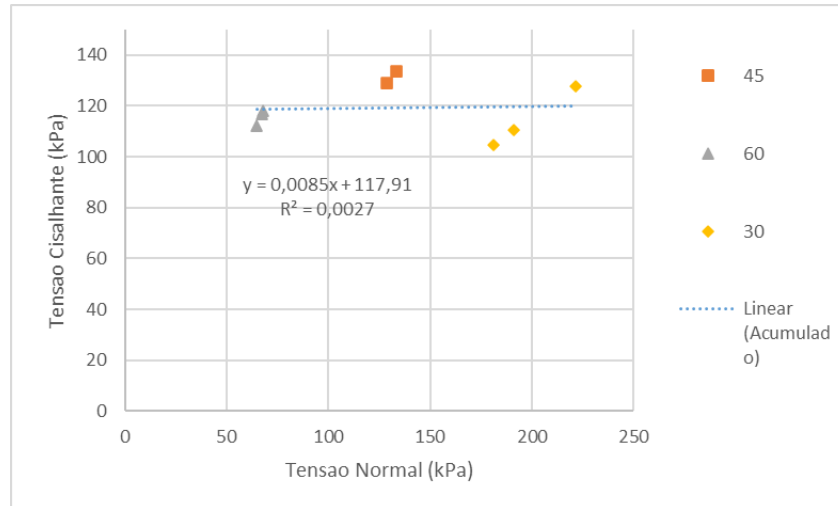


Figura 26 – Relação entre a tensão normal e a tensão cisalhante para o rejeito de mineração de ferro.

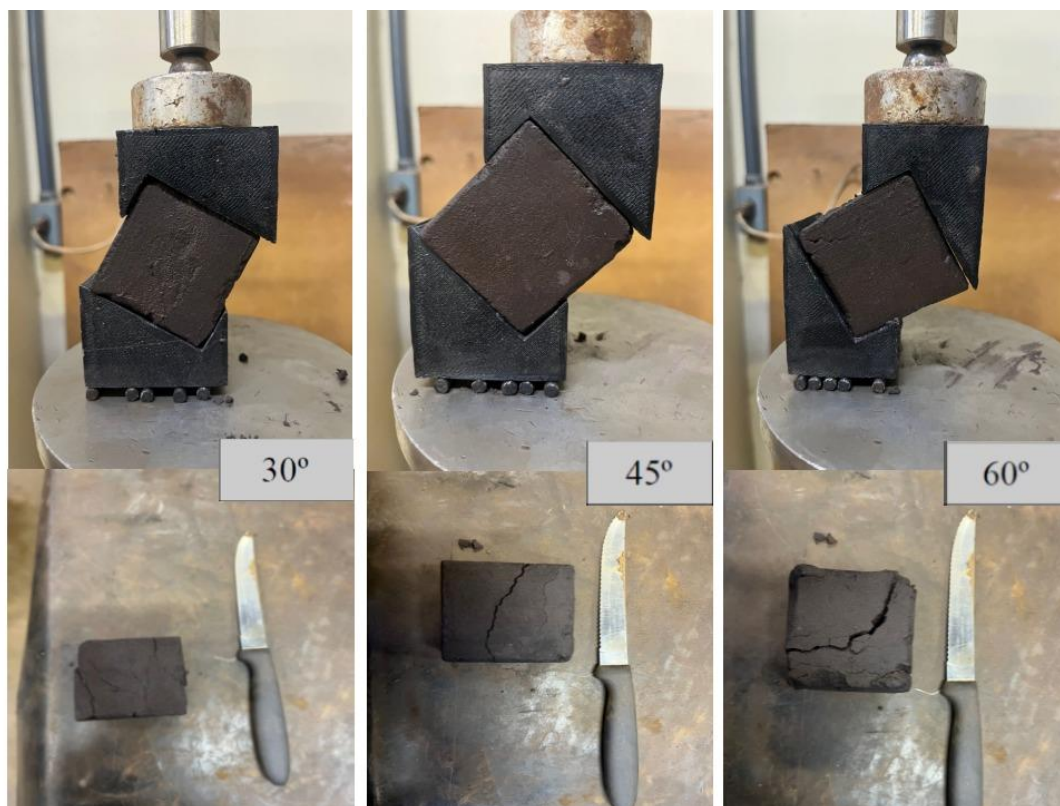


Figura 27 – Forma de ruptura das amostras submetidas ao ensaio *Slant Shear*

A partir dos resultados da análise gráfica para o ensaio *Slant Shear*, foi possível obter os valores do ângulo de atrito interno e intercepto coesivo para o rejeito cimentado

em estudo. Os valores observados foram de  $0,5^\circ$  para o ângulo de atrito e 118 kPa para a coesão do rejeito de minério de ferro. A envoltória de resistência obtida e os consequentes parâmetros determinados não estão de acordo com a resposta coesiva-friccional esperada. Uma possível causa dos valores obtidos se deve na dificuldade de moldagem dos corpos de provas

Com isso, a partir dos valores obtidos no desenvolvimento deste trabalho, foi possível comparar os valores encontrados para o ângulo de atrito e coesão do rejeito de minério de ferro com o uso da metodologia mostrada por Consoli et al.,(2014). As equações utilizadas estão demonstradas abaixo:

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{1-4\xi}{1-2\xi}\right) \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo,

$\theta'$  o ângulo de atrito;

$\xi$  é a razão entre  $q_t$  e  $q_u$ .

$$c' = \frac{\sigma_c \left[1 - \left(\frac{1-4\xi}{1-2\xi}\right)\right]}{2 \cos\left[\arcsin\left(\frac{1-4\xi}{1-2\xi}\right)\right]} \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo,

$c'$  a coesão;

$\xi$  é a razão entre  $q_t$  e  $q_u$ ;

$\sigma_c$  é a resistência a compressão simples.

Logo, os resultados obtidos através das equações para o ângulo de atrito e coesão foram de  $35^\circ$  e 80 kPa, respectivamente. A partir disso, conclui-se que os valores obtidos através do ensaio de *Slant Shear* estão incoerentes com os valores analisados por Consoli et al.,(2014) e também com o que é esperado para esse tipo de material.

## 5 CONCLUSÃO

Esse estudo teve como principal objetivo analisar a resposta mecânica de um rejeito de minério de ferro através de ensaios de resistência e rigidez, ambos para condições não confinadas. As conclusões derivadas dos experimentos laboratoriais realizados serão apresentadas a seguir.

A pesquisa comprovou que a estabilização do rejeito resulta em uma maior resistência, rigidez e parâmetros de cisalhamento. A técnica de estabilização química com cimento Portland CP V-ARI viabiliza a criação de pilhas de rejeitos estabilizados em termos de resistência. Convém ressaltar que questões ambientais e econômicas não foram abordadas na pesquisa.

### 5.1 Ensaios de Caracterização

A maioria dos ensaios convencionais de Mecânica dos Solos foi realizado para caracterizar o rejeito de minério de ferro denominado *flotation*. As características desse rejeito estão de acordo com outros rejeitos semelhantes mencionados na literatura. A análise granulométrica permite classificar o rejeito como um material geotécnico bem graduado, com distribuição uniforme.

### 5.2 Ensaios de Resistência à Compressão Simples, de Velocidade de Pulso

#### Ultrassônico e de Resistência à Compressão Diametral

Os resultados da pesquisa indicam que a adição de cimento teve um impacto substancial no aumento da resistência à compressão, no módulo de deformação inicial e na resistência à tração por compressão diametral. Mesmo pequenas quantidades de cimento contribuíram para melhorias notáveis na resistência e rigidez dos materiais.

Ao analisar o intervalo de teores de cimento de 1% a 5%, observou-se um comportamento linear de aumento nos valores de  $q_u$ ,  $G_0$  e  $q_t$  em relação à quantidade de cimento adicionada. Além disso, a inclinação das curvas de ajuste variou de acordo com o peso específico, sugerindo maior efetividade do cimento em meios mais densos.

A porosidade exerceu uma influência similar ao teor de cimento, desempenhando um papel significativo na determinação da resistência e rigidez dos materiais. Reduzir a porosidade resultou em ganhos expressivos nessas propriedades.

Esse efeito deu-se a partir de uma porosidade menor, que permitiu maior contato e intertravamento entre as partículas do solo, o que por sua vez promoveu uma distribuição mais eficiente das tensões.

O índice  $\eta/C_{iv}$  demonstrou ser um parametro relevante para avaliar as características de  $q_u$ ,  $G_0$  e  $q_t$ . Além disso, sua relação com diferentes pesos específicos (18,8, 19,8 e 20,8 kN/m<sup>3</sup>) revelou que valores maiores de  $\eta/C_{iv}$  estavam associados a níveis menores de resistência e rigidez. Isso mostra que a capacidade de suportar cargas e deformações está inversamente relacionada à magnitude desse índice.

### 5.3 Ensaio *Slant Shear*

Em resumo, por meio do ensaio de *Slant Shear*, foi possível analisar as propriedades da interface das partículas do rejeito de mineração *flotation*. Os ensaios em diferentes ângulos resultaram em valores de ângulo de atrito e coesão para o rejeito de minério de ferro. Os resultados deste ensaio de *Slant Shear* foram comparados com uma metodologia anterior, e se mostraram inconsistentes e fora das expectativas para o material estudado.



## 6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Recurso de Desenvolvimento Tecnológico RDT: estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeito de minério de ferro em pavimentos rodoviários. Nova Lima, 2018. 80 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12024: Solo – Cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 9 p., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8p, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16961: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2011.

AST M International. (2015). ASTM C882/C882M-15: Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear. West Conshohocken, PA: ASTM International.

AZAM, S., LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [s. 1.], v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

AZAMBUJA, MARCIA MORETO. Avaliação do desempenho de solos residuais da formação sanga do cabral estabilizados com cimento. 73p. - PUCRS, Porto Alegre, 2004.

BEDIN, JUCÉLIA. Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração. 207p. – UFRGS, Porto Alegre, 2010.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

CAMPANHA, A. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CARDOZO, F. A. C., PIMENTA, M. M., ZINGANO, A. C. Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração—Uma Revisão. *HOLOS*, v. 8, p. 77-85, 2016.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 107, n. 6, p. 799–817, jun. 1981.

COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. The mechanics of cemented carbonate sands. *Géotechnique*, v. 43, n. 1, p. 53–67, mar. 1993.

CONSOLI, N.C. ; CONSOLI, B.S. ; FESTUGATO, L. . A practical methodology for the determination of failure envelopes of fiber-reinforced cemented sands. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 41, p. 50-54, 2013.

CONSOLI, N.C. ; FESTUGATO, L. ; HEINECK, K. S. . Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry. *Geosynthetics International*, v. 17, p. 56-58, 2010.

CONSOLI, N.C. ; FOPPA, D. ; FESTUGATO, L. ; HEINECK, K. S. . Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, N.C. ; WINTER, DANIEL ; RILHO, ANDRY SOARES ; FESTUGATO, L. ; TEIXEIRA, BRUNO DOS SANTOS . A testing procedure for predicting strength in artificially cemented soft soils. *Engineering Geology*, v. 169, p. 61-68, 2015.

CRISTELO, N. M. C. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga – Portugal, 2001.

CDIT. *The Deep Mixing Method – Principle, design and construction*. A. A. Balkema Publishers, 2002.

DARONCO, JOÃO VICTOR. Estudo do comportamento mecânico de resíduo de mineração melhorado com cimento. 43p. - UFRGS, Porto Alegre, 2019.

ELLIOT, G., BROWN, E. T. Yield of a soft, high-porosity rock. *Géotechnique*, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 413–423, 1985.

FESTUGATO, L.; MENGER, E. ; BENEZRA, F. ; KIPPER, E. A. ; CONSOLI, N.C. . Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. *GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES*, v. 45, p. 77-82, 2017.

FRACARO, TACIANE PEDROTTI. Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método “two parts”. 178p. - UFRGS, Porto Alegre, 2022.

GENTIL, G. A. Avaliação da estabilização química de um rejeito de minério de ferro para a aplicação em infraestrutura de pavimentos. 92 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

GOMES, M. A. Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. p. 220, 2009.

GONDIM, L. M. Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, p. 213, 2008.

GENS, A.; NOVA, R. Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks. In: International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks, 1., 1993, Athens. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, p. 485 – 494, 1993.

HARA, A.; OHTA, T.; NIWA, M.; TANAKA, S.; BANNO, T. Shear modulus and shear strength of cohesive soils. *Soils and Foundations (Japanese Geotechnical Society)*, v.14, n. 3, p. 1–12, set. 1974.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. *Soil stabilization: principles and practice*. 1. ed. Sydney, Australia: Butterworths, 1972. 374 p.

JASKULSKI, FERNANDA MARIA. *Análise do Comportamento Mecânico de Rejeito de Minério de Ferro Submetido a Ativação Alcalina pelo Método “One-Part”*. 144p. – UFRGS, Porto Alegre, 2022.

LUZ, A. B.; SAMPAIO J. A.; ALMEIDA, S. L.M. *Tratamento de Minérios 2010*. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MAFESSOLI, MAIKI. *Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com cimento Portland*. 180p. - UFRGS, Porto Alegre, 2022.

MOTTA, H. P. G. *Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga geotécnica*. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NIERWINSKI, HELENA PAULA. *Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de Mineração*. 231p. – UFRGS, Porto Alegre, 2019.

OLIVEIRA, T. M. *Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros*. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

RODRIGUES, K. H. P. *Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração*. 108 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

RUZ, R. C. Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada. 215 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SENÇO, W de. Manual de Técnicas de Pavimentação. vol. 2. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SINIR. (s.d.). Resíduos de Mineração. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-de-mineracao/>.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: LUZ, A.U.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Orgs). Tratamento de Minérios, [s. 1.], ed. 5, Cap. 19, p. 831-888. Rio de Janeiro, Brasil: Cetem, p. 867, 2010.

SOARES, LINDOLFO. Barragem de rejeitos. 69p. - Rio de Janeiro, 2010.

STELA, L. H. P, DUARTE, J. C e PEREIRA, C. O. MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO ALTERNATIVOS AO MÉTODO DE BARRAGENS: UMA REVISÃO. 12p. Revista Brasileira de Processos Químicos.

TROSKI, O. A. C. Estudo de misturas solo-agregado reciclado de resíduos da construção civil. 221 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Engineering Bulletin: Cement-Bentonite Slurry Wall, US EPA, 1998.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Waste Rock and Mill Tailings: A Summary of Current State Regulatory Programs. EPA/530-SW-91-065, 1991.

VAN DE GRAAF, J. A. Four decades of cement deep mixing. Géotechnique, v. 58, n. 5, p. 361–392, 2008.

WANG, L. F.; MORTON, E. C.; HSIEH, B. B. S.; LUI, E. M. Behavior of an artificially cemented silty clay. Journal of Geotechnical Engineering, v. 120, n. 4, p. 617–636, abr. 1994.

WU, S. H.; BACHUS, R. C. Strength and deformation of cemented sandy soils. Journal of Geotechnical Engineering, v. 120, n. 4, p. 674–688, abr. 1994.

YAMAMOTO, T.; OKADA, T.; TANAKA, Y.; OHASHI, T. Solidification of loose soft clay by calcium chloride. *Soils and Foundations (Japanese Geotechnical Society)*, v. 14, n. 1, p. 37–47, mar. 1974.

YANG, L.; DENG, A. Nanjing Yangtze River Bridge Deep Mixing Pile Support Scheme and Engineering Quality Control. *American Journal of Civil Engineering*, v. 6, n. 1, p. 26–34, 2018.