

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

**ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE UM
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ULTRAFINO
ESTABILIZADO COM SOLUÇÃO POLIMÉRICA**

MATHEUS MACHADO LOPES

**ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc.
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: 381/2022**

BRASÍLIA / DF: OUTUBRO / 2022

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

**ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE UM
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ULTRAFINO
ESTABILIZADO COM SOLUÇÃO POLIMÉRICA**

MATHEUS MACHADO LOPES

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

APROVADA POR:

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc.
(Universidade de Brasília - UnB)
(ORIENTADORA)**

**ANDRÉ PACHECO ASSIS, DSc.
(Universidade de Brasília - UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**GIOVANNA MONIQUE ALELVAN, DSc.
(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 de Outubro de 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, MATHEUS MACHADO

Análise Mecânica e Microestrutural de um Rejeito de Ferro Ultrafino Estabilizado com Solução Polimérica (Distrito Federal) 2022

xviii, 67 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. Novos Materiais Geotécnicos | 2. Estabilização Química |
| 3. Parâmetros Chave | 4. Compósito Rejeito-Polímero |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, M.M. (2022). Análise Mecânica e Microestrutural de um Rejeito de Ferro Ultrafino Estabilizado com Solução Polimérica. Dissertação de Mestrado, Publicação XXXXX, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Machado Lopes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise Mecânica e Microestrutural de um Rejeito de Ferro Ultrafino Estabilizado com Solução Polimérica

GRAU / ANO: Mestre / 2022

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



Matheus Machado Lopes
Avenida das Araucárias, Lote 4150, Bloco B,
Apartamento 1307, Residencial Blend.
CEP: 71936-250 – Brasília/DF – Brasil

“Vou continuar
andando — decretei.
— E lidarei com o
futuro que surgir
disso”.

A Flecha de Fogo —
Leonel Caldela

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais Káthia e Claudenor, minhas irmãs Maithê e Mallu, minhas tias Cássia e Gaby, meus primos Gustavo e Henrique por todo o suporte e carinho.

À minha companheira Victória, por me suportar até nas horas em que eu não me suporto.

Aos meus grandes amigos Caio, Flávia, Marina e João, por deixarem a vida um pouco mais leve com nossos rolês, nossas conversas e jogatinas.

Aos meus amigos do RPG, Bruno, Daniel, Grégori, Humberto, Isabella, Kenjiro, Marcos, Michael, Micaele, Pedro, Tito, Thayná, Vitor. Se não fossem as jogatinas, provavelmente não teria conseguido sobreviver na pandemia.

Ao grupo de pesquisa Casagrande, Andressa, José, Mario, Mayara, Roberto por todo o suporte, apoio e parceria à pesquisa. Agradeço em especial à Nathália e Giovanna, que me ajudaram mais que tudo nesta pesquisa.

Aos amigos que fiz pelo caminho, Gabriel, Igor e Monique, que tornaram os dias no laboratório mais leves.

Ao meu grande amigo e coorientador, Luis Fernando. Mesmo não estando presente fisicamente nessa parte da minha caminhada, pude contar com sua amizade e orientação desde a graduação e jamais vou esquecer tudo que fez por mim. Espero que se recupere e volte a abrilhantar o programa com sua humanidade ímpar.

Por fim, e a mais importante pra esta pesquisa, minha orientadora e grande amiga Michéle, pela parceria que começou em 2018 e não se encerra. Que essa parceria não acabe e só se fortaleça.

RESUMO

A estabilização química de rejeitos de mineração para utilizá-los como material em obras de engenharia vem se tornando uma alternativa cada dia mais viável para desviá-los da disposição em pilhas e barragens. Para tal, é necessário realizar uma análise multidisciplinar para caracterizar o máximo possível este material e indicar as melhores circunstâncias para seu uso. Esta pesquisa tem como objetivo determinar as melhores dosagens de um polímero acrílico-estirenado como estabilizante químico para um rejeito de minério de ferro ultrafino.

Os estudos foram iniciados por uma demanda da mineradora Vale por pavimentos de qualidade suficiente para que os caminhões com minério ou rejeito possam circular livremente durante os períodos de chuva. Atualmente os complexos mineradores têm dificuldade de movimentar seus maquinários em períodos chuvosos, impactando a produção mineral de forma que estes inviabilizam os processos de extração e beneficiamento por um déficit logístico de transporte dentro dos complexos mineradores, levando a perda de capacidade produtiva temporariamente entre estes períodos chuvosos.

Este estudo avaliou as características físicas do rejeito de minério de ferro por meio dos ensaios de massa específica dos grãos e análise granulométrica; químicas por meio dos ensaios de espectrometria de fluorescência de raio-x (XRF/EDX) e espectroscopia de raio-X por dispersão em energia (EDS); hidráulica pelo ensaio de permeabilidade; mineralógica pelo ensaio de difração de raio-X (DRX); microestruturais pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia computadorizada; e mecânicas do compósito formado pelo rejeito e por um copolímero acrílico-estirenado, começando pelo ensaio de compactação para determinar o melhor teor de umidade para trabalhar o material; em sequência por ensaios de compressão simples para determinar as melhores dosagens de polímero que foram as de 40% e 30%; depois, examinado estas dosagens em diferentes densidades (2,2 g/cm³, 2,3 g/cm³ e 2,4 g/cm³) em ensaios de compressão simples e ensaios de cisalhamento direto em diferentes tensões de confinamento (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa) para um tempo de cura ao ar de 28 dias. Por fim, foi determinada uma correlação matemática por meio dos parâmetros chave na tentativa de encontrar uma relação entre a dosagem de polímero e a resistência do compósito. Os resultados corroboram para que o uso de polímeros aplicados em rejeitos seja uma boa alternativa de melhoramento deste material para que este possa ser aplicado em obras de engenharia.

ABSTRACT

The chemical stabilization of mining tailings to use them as material in engineering works is becoming an increasingly viable alternative to divert them from disposal in piles and dams. For this, it is necessary to carry out a multidisciplinary analysis to characterize this material as much as possible and indicate the best circumstances for its use. This research aims to determine the best dosages of a styrene-acrylic polymer as a chemical stabilizer for an ultrafine iron tailings.

The studies were initiated due to a demand for the mining company Vale for pavements of sufficient quality so that trucks carrying ore or tailings could circulate freely during periods of rain. Currently, mining complexes have difficulty moving their machinery in rainy periods, impacting mineral production in such a way that they make the extraction and beneficiation processes unfeasible due to a logistical transport deficit within the mining complexes, leading to a temporary loss of productive capacity between these rainy periods.

This study evaluated the physical characteristics of iron ore tailings through tests of specific gravity of the grains and granulometric analysis; chemical characteristics through X-ray fluorescence spectrometry (XRF/EDX) and energy dispersion X-ray spectroscopy (EDS) assays; hydraulic characteristics by permeability test; mineralogical characteristics by X-ray diffraction assay (XRD); microstructural characteristics by scanning electron microscopy (SEM) and computed microtomography; and mechanical characteristics of the composite formed by the waste and a styrene-acrylic copolymer, starting with the compaction test to determine the best moisture content to work the material; in sequence by simple compression tests to determine the best polymer dosages which were 40% and 30%; then examined these dosages at different densities (2.2 g/cm^3 , 2.3 g/cm^3 and 2.4 g/cm^3) in simple compression tests and direct shear tests at different confinement stresses (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa and 200 kPa) for an air cure time of 28 days. Finally, a mathematical correlation was determined using key parameters in an attempt to find a relationship between polymer dosage and composite strength. The results corroborate that the use of polymers applied in waste is a good alternative for improving this material so that it can be applied in engineering works.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Relevância e Justificativa.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.	Atividade Mineradora de Ferro no Brasil.....	3
2.2.	Aspectos Gerais da Caracterização de Rejeitos.....	4
2.3.	Aspectos Gerais do Reaproveitamento de Rejeitos.....	5
2.4.	Estudo da Aplicação de Polímeros em Rejeitos.....	7
2.5.	Parâmetros Chave.....	9
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1.	Materiais.....	13
3.1.1.	Rejeito de Minério de Ferro.....	13
3.1.2.	Polímero.....	13
3.2.	Métodos.....	13
3.2.1.	Caracterização Física.....	13
3.2.2.	Caracterização Mecânica.....	14
3.2.3.	Caracterização Hidráulica.....	17
3.2.4.	Caracterização Mineralógica.....	18
3.2.5.	Caracterização Microestrutural.....	18
3.2.6.	Caracterização Química.....	20
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1.	Caracterização Física.....	22
4.1.1.	Massa Específica dos Grãos.....	22
4.1.2.	Análise Granulométrica.....	22
4.2.	Caracterização Mecânica.....	24
4.2.1.	Compactação.....	24
4.2.2.	Ensaio de Dosagem.....	25
4.2.3.	Ensaio de Compressão Simples.....	28
4.2.4.	Ensaio de Cisalhamento Direto.....	30
4.3.	Caracterização Hidráulica.....	41
4.3.1.	Ensaio de Permeabilidade.....	42

4.4.	Caracterização Mineralógica	43
4.4.1.	Difração de Raio-X (DRX)	Erro! Indicador não definido.
4.5.	Caracterização Microestrutural	45
4.5.1.	Microtomografia Computadorizada (MicroCT).....	45
4.5.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	54
4.6.	Caracterização Química	56
4.6.1.	Espectrometria de Florescência de Raio-X (XRF/EDX).....	56
4.6.2.	Espectroscopia de Raio-X por Dispersão em Energia (EDS).....	57
4.7.	Parâmetros Chave	58
5.	CONCLUSÃO.....	61
	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Previsão da tensão desvio por meio da relação vazios/cimento (Consoli <i>et al.</i> , 2007)	11
Figura 2.2 – Resultados de Tensão de Compressão Não Confinada (Scheuermann <i>et al.</i> , 2021)	12
Figura 3.1 – Tentativa de Compactação	16
Figura 3.2 - Materiais e métodos para a determinação do coeficiente de permeabilidade dos compósitos (Silva, 2020)	18
Figura 3.3 - Microtomógrafo SkyScan 1172 – LPRF/UnB	20
Figura 3.4 – Volume de Interesse	20
Figura 3.5 – Microscópio Eletrônico de Varredura	21
Figura 4.1 – Curva Granulométrica do Rejeito de Ferro	24
Figura 4.2 – Curva de Compactação	25
Figura 4.3 – Índice de Vazios do Rejeito de Ferro	26
Figura 4.4 – Compressão Simples em Diferentes Dosagens de Polímero	27
Figura 4.5 – Corpos de Prova Após Ruptura	29
Figura 4.6 – Curvas de Tensão-Deformação para Compósitos com 40% de Polímero ..	30
Figura 4.7 – Curvas de Tensão-Deformação para Compósitos com 30% de Polímero ..	30
Figura 4.8 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal do Rejeito 2,2 g/cm ³	32
Figura 4.9 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal do Rejeito 2,3 g/cm ³	32
Figura 4.10 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal do Rejeito 2,4 g/cm ³ ...	32
Figura 4.11 – Envoltórias de Ruptura para o Rejeito Puro	33
Figura 4.12 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+30%P 2,2 g/cm ³ . 35	
Figura 4.13 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+30%P 2,3 g/cm ³ . 35	
Figura 4.14 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+30%P 2,4 g/cm ³ . 35	
Figura 4.15 – Envoltórias de Ruptura para o Rejeito + 30% de Polímero	36
Figura 4.16 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+40%P 2,2 g/cm ³ . 36	
Figura 4.17 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+40%P 2,3 g/cm ³ . 36	
Figura 4.18 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+40%P 2,4 g/cm ³ . 38	
Figura 4.19 – Envoltórias de Ruptura para o Rejeito + 40% de Polímero	39
Figura 4.20 – Compilado dos Resultados de Cisalhamento Direto (a) Rejeito Puro 2,2 g/cm ² ; (b) Rejeito Puro 2,3 g/cm ² ; (c) Rejeito Puro 2,4 g/cm ² ; (d) Rejeito + 30% de	

Polímero 2,2 g/cm ² ; (e) Rejeito + 30% de Polímero 2,3 g/cm ² ; (f) Rejeito + 30% de Polímero 2,4 g/cm ² ; (g) Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ² ; (h) Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ² ; (i) Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ²	40
Figura 4.21 - Coesão e Ângulo de Atrito para o Rejeito Puro	41
Figura 4.22 - Coesão e Ângulo de Atrito para o Rejeito + 30% Polímero	41
Figura 4.23 - Coesão e Ângulo de Atrito para o Rejeito + 40% Polímero	41
Figura 4.24 – DRX do Rejeito Puro	43
Figura 4.25 – DRX do Rejeito com 30% de Polímero	44
Figura 4.26 – DRX do Rejeito com 40% de Polímero	44
Figura 4.27 – Região de Interesse (a) Imagem Bidimensional do Rejeito Puro 2,2 g/cm ³ ; (b) Imagem Bidimensional do Rejeito Puro 2,3 g/cm ³ ; (c) Imagem Bidimensional do Rejeito Puro 2,4 g/cm ³ ; (d) Área da Seção do Rejeito Puro 2,2 g/cm ³ ; (e) Área da Seção do Rejeito Puro 2,3 g/cm ³ ; (f) Área da Seção do Rejeito Puro 2,4 g/cm ³	46
Figura 4.28 – Região de Interesse (a) Imagem Bidimensional do Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³ ; (b) Imagem Bidimensional do Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³ ; (c) Imagem Bidimensional do Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³ ; (d) Área da Seção do Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³ ; (e) Área da Seção do Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³ ; (f) Área da Seção do Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³	47
Figura 4.29 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro 2,2 g/cm ³	49
Figura 4.30 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro 2,3 g/cm ³	49
Figura 4.31 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro 2,4 g/cm ³	49
Figura 4.32 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³ ...	50
Figura 4.33 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³ ...	50
Figura 4.34 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³ ...	50
Figura 4.35 – Distribuição de Poros: Rejeito Puro 2,2 g/cm ³	52
Figura 4.36 – Distribuição de Poros: Rejeito Puro 2,3 g/cm ³	52
Figura 4.37 – Distribuição de Poros: Rejeito Puro 2,4 g/cm ³	52
Figura 4.38 – Distribuição de Poros: Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³	53
Figura 4.39 – Distribuição de Poros: Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³	53
Figura 4.40 – Distribuição de Poros: Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³	53
Figura 4.41 – MEV das Amostras Aumentadas 70 vezes (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,2 g/cm ³ ; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,3 g/cm ³ ; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,4 g/cm ³	54
Figura 4.42 – MEV das Amostras Aumentadas 190 vezes (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito +	

40% Polímero 2,2 g/cm ³ ; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,3 g/cm ³ ;(b) Rejeito + 40% Polímero 2,4 g/cm ³	55
Figura 4.43 – MEV das Amostras Aumentadas 500 vezes (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,2 g/cm ³ ; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,3 g/cm ³ ;(b) Rejeito + 40% Polímero 2,4 g/cm ³	56
Figura 4.44 – Resultados de XRF (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³ ; (b) Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³ ; (b) Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³	57
Figura 4.45 – Resultados EDS (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero	58
Figura 4.46 – Relação da RCS com a Razão Porosidade por Teor Polimérico	59
Figura 4.47 – Relação de $ \sigma-\tau $ com a Razão Porosidade por Teor Polimérico	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Porcentagens Reais de Teor de Polímero	17
Tabela 4.1 – Valores de Massa Específica dos Grãos (modificado – Sotomayor, 2018).23	
Tabela 4.2 – Dados Obtidos a Partir da Curva Granulométrica	24
Tabela 4.3 – Tensão de Pico dos Compósitos	28
Tabela 4.4 – Tensão de Pico para os Compósitos	31
Tabela 4.5 – Parâmetros de Resistência do Rejeito Puro	33
Tabela 4.6 – Tensões de Pico das Amostras de Rejeito Puro	34
Tabela 4.7 – Parâmetros de Resistência do Rejeito + 30% de Polímero	36
Tabela 4.8 – Tensões de Pico das Amostras de Rejeito + 30% de Polímero	37
Tabela 4.9 – Parâmetros de Resistência do Rejeito + 40% de Polímero	39
Tabela 4.10 – Tensões de Pico das Amostras de Rejeito + 40% de Polímero	40
Tabela 4.11 – Tensões de Pico para todas as Amostras	41
Tabela 4.12 – Coeficientes de Permeabilidade do Rejeito Puro e do Compósito	42
Tabela 4.13 – Porcentagem das Composições das Amostras	48

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALM – Perda de Massa Acumulada

ASTM – American Society for Testing and Materials

B_{iv} - Teor Volumétrico de Ligante

C_c – Coeficiente de Curvatura

CMBH – Câmara Municipal de Belo Horizonte

c_v – Coeficiente de Adensamento

C_u – Coeficiente de Uniformidade

DNER-ME - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio

DRX - Difração de Raio-X

D_{10} - Diâmetro que Passa 10% do Material

D_{30} – Diâmetro que Passa 30% do Material

D_{60} – Diâmetro que Passa 60% do Material

EDS - Espectroscopia de Raio-X por Dispersão em Energia

IBGM – Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos

k – Coeficiente de Permeabilidade

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

microCT – Microtomografia Computadorizada

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira

PIB – Produto Interno Bruto

PNM – Plano Nacional de Mineração

qt – Resistência à Tração Dividida

qu – Resistência à Compressão Não Confinada

RCS – Resistência à Compressão Simples

R+P30%_2.2 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³

R+P30%_2.3 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³

R+P30%_2.4 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³

R+P40%_2.2 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³

R+P40%_2.3 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³

R+P40%_2.4 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³

R_2.2_50 – Rejeito Puro com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 50 kPa
R_2.2_100 – Rejeito Puro com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 100 kPa
R_2.2_150 – Rejeito Puro com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 150 kPa
R_2.2_200 – Rejeito Puro com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 200 kPa
R_2.3_50 – Rejeito Puro com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 50 kPa
R_2.3_100 – Rejeito Puro com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 100 kPa
R_2.3_150 – Rejeito Puro com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 150 kPa
R_2.3_200 – Rejeito Puro com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 200 kPa
R_2.4_50 – Rejeito Puro com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 50 kPa
R_2.4_100 – Rejeito Puro com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 100 kPa
R_2.4_150 – Rejeito Puro com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 150 kPa
R_2.4_200 – Rejeito Puro com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 200 kPa
R+30P_2.2_50 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 50 kPa
R+30P_2.2_100 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 100 kPa
R+30P_2.2_150 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 150 kPa
R+30P_2.2_200 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 200 kPa
R+30P_2.3_50 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 50 kPa
R+30P_2.3_100 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 100 kPa
R+30P_2.3_150 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 150 kPa
R+30P_2.3_200 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 200 kPa
R+30P_2.4_50 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 50 kPa
R+30P_2.4_100 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 100 kPa
R+30P_2.4_150 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 150 kPa

R+30P_2.4_200 – Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 200 kPa

R+40P_2.2_50 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 50 kPa

R+40P_2.2_100 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 100 kPa

R+40P_2.2_150 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 150 kPa

R+40P_2.2_200 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³ Confinado à 200 kPa

R+40P_2.3_50 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 50 kPa

R+40P_2.3_100 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 100 kPa

R+40P_2.3_150 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 150 kPa

R+40P_2.3_200 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³ Confinado à 200 kPa

R+40P_2.4_50 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 50 kPa

R+40P_2.4_100 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 100 kPa

R+40P_2.4_150 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 150 kPa

R+40P_2.4_200 – Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³ Confinado à 200 kPa

R+30%P_2.2 – Envoltória de Ruptura para o Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³

R+30%P_2.3 – Envoltória de Ruptura para o Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³

R+30%P_2.4 – Envoltória de Ruptura para o Rejeito + 30% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³

R+40%P_2.2 – Envoltória de Ruptura para o Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,2 g/cm³

R+40%P_2.3 – Envoltória de Ruptura para o Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,3 g/cm³

R+40%P_2.4 – Envoltória de Ruptura para o Rejeito + 40% de Polímero com Densidade de 2,4 g/cm³

TRT-MT – Tribunal Regional do Trabalho da 23^a Região

VOI - Volume de Interesse

VPM – Valor da Produção Mineral

WDS - Espectrômetro Dispersivo de Comprimento de Onda

XRF/EDX - Espectrometria de Florescência de Raio-X

P_{iv} - Teor Volumétrico de Polímero

ρ_s - Massa Específica dos Grãos

η - Porosidade

1. INTRODUÇÃO

1.1. Relevância e Justificativa

Apesar de uma ligeira diminuição na participação percentual no PIB (Produto Interno Bruto) do Brasil nas últimas décadas, explicada pela diversificação da economia, a indústria mineral tem uma participação expressiva de 4,2%, em média. Nas exportações brasileiras o setor mineral corresponde em média a 20% e dentre todos os bens minerais, o minério de ferro corresponde a 90% do total (MME, 2010).

Esta grande demanda exige uma produção correspondente, e quanto maior a produção maior a geração de rejeitos. Além disso, esta alta viabilizou a extração de rochas com teor de ferro reduzido que implica em uma geração de rejeitos mais acentuada requerendo barragens e pilhas com tamanhos cada vez maiores para disposição desse material (Carneiro, 2020).

Para atender a demanda se fez necessário o desenvolvimento de novas técnicas de extração de minérios, mas mesmo diante do crescimento de técnicas, a falta de monitoramento levou há diversos acidentes em barragens de rejeitos.

Em novembro de 2015, com o rompimento da barragem de Fundão, aproximadamente 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, compostos principalmente por sílica e óxido de ferro, foram lançados no meio ambiente, atingindo 663 quilômetros de rios e córregos e 1.469 hectares de vegetação (Agência Brasil, 2016).

Outro acidente ocorreu em janeiro de 2019, com o rompimento da Barragem I na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho no estado de Minas Gerais. A ruptura da barragem lançou, aproximadamente, 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro ao meio ambiente e a lama chegou a uma distância maior que 85 quilômetros do ponto de ruptura que atingiram rios e inúmeros hectares de florestas, ocasionando mortandade de animais e plantas aquáticas, além de danos irreversíveis ao meio ambiente. Deve-se pontuar, também, que a ruptura levou a mais de 270 perdas de vida humana (TRT-MT, 2022).

Na tentativa de reduzir a possibilidade de tragédias similares no futuro, várias medidas estão sendo estudadas para lidar com a fonte deste problema. Uma das estratégias utilizadas tem sido a tentativa de redução do potencial de liquefação dos rejeitos já dispostos em barragens, tomando medidas para aumentar a segurança como o uso de técnicas de melhoramento do solo na redução do índice de vazios dos rejeitos (Kumar,

2001). Outra estratégia tem focado no uso dos rejeitos como material base ou compósito na estabilização de taludes, edificação de sub-base de pavimentos e aterros (Fahey *et al.* 2009; Consoli *et al.* 2008, 2009; Helinski *et al.* 2011; Carneiro, 2020; Alelvan, 2022).

Os estudos acerca da utilização dos rejeitos como material para obras de engenharia vêm apresentando resultados adequados e viabilizando o uso deste material para diversas finalidades. Porém, cada rejeito tem sua particularidade, sendo comum que as propriedades geotécnicas de um dado rejeito não sejam suficientes para sua aplicação em obras, dessa forma se faz necessário o uso de reforço para estes materiais.

Alguns estudos realizados com o uso de polímeros para estabilização de rejeitos (Carneiro, 2020; Alelvan, 2022) apresentaram resultados positivos, na qual a aplicação de polímero no rejeito levou a ganhos significativos em parâmetros de resistência. Alelvan (2022) também propôs um método de previsão de comportamento, correlacionando os parâmetros de resistência à compressão simples e a razão porosidade pelo teor polimérico, e obteve resultados significativos.

1.2. Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi estudar o comportamento físico, químico, mecânico, mineralógico e microestrutural de um rejeito de minério de ferro ultrafino estabilizado quimicamente com um copolímero acrílico-estirenado para aplicação em estruturas geotécnicas.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Identificar a influência do teor de solução polimérica utilizada e qual os melhores teores para conduzir a pesquisa;
- Verificar o efeito da aplicação do polímero nos parâmetros físico-mecânicos do rejeito de minério de ferro ultrafino conduzindo ensaios de compressão simples e cisalhamento direto;
- Realizar uma avaliação química, geológica e mineralógica que colabore no entendimento da estabilização dos rejeitos de mineração e possa futuramente fomentar a base teórica da Mecânica dos Rejeitos;
- Conduzir uma investigação microestrutural com o uso de MEV e microtomografia para observar as interações entre as partículas de rejeito com o polímero;
- Propor um estudo de dosagem da mistura rejeito-polímero, buscando identificar uma correlação matemática de parâmetros-chave do comportamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Atividade Mineradora de Ferro no Brasil

A indústria da mineração tem participação de 4,2% no PIB brasileiro de acordo com o PNM (Plano Nacional de Mineração) sendo que 61% do VPM (Valor da Produção Mineral) corresponde à mineração de ferro, com produção de 351 Megatoneladas, estima-se que esta produção de aumente para 1.098 Megatoneladas até o ano de 2030. No setor de exportações o minério de ferro representa quase 90% dos bens minerais primários exportados, em valor, sendo que a maior parte das vendas se direciona a um único mercado, a China.

Para que seja exportado ou mesmo absorvido pela indústria interna, os minérios devem passar pelos processos de tratamento ou beneficiamento que consistem de diversas operações unitárias – aplicadas aos bens minerais – como: cominuição (britagem e moagem), peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonagem, classificação em espiral), concentração (gravítica, magnética, eletrostática, flotação), desaguamento (espessamento e filtragem), secagem (secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado) e finalmente a disposição de rejeito. Estes processos visam modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, e por ventura, podem sofrer até alterações de ordem química resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor (Luz *et al.*, 2010).

A última etapa do processo de beneficiamento – disposição de rejeitos – tem maior ênfase para este estudo, visto que o aumento da demanda por bens minerais gera um aumento significativo na produção de estéreis e rejeitos, que são dispostos em barragens ou pilhas, sem finalidade; um material que muitas vezes apresenta características físico-mecânicas interessantes para fins geotécnicos.

A grande geração de rejeitos minerais advindos da etapa de beneficiamento do minério torna viável a edificação de barragens para estocagem deste material. Entretanto, se construído de forma inadequada, essas estruturas representam um grande risco para sociedade, meio ambiente e também para a economia (Carneiro, 2020).

Em 2015, o assunto entrou em foco devido ao rompimento da barragem de Fundão em Mariana no Estado de Minas Gerais. Aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração foram lançados no meio ambiente, atingindo 663 quilômetros de rios e córregos e 1.469 hectares de vegetação. A lama oriunda da ruptura da barragem do

Fundão invadiu Bento Rodrigues, distrito da cidade histórica de Mariana, Minas Gerais, deixando 19 mortos, dezenas de famílias desabrigadas, e gerando danos incalculáveis ao meio ambiente da região. Aproximadamente, 207 edificações foram soterradas apenas no distrito de Bento Rodrigues/MG. A lama chegou ao rio Doce, cuja bacia é a maior da região Sudeste do País, expandindo a turbidez da água e ocasionando a morte de animais que ali se encontravam (Agência Brasil, 2016).

Não obstante, em 2019, ocorreu o rompimento da Barragem I na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho também em Minas Gerais, a barragem possuía 86 m de altura e era construída utilizando o método de alteamento a montante. Aproximadamente 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro foram lançados ao meio ambiente a lama chegou a mais de 85 km do ponto de ruptura, atingindo rios, aproximadamente 125 hectares de florestas, deixando aproximadamente 270 mortos e dezenas de desaparecidos (TRT-MT, 2022).

À luz destes acontecimentos, fica evidente que novas metodologias devem ser empregadas para dispor destes rejeitos seja para melhorar a capacidade de beneficiamento dos minérios gerando menos rejeitos, seja desenvolvendo novas tecnologias mais seguras de disposição deste material. Outra alternativa extremamente válida é de aproveitar das propriedades físico-mecânicas destes rejeitos a fim de aplicá-los em obras geotécnicas.

2.2. Aspectos Gerais da Caracterização de Rejeitos

Até pouco tempo atrás, a caracterização tecnológica era pouco aplicada aos rejeitos de usinas de beneficiamento de minérios, sendo esses descartados sem maiores conhecimentos de suas características físicas, químicas e mineralógicas e de sua resposta aos processos de refino. Nos últimos anos, este cenário vem mudando, não só pela maior preocupação com questões ambientais, como também, em alguns casos, devido à escassez do minério e à depleção de reservas, com a consequente diminuição dos teores de minério e o aumento do volume de rejeitos a ser descartado (Hudson-Edwards *et al.*, 2011).

Seja qual for sua utilização, é imprescindível que se estabeleça uma metodologia de caracterização do material para a verificação das potencialidades de aproveitamento que devido à complexidade desses materiais tem-se associado um vasto conjunto de técnicas para a sua caracterização (Sosa, 2016).

De acordo com Santos (2018), a variabilidade das propriedades dos rejeitos está relacionada à heterogeneidade geológica natural dos bens minerais e aos vários processos

que os minérios podem ser submetidos, que vão deste um simples peneiramento até processos de alteração da físico-química da superfície das partículas.

As diversas técnicas que podem ser utilizadas, a depender do objetivo, podem ser englobadas em quatro grupos de caracterizações (Rodríguez & García, 2006):

- Físicas (tamanho e morfologia das partículas, densidade, porosidade, etc.);
- Mineralógicas (identificação das fases minerais, comportamento das fases, etc.);
- Químicas-geoquímicas (composição química elementar, pH, potencial redox, especiação, potencial de drenagem ácido de minas, hidrogeológicos, etc.);
- Geotécnicas (ensaios mecânicos, hidromecânicos, etc.);

É necessário ter em mente que para melhor compreender as diversas características e propriedades dos rejeitos, deve-se aliar as caracterizações com o conhecimento da natureza do minério bruto, das técnicas usadas na lavra, do beneficiamento ao qual foi submetido e do método de disposição final do rejeito, de forma que são fatores que fazem variar consideravelmente suas propriedades mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas.

2.3. Aspectos Gerais do Reaproveitamento de Rejeitos

Wijewickreme *et al.* (2005) definem os rejeitos de mineração como sendo essencialmente partículas de rochas trituradas ou solos derivadas do processamento do minério. Em decorrência do processo de formação das rochas - intemperismo ou erosão que alteram as rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas - as propriedades mineralógicas, granulométricas e a morfologia das partículas dos rejeitos de minério diferem, além da influência do comportamento diante diversas solicitações os quais podem ser submetidos. Essa variabilidade, muitas vezes, não permite determinar comportamentos gerais. Além das questões de gênese das rochas o processo de beneficiamento e disposição a que foram submetidos também modificam estas características.

Tarazona & Barbosa (2011) realizaram ensaios de caracterização física, adensamento, compressão triaxial e ensaios de campo com piezocone em rejeitos de minério de ferro, alumínio e ouro produzidos no Brasil. Os autores reportaram que os coeficientes de permeabilidade (k) e o coeficiente de adensamento (c_v) dos rejeitos não apresentam uma faixa de variação muito ampla. Em relação à resistência o comportamento variou devido a heterogeneidade e mineralogia destes materiais. Os resultados referentes aos ângulos de

atrito efetivo dos rejeitos de mineração de ferro, em particular, se apresentaram muito variáveis, e para os rejeitos de ouro a literatura mostra diferença significativa nos valores encontrados dependendo do método de ensaio utilizado.

Campanha (2011) analisou as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero. Os resultados indicaram que há viabilidade técnica da aplicação de rejeitos de minério de ferro em obras de construção rodoviária, observando a compatibilidade para emprego em camadas de base e sub-base, principalmente quando melhorados com cimento, tanto quanto à granulometria quanto aos valores de ISC e expansão.

Festugato *et al.* (2015) estudaram a resposta cíclica de rejeitos de minério de ouro reforçados com fibras de polipropileno, e concluíram que sob condições de cisalhamento monotônicas, a inclusão de fibras reduz a rigidez do material. Outro resultado encontrado foi que sob condições cíclicas de tensão controlada, a inserção de fibras atuam melhorando a resposta de cisalhamento do material gerando um material mais rígido, enquanto sob condições cíclicas de deformação controlada não foi observada melhora e não houve efeito sobre a rigidez do material pela adição de fibra.

Consoli *et al.* (2017) analisaram a resistência e durabilidade de misturas de rejeito de minério de ouro com cimento portland reforçado com fibras de polipropileno quantificando a perda de massa acumulada (ALM) das misturas após ciclos de molhagem e secagem. A variação da resistência à compressão não confinada foi analisada em função do índice de porosidade/cimento. Os autores concluíram com o estudo que as inclusões de fibras reduzem notavelmente a perda de massa dos espécimes após os ciclos de molhagem/secagem, sendo eficientes tanto na resistência quanto na durabilidade.

Sotomayor (2018) estudou o comportamento de rejeitos de minério de ferro e de ouro reforçados com fibras de polipropileno para aplicabilidade destes compósitos em aterros (pilhas) de rejeitos de mineração. Para o estudo foram realizados ensaios triaxiais convencionais e ensaios de cisalhamento direto. O autor conclui que a aplicabilidade das fibras de polipropileno se mostra como alternativa de reforço e melhoria do comportamento geotécnico dos rejeitos de mineração estudados.

Lara *et al.* (2018) avaliaram o comportamento mecânico de misturas de um solo laterítico com adição de rejeito de minério de ferro, por meio de ensaios triaxiais cíclicos. Pelas análises os autores concluíram que é viável a aplicação das misturas em camadas de pavimentos, especialmente como material de reforço de subleito e sub-base.

Rodrigues (2018) estudou a substituição parcial de um solo, inadequado para a

utilização em rodovias, por rejeitos de espirais do beneficiamento de minério de ferro. O autor concluiu que a adição do rejeito ao solo mostrou-se válida tanto do ponto de vista ambiental quanto do lado técnico.

Grasse *et al.* (2019) analisaram, por meio de ensaio de compressão simples, um solo de comportamento laterítico estabilizado com cal, em diferentes porcentagens com a adição do rejeito de flotação de minério de ferro. Os autores concluíram que a adição do resíduo promoveu um aumento expressivo nos valores de resistência à compressão simples das misturas.

Yunhong *et al.* (2020) discutem a durabilidade do concreto incorporado com uma mistura de rejeitos de ferro silicoso. O cimento do concreto foi substituído de 10-40%. Foram realizados testes de resistência do concreto à permeabilidade, geada e carbonatação. Conclui-se que, quando o cimento é substituído por rejeitos de ferro mecanicamente ativados em parte, o concreto ainda possui boa durabilidade para todos os ensaios realizados.

Li *et al.* (2020) examinaram o desempenho mecânico do pó de rejeitos de ferro com mistura composta de cimento e nano-argila. Os ensaios realizados foram de compressão não confinada (UCS). Os resultados mostraram que cimento e nano-argila são todos benéficos para melhorar o UCS do pó de rejeitos de ferro.

Servi *et al.* (2022) avaliaram o comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro cimentado comparando o rendimento de um ligante comercial (cimento Portland) e um ligante alternativo (cimento álcali ativado). Comumente, os cimentos hidráulicos convencionais têm uma alta energia gastos em sua produção, enquanto os ligantes álcali ativados podem ser produzidos a partir de resíduos ricos em aluminossilicatos. Os ligantes álcali ativados compostos por resíduos industriais (casca de arroz, cinzas e cal de carboneto) e soluções alcalinas (hidróxido de sódio e silicato) apresentaram potencial de uso para cimentação artificial de material, demonstrando bom desempenho mecânico. O índice de porosidade por conteúdo volumétrico de ligante (η/Biv) apresentou bom potencial para uso na previsão de resistência à compressão não confinada (q_u), resistência à tração dividida (q_t) e durabilidade por perda de massa acumulada (ALM).

2.4. Estudo da Aplicação de Polímeros em Rejeitos

Carneiro (2020) analisou o comportamento físico, mecânico, químico, ambiental e microestrutural de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno, objetivando a melhoria dos

parâmetros de resistência do rejeito de minério de ferro, para aplicação dos compósitos em obras geotécnicas. Os compósitos expressaram um bom comportamento para os ensaios estáticos e cíclicos; por meio do ensaio de compactação verificou-se uma alteração do comportamento das curvas com a inserção do polímero, em ambas dosagens estudadas (1:2 e 1:4), sendo que a dosagem de 1:2 adicionada ao rejeito de minério de ferro mostrou-se mais viável, observando-se a melhoria dos parâmetros de resistência com o aumento do tempo de cura dos compósitos.

Carneiro (2020) também analisou as curvas de cisalhamento dos compósitos rejeito-polímero onde observou-se um pico mais acentuado para as amostras com maior tempo de cura, maior tensão de confinamento e maior teor de solução polimérica, bem como não houve uma queda brusca de resistência. Este aumento observado nos parâmetros de resistência com o tempo de cura foram mais significativos para o intercepto coesivo, principalmente para a maior dosagem de solução polimérica. A resistência a tração diametral se apresentou superior para a maior dosagem de solução polimérica e todos os compósitos apresentaram melhoria dos valores de módulo de resiliência após inserção da solução polimérica.

Carneiro (2020) avaliou os compósitos com relação ao módulo de resiliência indicado para misturas asfálticas, apenas o compósito rejeito-polímero com 1:2 de dosagem polimérica apresentou-se viável para uso em estradas não pavimentadas com baixo volume de tráfego assim como os resultados do ensaio de desgaste em simulador de tráfego laboratorial (Hamburg Wheel-Track) mostram que o compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução polimérica pode ser usado como camada de revestimento em pavimentação.

Carneiro (2020) observou que todos os compósitos submetidos à dano por umidade induzida, apresentaram uma resistência superior a 50% de sua capacidade de carga. A sucção permaneceu constante ao longo de 30 dias de ensaio nos compósitos, descartando-se a melhora da resistência por ação de um possível aumento da sucção para maiores dias de cura. Percebeu também que a inserção de polímero, reduz a permeabilidade no rejeito, havendo redução dos vazios existentes e não houve expansão.

Pelas análises química e ambientais, Carneiro (2020) observou que a adição do polímero não levou a uma alteração química dos elementos presentes, o enrijecimento do material em contato ao ar, é uma reação química comum de qualquer tipo de cola sendo o oxigênio o elemento catalisador para o endurecimento do material. No contexto ambiental, pela análise do lixiviado não houve a apresentação de valores de elementos químicos em excesso que possam gerar riscos de contaminar solos e águas subterrâneas.

As análises químico-mineralógicas mostraram a ação do polímero como agente cimentante dos grãos, formando uma película nos grãos, os unindo e reduzindo assim os vazios.

Aelvan (2022) avaliou o comportamento mecânico do rejeito de minério de ouro estabilizado com uma solução polimérica, para aplicação em estruturas geotécnicas. Notou-se que há um valor máximo para o qual a inserção de polímero já não traz mais benefícios à Resistência à Compressão Simples (RCS), por isso adotou-se os teores de 6% (solução com 40% de polímero) e de 9% (solução com 60% de polímero). Os resultados dos ensaios de compressão simples no compósito RP demonstraram que melhores valores de RCS foram obtidos para o teor de 9% de polímero.

Aelvan (2022) também realizou uma análise estatística e observou que os três fatores controláveis mais significativos para esse compósito são o tempo de cura, seguido da massa específica e do teor polimérico.

Com a inserção de fibras de polipropilento, Aelvan (2022) observou uma clara melhoria no comportamento dúctil do material. Pelos resultados de compressão simples constatou que após a tensão de pico o material continua resistindo as deformações sem queda nas tensões, isto porque as fibras começam a ser solicitadas a tração e a resistir os esforços. Para estes compósitos constatou que o teor de 6% é suficiente para atingir os mesmos patamares de resistência que o teor de 9% de polímero, logo do ponto de vista prático, traçando um paralelo com os solos, seria então recomendado o uso de soluções de 40% para os rejeitos reforçados.

É importante ressaltar que não foram encontradas outras pesquisas na literatura acerca deste tópico, sendo as pesquisas de Carneiro (2020), Aelvan (2022) e esta as primeiras a estudar a inserção de polímero em rejeitos de mineração.

2.5. Parâmetros Chave

O estudo de Parâmetros Chave consiste na tentativa de encontrar uma correlação matemática entre fatores que influenciam na resistência de solos artificialmente cimentados com valores de resistência obtidos em ensaios como RCS, cisalhamento direto e triaxial. O método consiste em executar uma série de ensaios de resistência, seja compressão simples, cisalhamento direto ou compressão triaxial, variando os fatores que podem influenciar na resistência, como índice de vazios, teor de umidade, condições de compactação e quantidade de cimentante adicionado ao solo. Estas correlações matemáticas são comumente apresentadas na forma de curvas.

Consoli *et al.* (2007) com o objetivo de verificar o comportamento tensão-deformação

de compósitos de solo residual de arenito com cimento Portland com mesma relação vazios/cimento, realizaram seis ensaios triaxiais não-drenados com tensões de confinamento de 20 kPa e compararam com a curva de ajuste dos resultados de resistência à compressão simples obtidos por Foppa (2005). Foram adotados três valores de $\eta/(C_{iv})$ 0,28 (relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustados por um fator 0,28) para avaliação (20, 25 e 35), como é apresentado na Figura 2.1. Os autores concluíram que a relação vazios/cimento também fornece bons resultados para a previsão da tensão desvio dos ensaios triaxiais não-drenados. Perceberam também, que a curva de ajuste dos ensaios triaxiais ficou próxima, porém, um pouco acima da curva de ajuste dos ensaios de compressão simples, devido ao efeito do confinamento.

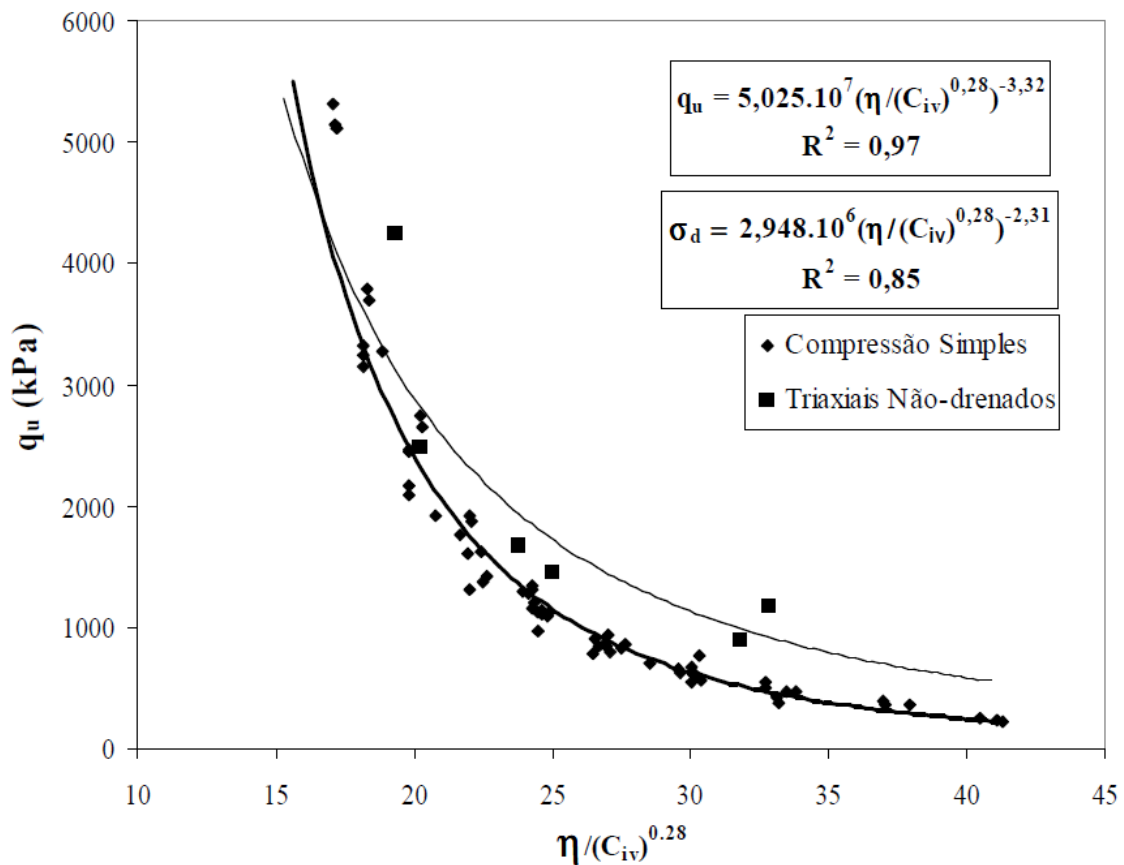


Figura 2.1 - Previsão da tensão desvio por meio da relação vazios/cimento (Consoli *et al.*, 2007)

Filho *et al.* (2021) testaram um parâmetro chave para prever o comportamento de um solo dispersivo, classificado como argila de baixa compressibilidade na Carta de Casagrande, estabilizado com um ligante a base de vidro moído e pasta de cal. Os parâmetros analisados foram a resistência à compressão simples em relação à porosidade

e teor volumétrico de ligante. Os resultados apresentaram R^2 de 0,81 para 7 dias de tempo de cura e 0,80 para 28 dias de cura conforme a Figura 2.2.

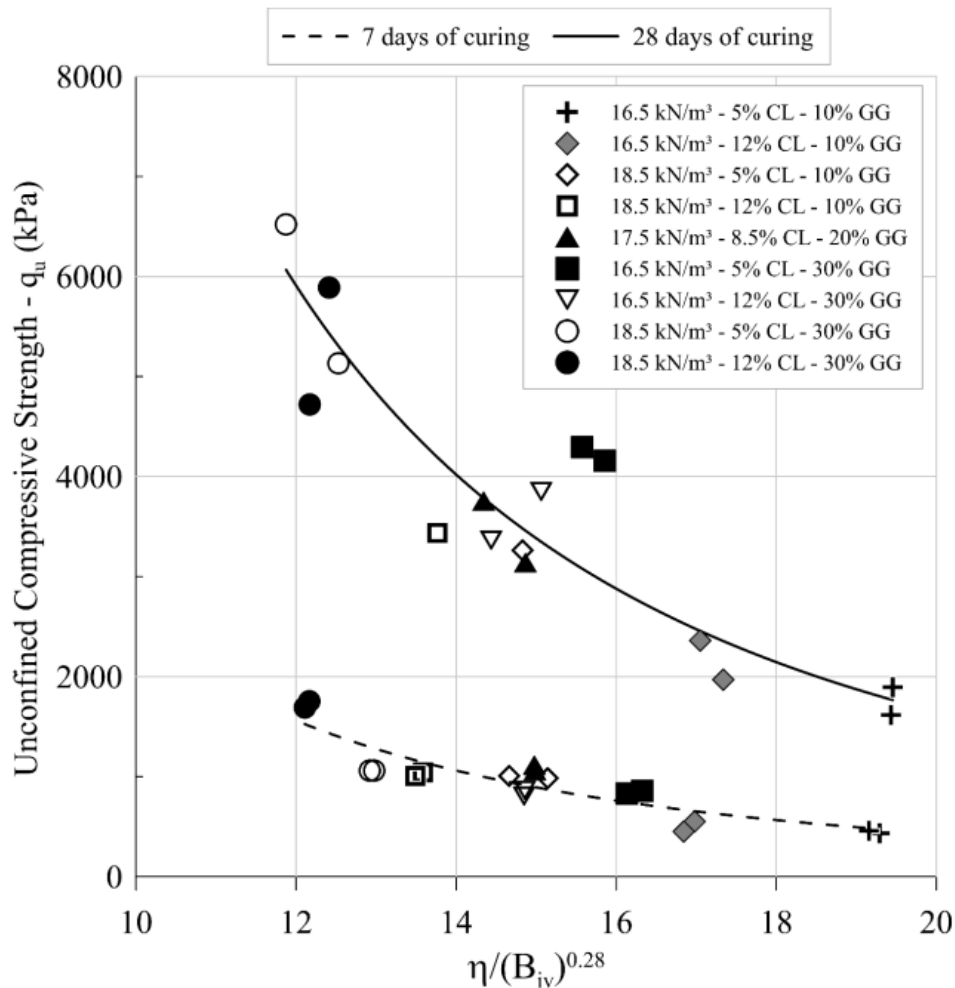


Figura 2.2 – Resultados de Tensão de Compressão Não Confinada (Filho *et al.*, 2021)

Alelvan (2022) se propôs a avaliar a existência de um parâmetro chave que controle o comportamento dos compósitos de resíduo-polímero, resíduo-polímero-cal e resíduo-polímero-fibra a partir dos resultados mecânicos, para isso considerou a razão porosidade pelo teor polimérico. Alelvan (2022) concluiu que há uma curva única para obter os valores de resistência à compressão simples para os compósitos de resíduo-polímero, com um R^2 de 0,96 para o tempo de cura de 28 dias. Relacionou a mesma razão com os valores absolutos da tensão normal subtraída da tensão cisalhante de pico, com um R^2 de 0,80, indicando uma boa aproximação dos dados. Para os compósitos de resíduo-polímero-cal as mesmas relações puderam ser demonstradas, a um R^2 de 0,64 para a curva normalizada para os períodos de cura de 7 e 28 dias. Para os compósitos de resíduo-polímero-fibra

sendo que a normalização só se mostrou eficiente para o maior tempo de cura.

Consoli *et al.* (2022) avaliaram a existência de um parâmetro chave que preveja o comportamento de uma mistura de areia com um cimento álcali ativado para aplicação em estabilizações de construções de terra batida. Os parâmetros correlatados foram o módulo de cisalhamento inicial com a porosidade e o teor volumétrico de ligante, resistência a compressão simples também com a porosidade e o teor volumétrico de ligante. Todos os resultados apresentaram R^2 maiores que 0,90 para diferentes molalidades (0 e 3m) e tempos de cura (7 e 28 dias).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Nesta pesquisa investiga-se o compósito formado por um rejeito de minério de ferro e uma solução polimérica composta por água e um copolímero acrílico-estirenado, a fim de entender o comportamento desse material para futura aplicação em estruturas geotécnicas.

3.1.1. Rejeito de Minério de Ferro

O rejeito de minério de ferro é proveniente da lavra da Barragem Maravilhas II localizada na Mina do Pico na Cidade de Itabirito, Minas Gerais. Maravilhas II é uma das 13 barragens que integra o Complexo Vargem Grande, que é formado ainda por seis minas, oito usinas e três terminais de carga, sendo que quatro de suas barragens são de rejeitos; este complexo é operado pela Vale.

É uma das principais barragens do Complexo que, atualmente, opera apenas 1 milhão de toneladas por ano, embora sua capacidade total seja de 42,9 milhões de toneladas por ano. A Barragem Maravilhas II é do tipo jusante implantada em 1994, abriga um volume de 94 milhões de metros cúbicos, tem uma altura de 97,9 metros e conta, hoje, com 109 instrumentos de monitoramento (CMBH, 2019).

3.1.2. Polímero

Na pesquisa será utilizado o material TERRAFIX 11 (CAS: 25035-69-2), que consiste em um copolímero acrílico-estirenado, obtido aleatoriamente, sendo uma emulsão aquosa de caráter aniônico, produzido e distribuído pela empresa Waterflows. Possui pH 8,0–9,0, densidade de 0,98– 1,04 gramas por centímetro cúbico. Além, de ser totalmente solúvel em água. De acordo com o fabricante o produto pode ser usado como selante (reduzidor de poeira) e estabilizante do solo. Devido a questões de sigilo comercial e industrial, a composição quali-quantitativa não foi fornecida pelo fabricante.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização Física

Os ensaios realizados para se avaliar algumas das propriedades físicas do rejeito de

minério de ferro têm suas metodologias descritas a seguir.

3.2.1.1. Massa Específica dos Grãos

A determinação da massa específica dos grãos foi realizada pelo equipamento pentapicnômetro modelo PENTAPYC 5200e da “Quantachrome Instruments”, conforme estabelecido pela D5550 “Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer” (ASTM, 2014).

3.2.1.2. Análise Granulométrica

Os ensaios foram realizados conforme a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016-a), com e sem defloculante, visto que não existem normativas específicas para rejeitos. Apesar disso, considera-se que seja uma boa aproximação realizar este tipo de ensaios para classificar a granulometria das partículas de rejeito. Estes ensaios de análise granulométrica foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

3.2.2. Caracterização Mecânica

Para avaliar as características mecânicas de resistência do rejeito de minério de ferro e do compósito rejeito-polímero, foram realizados os ensaios descritos a seguir.

3.2.2.1. Compactação

Foram realizados ensaios de compactação Proctor Normal de acordo com as normas NBR 7182 (ABNT, 2016-b) e de compactação Mini-MCT de acordo com a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994) para o rejeito de minério de ferro e o compósito rejeito-polímero.

Durante este processo foi percebido que a adição de água ao rejeito puro gera um tipo de lama que torna extremamente difícil a trabalhabilidade deste material. Ao desferir um golpe com o soquete no material, ele vaza pelos espaços entre o disco espaçador e o molde tornando impossível o trabalho de padronizar os corpos de prova com diferentes teores de umidade, logo não havendo possibilidade de aplicar as metodologias das normas de compactação. Na Figura 3.1 se apresenta uma tentativa de compactação do rejeito puro pelo método Mini-MCV, os corpos de prova possuem 15%, 17%, 19%, 21%, 23% de teor de umidade ordenados da esquerda para a direita.



Figura 3.1 – Tentativa de Compactação

Conforme se vê na imagem acima, quanto maior o teor de umidade adicionado aos corpos de prova, mais eles perdem material, ficando menores e inviabilizando a aplicação da norma para se obter uma curva de compactação. O mesmo se observou para os compósitos de rejeito-polímero e para o método Proctor.

Ainda assim, foi possível compactar 5 corpos de prova ensacando os cilindros para diminuir o vazamento de material e conseguir se obter uma curva de compactação para o rejeito puro. Entretanto, ao retirar os corpos de prova do cilindro, desestabilizam-se, tornando impossível ensaiar compressão simples nestas amostras.

Dito isso, fixou-se o valor de 15% de teor de umidade, que foi teor que se manteve mais estável e possível de se ensaiar e manter o padrão de tamanho e volume mais próximo do especificado em norma, para determinação das melhores dosagens de polímero nos compósitos, passo descrito no tópico a seguir.

3.2.2.2. Ensaio de Dosagem

Para aferir as melhores dosagens de polímero para este rejeito de minério de ferro, ou seja, aquelas que conferem melhores propriedades mecânicas de resistência, foram moldadas amostras de rejeito-polímero em diferentes porcentagens de polímero, sendo elas de: 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%.

A porcentagem de polímero é calculada a partir da porcentagem de água adicionada no rejeito, logo a porcentagem real de polímero adicionada no compósito foi calculada proporcionalmente ao teor de 15% de umidade, que foi o teor adotado para o estudo. Sendo assim as porcentagens reais são dadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Porcentagens Reais de Teor de Polímero

Porcentagem Relativa (%)	Porcentagem Real (%)
10	1,5
20	3,0
30	4,5
40	6,0
50	7,5
60	9,0

Desta forma, foram moldadas amostras de 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro, em triplicada, para cada porcentagem, estas amostras passaram por um processo de cura ao ar por 14 dias e então foram rompidas conforme a NBR 12770 (ABNT, 1992) para ensaios de Compressão Simples.

Não obstante seja observado pelas autoras Silva (2020), Carneiro (2020) e Alelvan (2022), que trabalharam com o mesmo polímero, que o tempo ideal de cura seja de 28 dias, para este ensaio de dosagem foi adotado 14 dias levando em consideração que é um tempo em que já é possível notar ganhos significativos de resistência. Tendo em vista que o propósito desse ensaio é identificar quais as melhores dosagens para este rejeito de minério de ferro, em específico, a fim de aplicá-las nos demais ensaios de caracterização mecânica, os quais foram feitos com o devido tempo de cura de 28 dias.

3.2.2.3. Ensaios de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados conforme os métodos estabelecidos pela NBR 12770 (ABNT, 1992). Foram moldados corpos de prova de 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro com teor de umidade de 15%, para as massas específicas de 2,2 g/cm³, 2,3 g/cm³ e 2,4 g/cm³ tanto para o rejeito puro quanto para os compósitos de rejeito-polímero, nos teores de polímero de 30% e 40%, com tempo de cura de 28 dias.

3.2.2.4. Ensaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram desenvolvidos com base na norma D3080/D3080M-11 (ASTM, 2011) e nas colocações propostas por Head (1994). Foram moldados corpos de prova de 2,4 centímetros de altura por 6 cm de largura e 6 cm de

comprimento com teor de umidade de 15%, para as massas específicas de 2,2 g/cm³, 2,3 g/cm³ e 2,4 g/cm³ tanto para o rejeito puro quanto para os compósitos de rejeito-polímero, nos teores de polímero de 30% e 40%, com tempo de cura de 28 dias.

3.2.3. Caracterização Hidráulica - Ensaio de Permeabilidade

A caracterização hidráulica foi realizada para porcentagem de polímero que demonstrou melhores resultados mecânicos, ou seja, o compósito de rejeito com 40% de polímero com massas específicas de 2,2 g/cm³, 2,3 g/cm³ e 2,4 g/cm³ e tempo de cura de 28 dias. Foram feitos também ensaios em rejeito puro com as três massas específicas a fins de comparação entre uma amostra com e uma sem polímero e a influência desse na permeabilidade.

A determinação do coeficiente de permeabilidade do rejeito e do compósito rejeito-polímero foi realizado de acordo com a norma NBR 14545 (ABNT, 2021) que especifica a metodologia para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Na Figura 3.2 estão representados os equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

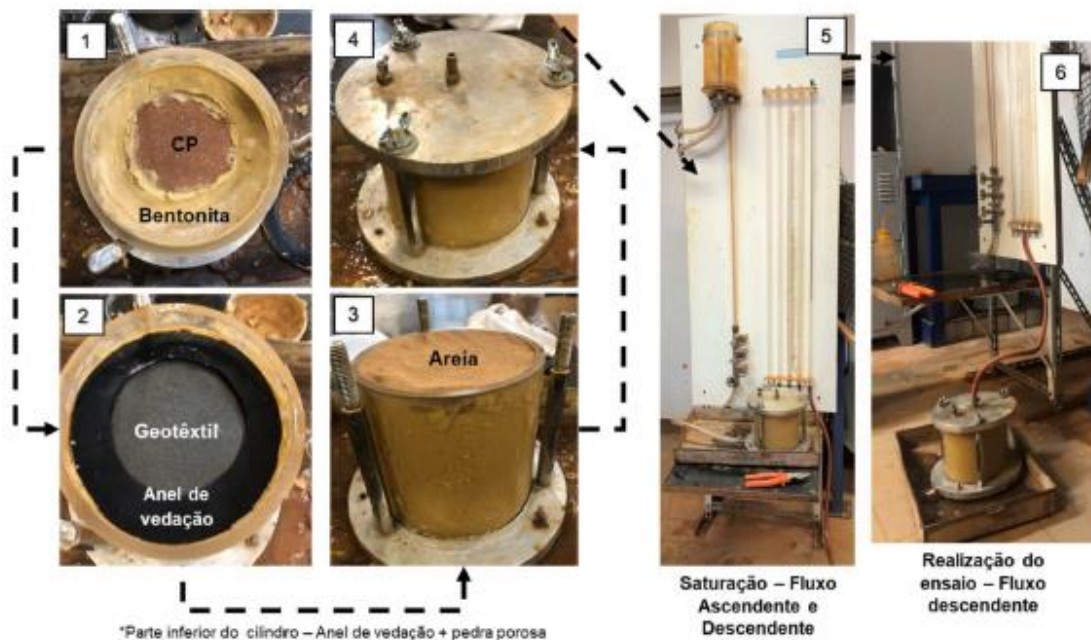


Figura 3.2 - Materiais e métodos para a determinação do coeficiente de permeabilidade dos compósitos (Silva, 2020).

3.2.4. Caracterização Mineralógica - Difração de Raio-X (DRX)

A caracterização mineralógica foi feita para o rejeito puro, o rejeito com 30% de polímero e com 40% de polímero.

Os ensaios de Difração de Raio-X (DRX) foram feitos no Laboratório de Difractometria de Raio-X no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG - UnB). O equipamento utilizado foi o X-Ray Diffractometer Ultima IV da Rigaku com o objetivo de identificar os minerais presentes nas amostras de rejeito puro, rejeito com 30% de polímero e rejeito com 40% de polímero por meio da caracterização de sua estrutura cristalina.

DRX é um dos principais métodos para a caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Para utilizar esta técnica, as amostras de rejeito puro e dos compósitos passantes na #200 foram secas na estufa a 105°C. A análise foi realizada num difractômetro Rigaku, sob uma tensão de 35 kV e 15 mA. As experiências foram realizadas considerando uma amplitude angular de 2θ , intervalo de medição entre 2-100°, e velocidade de 0,05°/min. A identificação mineralógica foi realizada com as normas de referência da base de dados de software JADE 9.0.

3.2.5. Caracterização Microestrutural

Para caracterização microestrutural foram realizados os ensaios de microtomografia computadorizada (microCT) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.5.1. Microtomografia Computadorizada (microCT)

O ensaio de microtomografia computadorizada foi realizada no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas (LPFR) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. O equipamento utilizado foi o Microtomógrafo SkyScan 1172 da Bruker (Figura 3.3).

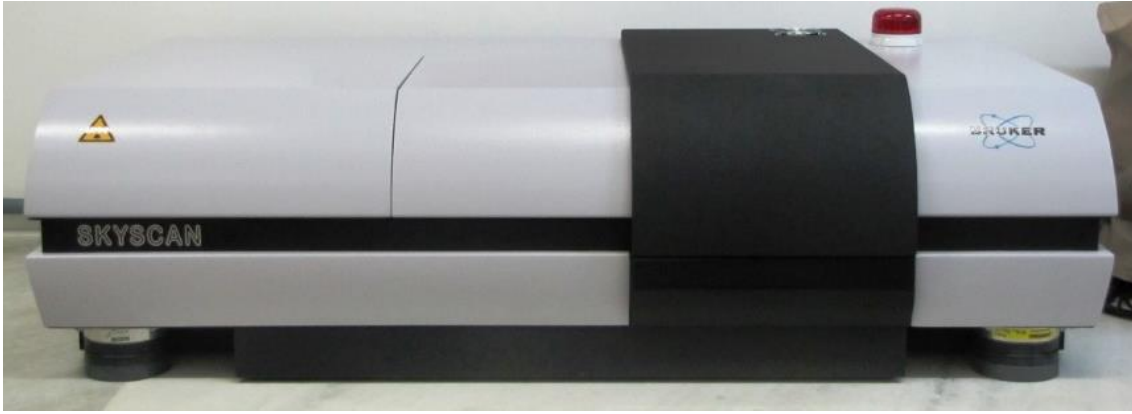


Figura 3.3 - Microtomógrafo SkyScan 1172 – LPRF/UnB.

Foram feitas amostras de rejeito puro e de rejeito + 40% de polímero nas três densidades estudadas. As amostras preparadas para o ensaio tinham dimensões aproximadas de 3 cm de altura por 1,5 cm de diâmetro. Para descontar os efeitos de borda, a aquisição dos dados foi feita em um volume de interesse (VOI) de 1,25 cm de diâmetro por 1,25 cm de altura conforme a Figura 3.4.

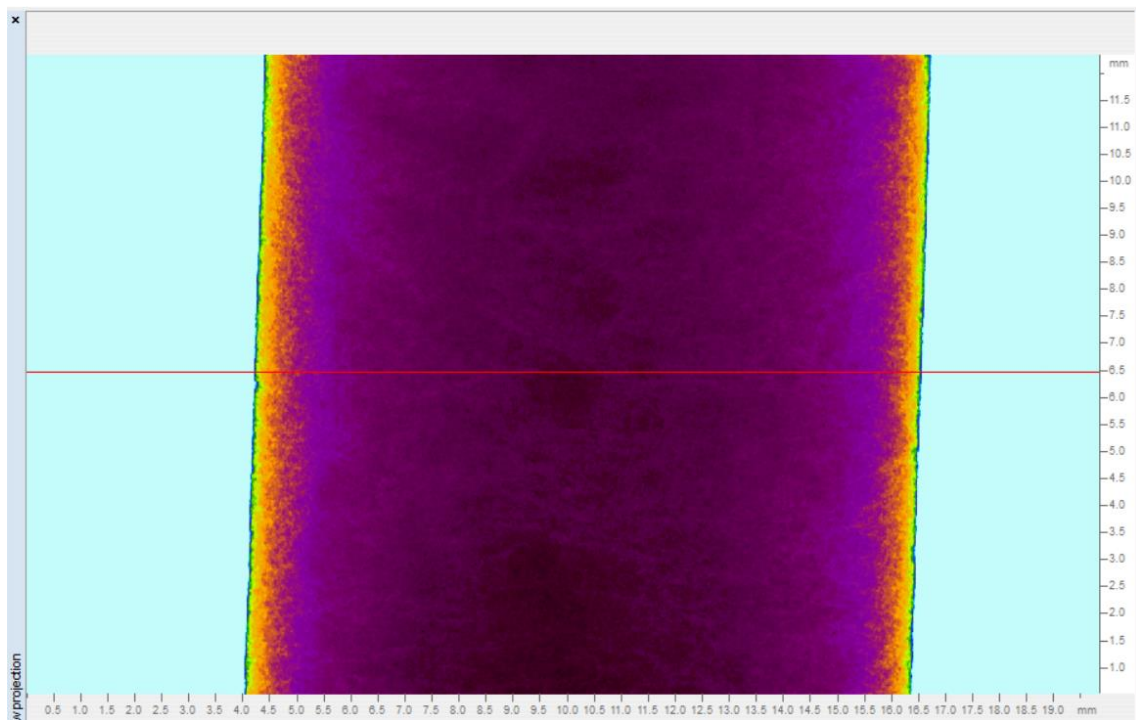


Figura 3.4 – Volume de Interesse

3.2.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV foi realizado no Laboratório de Microscopia e Microanálise (LMM) do

Instituto de Ciências Biológicas (IB) no microscópio do modelo JEOL JSM-7001F apresentado na Figura 3.5. É um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (FE-SEM) com um canhão de elétrons quente (Schottky) otimizado para aplicações analíticas e está equipado com dois detectores de raios X: um sistema EDS convencional e um sistema WDS de alta resolução espectral que é ideal para observar raios X de baixa energia.

Foram avaliadas uma amostra de Rejeito Puro e três amostras de Rejeito + Polímero 40% em três densidades (2,2, 2,3 e 2,4 g/cm³).



Figura 3.5 – Microscópio Eletrônico de Varredura

3.2.6. Caracterização Química

A caracterização química se baseou no ensaio de Espectrometria de Florescência de Raio-X conforme descrito a seguir.

3.2.6.1. Espectrometria de Florescência de Raio-X (XRF/EDX)

A técnica de fluorescência de raios X é capaz de realizar rapidamente uma avaliação qualitativa-quantitativa das espécies químicas presentes na amostra, cuja vantagem é o baixo custo operacional e a fácil preparação das amostras. EDX/XRF é uma técnica analítica baseada na medição das intensidades características dos raios X emitidos pelos elementos que constituem a amostra. A detecção dos raios X emitidos é realizada por um detector de silício que gera um espectro de intensidade em função da energia.

O teste foi realizado num espectrómetro EDX 720HS modelo Shimadzu, que analisa a gama de elementos desde o sódio (11Na) ao urânio (92U), com tubos de raios X com ânodo de ródio (Rh).

As amostras analisadas eram cilíndricas, com 3 cm de altura por 1,5 cm de diâmetro, e compactadas de rejeito com 40% de polímero em diferentes densidades (2,2, 2,3, e 2,4 g/cm³) e uma amostra de rejeito puro não compactado passante na peneira #200, seco em estufa a 105°C durante 24 horas antes da análise.

3.2.6.2. Espectroscopia de Raio-X por Dispersão em Energia (EDS)

Espectroscopia de raio-X por dispersão em energia (EDS) é uma técnica analítica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra. É um ensaio que se baseia na investigação de uma amostra através de interações entre partículas ou radiação eletromagnética e matéria, analisando os raios X emitidos pela matéria em resposta à incidência de partículas carregadas. Suas capacidades de caracterização são devidas em grande parte ao princípio fundamental que cada elemento tem uma estrutura atômica única, de modo que os raios X emitidos são característicos desta estrutura, que identificam o elemento.

Esse ensaio foi realizado no microscópio do MEV, pois esse possui um detector de raio-X acoplado a ele que permite a realização desta análise, com uma amostra compactada de rejeito com 40% de polímero e uma amostra de rejeito puro, ambas de 3 centímetros de altura por 1,5 centímetros de diâmetro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui estão apresentados os resultados dos ensaios descritos na metodologia e estão organizados da mesma maneira em que foram apresentadas.

4.1. Caracterização Física

4.1.1. Massa Específica dos Grãos

As partículas de ferro, por si só, apresentam massa específica dos grãos em torno de 5,25 g/cm³, enquanto os grãos de quartzo são caracterizados por possuírem uma massa específica em torno de 2,65 g/cm³. Portanto, os rejeitos de minério de ferro, que são compostos basicamente de partículas de quartzo, hematita e outros minerais, tendem a apresentar uma faixa de variação da densidade dos grãos entre estes dois valores (Pereira, 2005).

A massa específica dos grãos do rejeito de minério de ferro encontrada foi de 3,23 g/cm³. Na Tabela 4.1 estão apresentados valores de massa específica dos grãos de rejeito de minério de ferro encontrados em literatura.

Tabela 4.1 – Valores de Massa Específica dos Grãos (modificado – Sotomayor, 2018)

Referência	ρ_s (g/cm ³)
Rezende (2013)	3,01
Tarazona (2015)	2,90*
Telles (2017)	2,85
Sotomayor (2018)	2,89

**média dos valores*

Um dos fatores que pode explicar a massa específica dos grãos do rejeito estudado nesta pesquisa ser ligeiramente maior que as encontradas em literatura é de que este rejeito é ultrafino, o que leva a uma maior quantidade de partículas de minerais fisicamente pesados, como a hematita, por volume quando comparado aos demais.

4.1.2. Análise Granulométrica

Com base na análise granulométrica e na Figura 4.1 é possível notar que o rejeito de ferro é composto em sua maior parte por uma fração que corresponde à areia, 92,7%, seguida por uma fração pequena correspondente ao silte, 5,8% e uma fração menor

correspondente à argila, 1,5%.

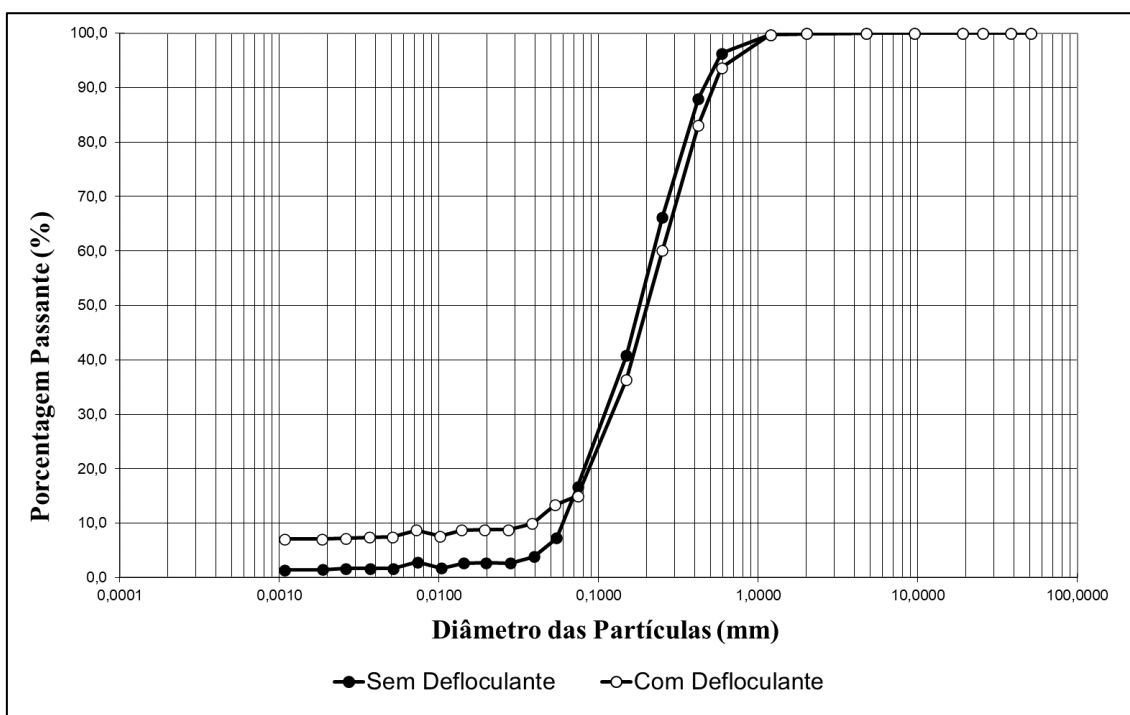


Figura 4.1 – Curva Granulométrica do Rejeito de Ferro

Na Tabela 4.2 estão apresentados dados obtidos a partir da curva granulométrica. Com esses dados é possível classificar o rejeito de minério de ferro como uma areia bem graduada e uniforme.

Tabela 4.2 – Dados Obtidos a Partir da Curva Granulométrica

D_{60}	0,25
D_{30}	0,11
D_{10}	0,04
C_c	1,21
C_u	6,25

Apesar das análises classificarem este material como areia, ele pouco ou nada pode ter seu comportamento comparado a isto. Quando seco ele se assemelha a uma areia fina tátil visualmente, mas quando em contato com a água este material apresenta um comportamento que se assemelha ao de um solo argiloso, apresentando uma coesão aparente. É importante lembrar que o material em estudo é um rejeito de ferro e não um solo, do ponto de vista granulométrico é aceitável estabelecer um paralelo com o tamanho

das partículas, porém é preciso cautela ao extrapolar as questões relacionadas ao comportamento que pode ser induzida pela classificação granulométrica.

4.2. Caracterização Mecânica

4.2.1. Compactação

Na Figura 4.2 estão representados os resultados dos ensaios de compactação. Conforme dito na metodologia, os ensaios foram bastante trabalhosos devido ao comportamento do rejeito em contato com água. O peso seco específico máximo obtido foi de 23,4 kN/m³ com umidade ótima de aproximadamente 19%.

Analisando a curva é possível notar que seu formato é muito semelhante ao de uma curva de solo argiloso plástico, o que novamente demonstra que os resultados se mostram conflitantes quando se aplica uma metodologia baseada no estudo de solos para os rejeitos. Uma explicação para a divergência entre os resultados de granulometria e compactação é que o rejeito de ferro não sofreu os processos de intemperismo como os solos argilosos plásticos costumam passar, o rejeito de ferro é um subproduto do processo de beneficiamento do rejeito que passa por processos físicos e químicos significativos que podem alterar o comportamento do material.

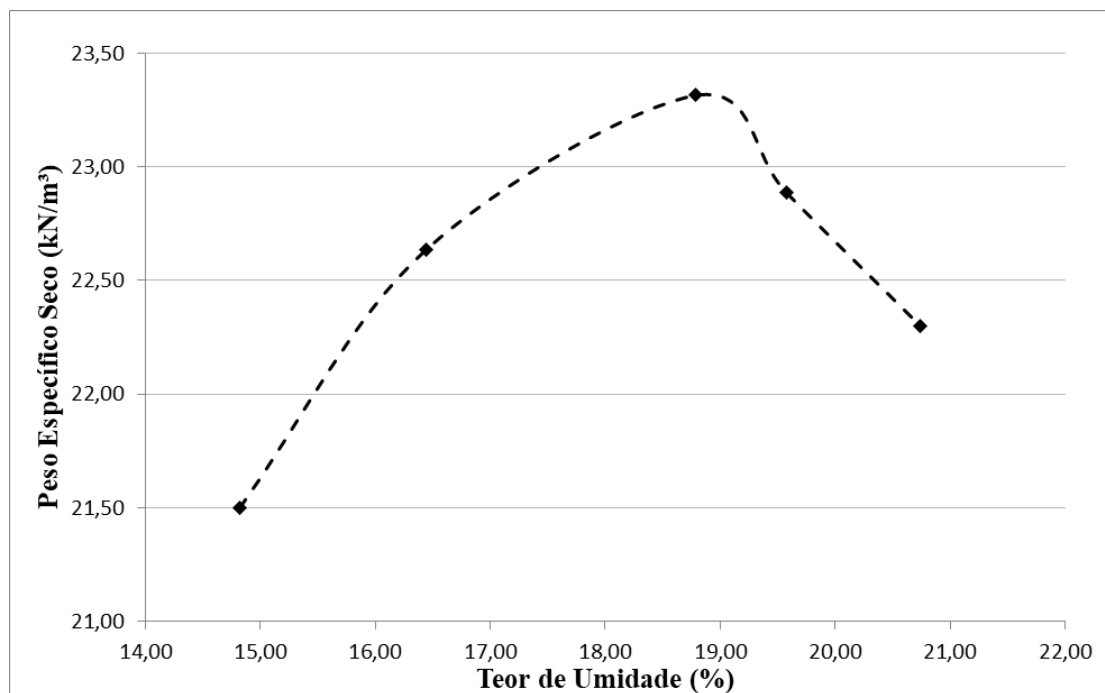


Figura 4.2 – Curva de Compactação

Na Figura 4.3 apresenta-se os resultados de índice de vazios correspondente à curva

de compactação. O peso específico seco máximo apresenta o menor índice de vazios que é de 0,13.

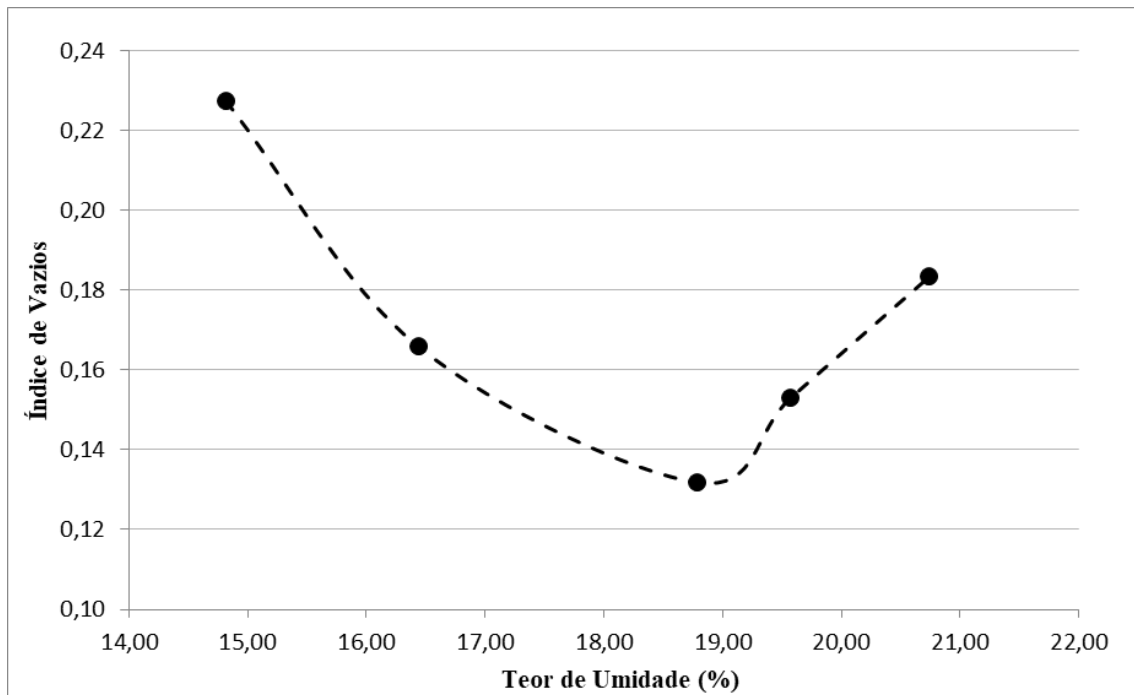


Figura 4.3 – Índice de Vazios do Rejeito de Ferro

4.2.2. Ensaio de Dosagem

Na Figura 4.4 estão representados os resultados dos ensaios de compressão simples para as diferentes dosagens de polímero aplicadas após o processo de cura ao ar por 14 dias. Foram ensaiados, também, corpos de prova de rejeito puro e com eles não foi possível obter resultados, dado que as células de carga disponíveis no laboratório não foram capazes de aferir a tensão destas amostras.

A partir das curvas de Tensão-Deformação apresentadas na Figura 4.4, é evidenciado que a adição de polímero concede uma maior resistência à compressão uniaxial para o rejeito, uma vez que torna possível aferir a resistência do “Rejeito + 10% Polímero”. Progressivamente, o compósito “Rejeito + 20% Polímero” apresenta maior resistência que o anterior, e assim ocorre até o compósito “Rejeito + 40% Polímero” que apresenta a maior resistência dentre as dosagens testadas. Em sequência, os compósitos “Rejeito + 50% Polímero” e “Rejeito + 60% Polímero” apresentaram resistências decrescentes.

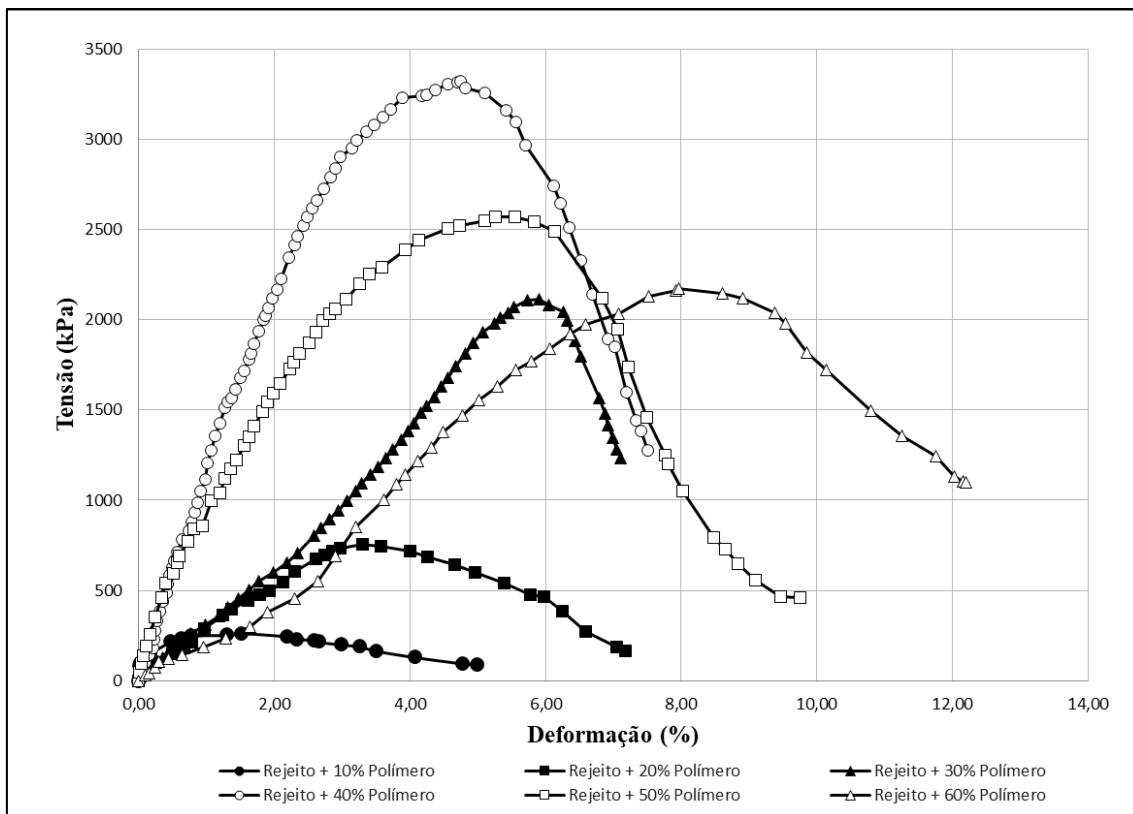


Figura 4.4 – Compressão Simples em Diferentes Dosagens de Polímero

A par destes resultados, fica evidente a eficiência da adição de polímero a este rejeito de minério de ferro, visto que garante um ganho de resistência significativo para o material.

Além de um ganho expressivo na resistência de pico do material, este apresentou uma boa ductilidade quando comparado com outros compósitos rejeito-polímero, tendo em vista que o pico se deu em deformações entre 4% e 8%, enquanto os estudados por Carneiro (2020) e Alelvan (2022) apresentaram seus picos em deformações entre 1% e 4%. Apesar disto, os compósitos estudados nesta pesquisa não apresentaram uma boa resistência pós-pico, com uma queda abrupta após a ruptura, assim como observado também por Carneiro (2020) e Alelvan (2022).

Na Tabela 4.3 estão expressos os valores de tensão de pico para cada compósito assim como a porcentagem de ganho de resistência comparada ao primeiro compósito.

Tabela 4.3 – Tensão de Pico dos Compósitos

Compósito	Tensão de Pico (kPa)	% de Ganho (Comparado ao primeiro compósito)
Rejeito + 10% Polímero	263	---
Rejeito + 20% Polímero	753	286
Rejeito + 30% Polímero	2114	804
Rejeito + 40% Polímero	3324	1264
Rejeito + 50% Polímero	2574	979
Rejeito + 60% Polímero	2175	827

A partir das curvas de Tensão-Deformação e da Tabela 4.3, é notório que o compósito “Rejeito + 40% Polímero” apresentou o maior ganho de resistência à compressão não confinada, sendo a melhor dosagem estudada nesta pesquisa. Apesar disto, o compósito “Rejeito + 30% Polímero” também pode ser considerado uma boa dosagem, tendo em mente que apresenta um ganho de resistência bastante expressivo com a vantagem de ser uma quantidade menor de polímero. Do ponto de vista de aplicação em campo esta redução na quantidade de polímero pode representar economia no custo total de uma obra geotécnica, viabilizando ainda mais a sua aplicação.

Na Figura 4.5 são apresentados os corpos de prova ensaiados e seus planos de ruptura. É visível que os corpos de prova (a) e (b) apresentam ruptura total, o corpo de prova (c) apresenta um ângulo do plano de ruptura de aproximadamente 90 graus, (d), (e) e (f) apresentam ângulos do plano de ruptura de aproximadamente de 45 graus. Embora os corpos de prova não tenham demonstrado resistência pós-pico, não foi possível separar os lados dos corpos de prova (c), (d), (e) e (f) com as mãos, apresentando uma forte estrutura coesiva.



(a) “Rejeito + 10% Polímero” após ruptura



(b) “Rejeito + 20% Polímero” após ruptura



(c) “Rejeito + 30% Polímero” após ruptura



(d) “Rejeito + 40% Polímero” após ruptura



(e) “Rejeito + 50% Polímero” após ruptura



(f) “Rejeito + 60% Polímero” após ruptura

Figura 4.5 – Corpos de Prova Após Ruptura

4.2.3. Ensaio de Compressão Simples

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os resultados dos ensaios de compressão simples para as dosagens de polímero de 40% e 30% respectivamente. Os ensaios foram realizados após 28 dias de tempo de cura ao ar para três diferentes densidades e os resultados mostram que, conforme já evidenciado no ensaio de dosagem, os compósitos com 40% de polímero apresentaram maiores resistências à compressão que os com 30% de polímero. É importante destacar também que conforme a densidade aumenta, a resistência também aumenta, o que já se era esperado dado que é o comportamento previsto na mecânica dos solos e fica evidente que se repete para os rejeitos.

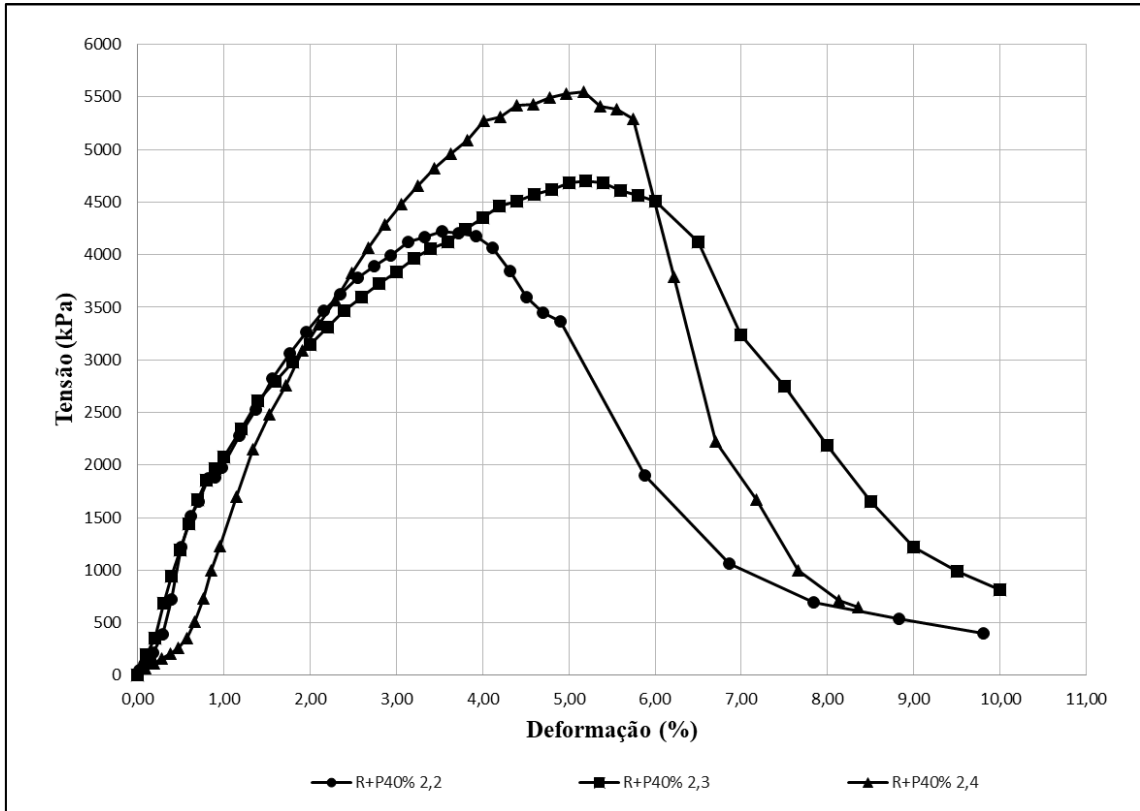


Figura 4.6 – Curvas de Tensão-Deformação para Compósitos com 40% de Polímero

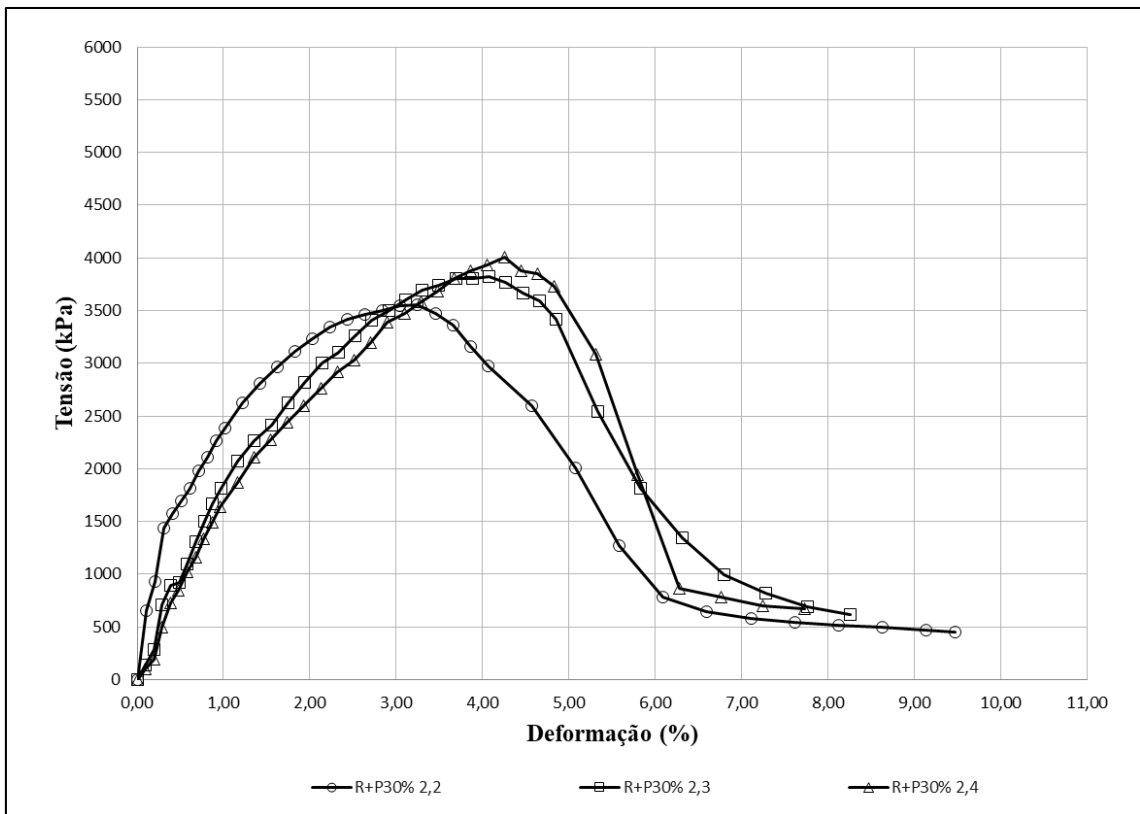


Figura 4.7 – Curvas de Tensão-Deformação para Compósitos com 30% de Polímero

Ainda sobre as Figuras 4.6 e 4.7, é notável que com o aumento da densidade e porcentagem de polímero, os compósitos apresentam uma tendência em ter suas tensões de pico em maiores valores de deformação, o que pode indicar que a ductilidade destes compósitos está ligada tanto à porcentagem de polímero quanto ao grau de compactação.

Na Tabela 4.4 apresenta-se os valores de tensão de pico para as duas porcentagens de polímero estudadas nas diferentes densidades avaliadas. Os dados apresentados na tabela reafirmam o que já fora dito anteriormente sobre a resistência dos compósitos.

Tabela 4.4 – Tensão de Pico para os Compósitos

Compósito	Tensão de Pico (kPa)
R+P30%_2.2	3659
R+P30%_2.3	3818
R+P30%_2.4	4008
R+P40%_2.2	4226
R+P40%_2.3	4707
R+P40%_2.4	5547

4.2.4. Ensaios de Cisalhamento Direto

4.2.4.1. Rejeito Puro

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o rejeito puro, as amostras foram moldadas com a umidade de 15% e ensaiadas em quatro tensões de confinamento diferentes: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Na Figura 4.8 se tem os resultados para as amostras na densidade de 2,2 g/cm³, na Figura 4.9 para as amostras na densidade de 2,3 g/cm³ e na Figura 4.10 se tem os resultados para as amostras na densidade de 2,4 g/cm³.

Os resultados apontam que o rejeito puro apresenta maiores tensões de pico conforme se aumenta a densidade e a tensão confinante, mas não apresenta uma tensão pós-pico significativa para nenhum caso. O comportamento das curvas deste rejeito se assemelha bastante com o de um solo argiloso, em que para baixas tensões de confinamento não apresentam um pico expressivo e para altas tensões de confinamento apresentam um pico expressivo e depois uma queda; diferentemente das areias que tem a tendência de crescer até atingir um patamar, onde a tensão cisalhante se mantém constante.

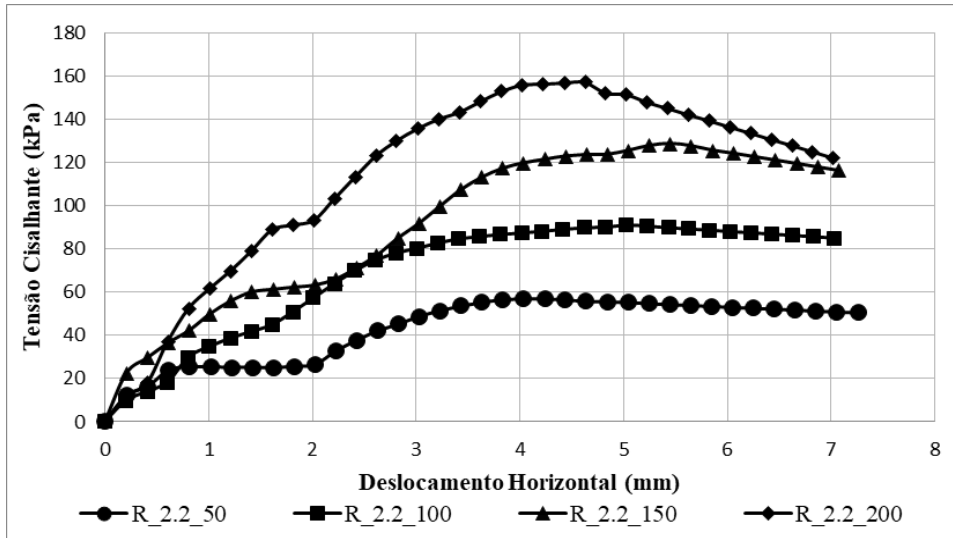


Figura 4.8 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal do Rejeito 2,2 g/cm³

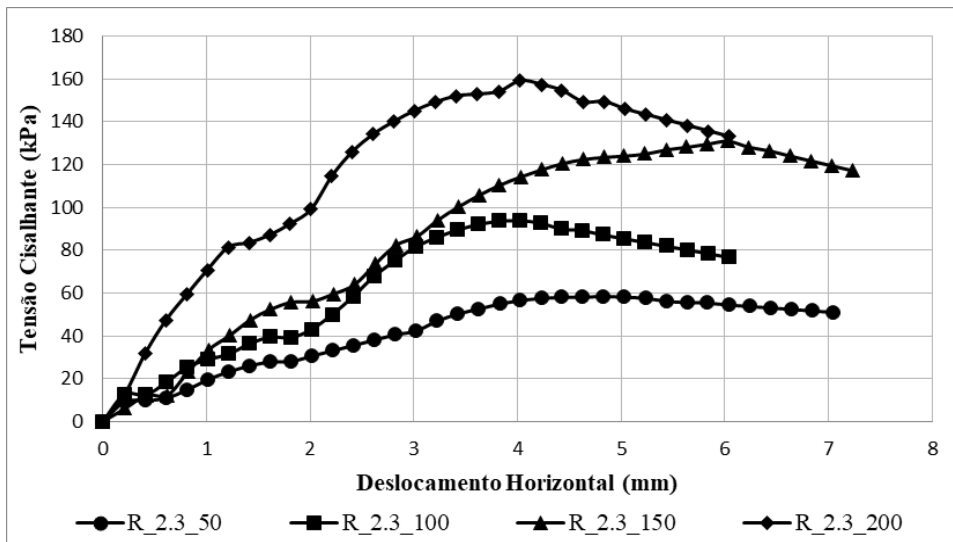


Figura 4.9 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal do Rejeito 2,3 g/cm³

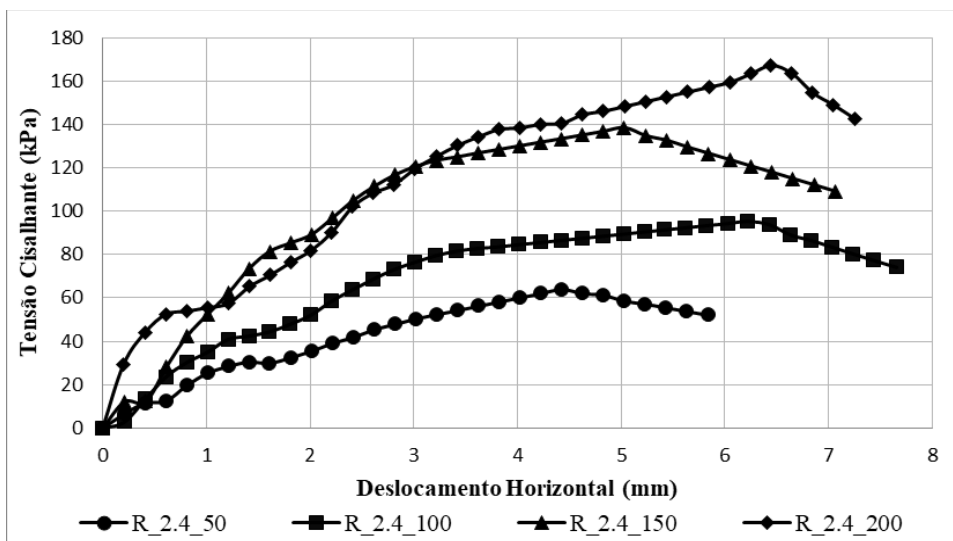


Figura 4.10 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal do Rejeito 2,4 g/cm³

Na Figura 4.11 são representadas as envoltórias de ruptura para o rejeito puro nas três densidades estudadas. É possível notar que as envoltórias se apresentam praticamente paralelas umas as outras, o que indica uma variação pequena no ângulo de atrito e também estão quase sobrepostas, que denotam uma baixa variação na coesão. Estas informações são evidenciadas na Tabela 4.5, além de apresentar o fator de ajuste R^2 das retas.

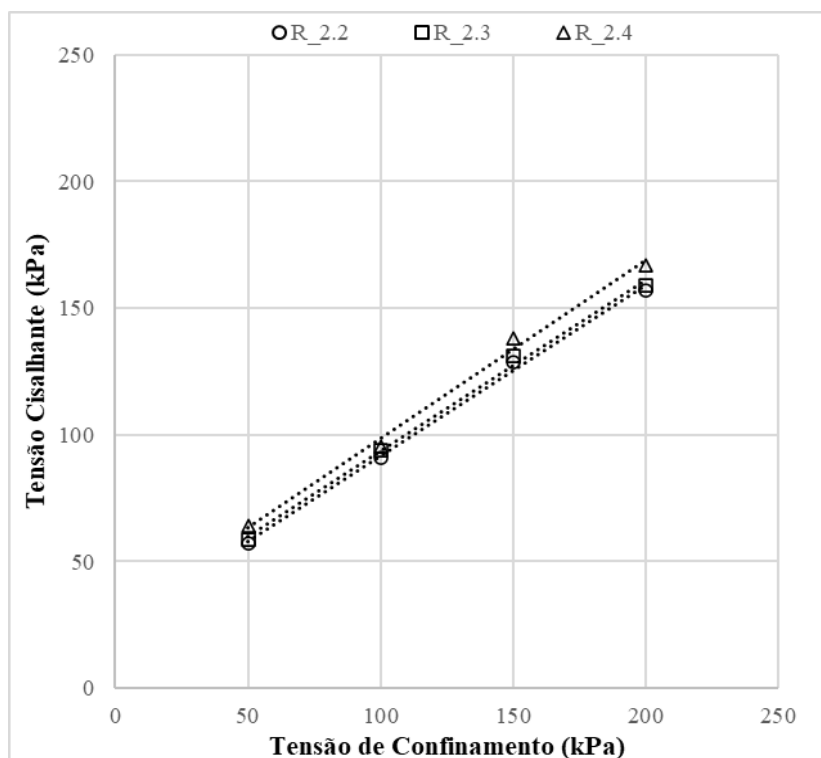


Figura 4.11 – Envoltórias de Ruptura para o Rejeito Puro

Tabela 4.5 – Parâmetros de Resistência do Rejeito Puro

Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	R^2
R_2.2	23,9	34,1	0,997
R_2.3	26,1	34,1	0,997
R_2.4	28,2	35,2	0,995

Na Tabela 4.6, estão apresentados os valores de tensão de pico obtidos para as amostras de rejeito puro nas três densidades estudadas. A amostra R_2.4_200 foi a que apresentou maior tensão de pico, por apresentar a maior densidade e a maior tensão de confinamento, conforme explicado anteriormente; porém o maior crescimento proporcional foi apresentado pela amostra R_2.4_50, que obteve um crescimento aproximado de 12% em relação à amostra R_2.2_50, o que pode indicar que a densidade apresentar maior influência no aumento da tensão de pico do que a tensão de confinamento para este

material.

Tabela 4.6 – Tensões de Pico das Amostras de Rejeito Puro

Amostra	Tensão de Pico (kPa)	Amostra	Tensão de Pico (kPa)	Amostra	Tensão de Pico (kPa)
R_2.2_50	56,9	R_2.3_50	58,6	R_2.4_50	64,1
R_2.2_100	91,0	R_2.3_100	94,1	R_2.4_100	95,4
R_2.2_150	128,6	R_2.3_150	131,1	R_2.4_150	138,3
R_2.2_200	157,1	R_2.3_200	159,1	R_2.4_200	167,2

4.2.4.2. Rejeito com 30% de Polímero

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o rejeito estabilizado quimicamente com uma dosagem de 30% de polímero em relação à umidade de 15% estipulada para moldar as amostras e um tempo de cura ao ar de 28 dias. O compósito rejeito-polímero foi ensaiado em quatro tensões de confinamento diferentes: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Na Figura 4.12 se tem os resultados para as amostras na densidade de 2,2 g/cm³, na Figura 4.13 para as amostras na densidade de 2,3 g/cm³ e na Figura 4.14 se tem os resultados para as amostras na densidade de 2,4 g/cm³.

Os resultados mostram que a estabilização química do rejeito com 30% de polímero conferiu um aumento de resistência de pico extremamente significativo ao compósito quando comparado com o rejeito puro.

A estabilização química do rejeito com o polímero alterou consideravelmente o formato das curvas, apresentando uma baixa resistência nos deslocamentos iniciais, um crescimento bastante elevado e depois uma queda brusca. Uma explicação para este comportamento se dá pela forma como ocorre o processo de cura dos corpos de prova, para que as reações de cola aconteçam entre as partículas do rejeito e o polímero, é necessário que o polímero esteja em contato com o ar para que ele seque e se enrijeça. Desta forma, o exterior do corpo de prova fica mais exposto que o interior consequentemente ficando mais seco, logo mais frágeis. Isso explica porque nos deslocamentos iniciais se tem uma baixa resistência ao cisalhamento, visto que este exterior mais frágil é solicitado primeiro, e conforme o interior que está mais rígido é solicitado a resistência sobe consideravelmente.

O rejeito puro não apresenta uma resistência pós-pico relevante e este comportamento é percebido também no compósito de rejeito com 30% de polímero.

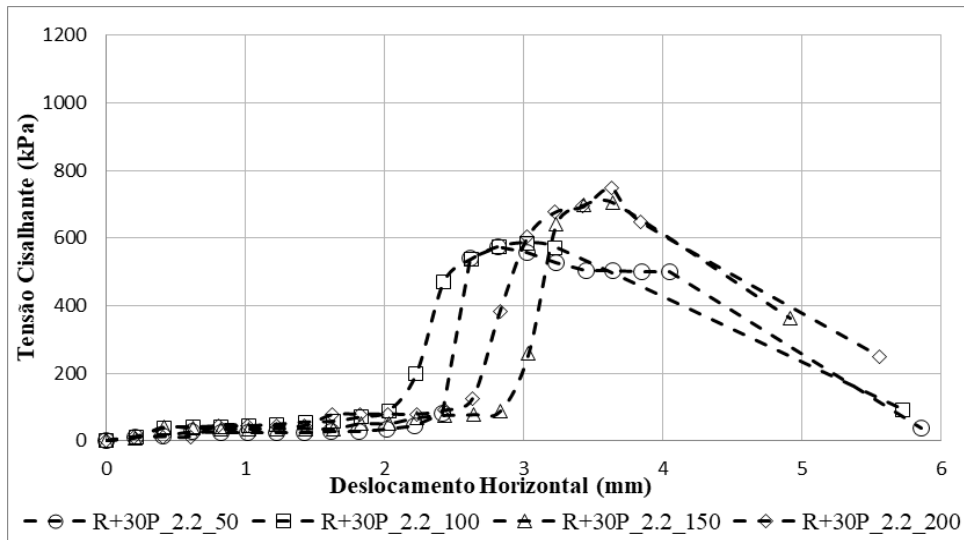


Figura 4.12 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+30P 2,2 g/cm³

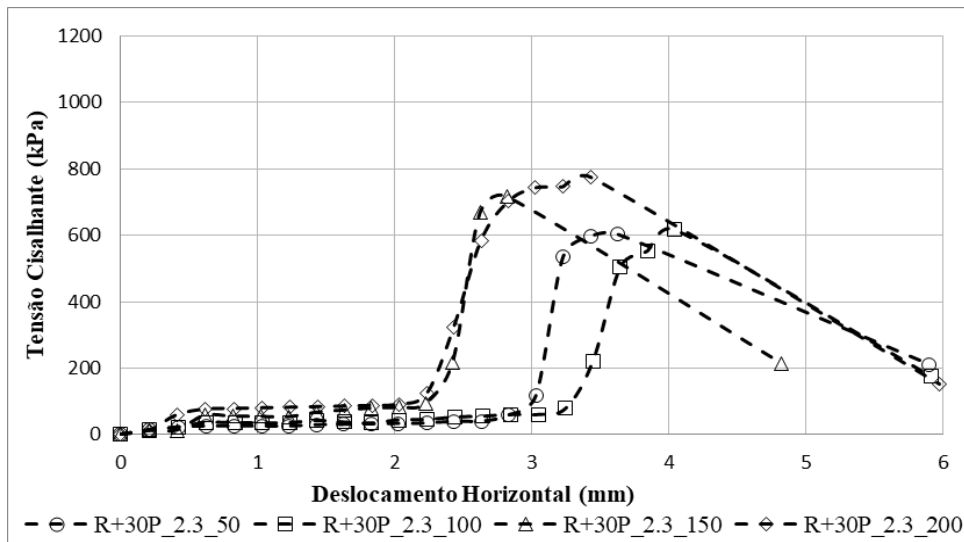


Figura 4.13 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+30P 2,3 g/cm³

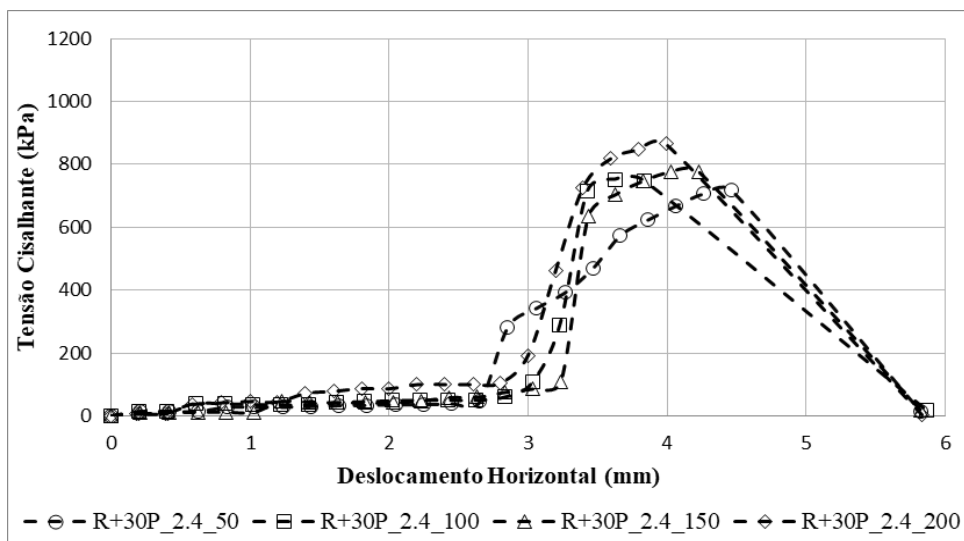


Figura 4.14 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+30P 2,4 g/cm³

Na Figura 4.15 apresentam-se as envoltórias de ruptura para o rejeito com 30% de polímero nas três densidades estudadas. As envoltórias R+30%P_2.2 e R+30%P_2.3 se apresentam paralelas entre si, indicando uma variação baixa no ângulo de atrito. Já a envoltória R+30%P_2.4 apresenta uma redução do ângulo de atrito que é notável na angulação da reta.

Também é notável que as envoltórias apresentam uma bilinearidade, traçando envoltórias com as tensões duas a duas é possível notar angularidades diferentes entre elas. Esta bilinearidade influencia no fator de ajuste R^2 das envoltórias de ruptura que são apresentados juntamente com a coesão e o ângulo de atrito das retas na Tabela 4.7.

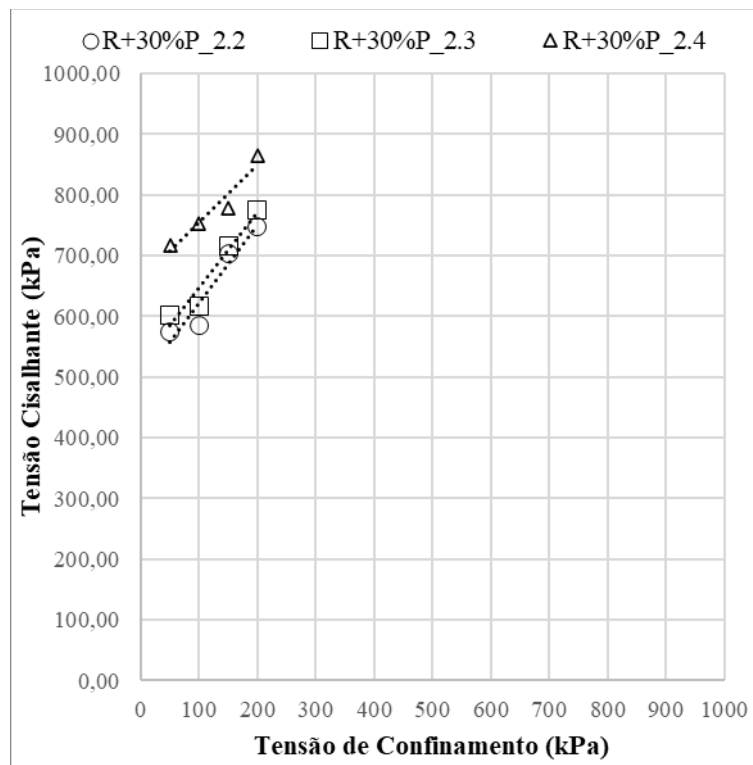


Figura 4.15 – Envoltórias de Ruptura para o Rejeito + 30% de Polímero

Tabela 4.7 – Parâmetros de Resistência do Rejeito + 30% de Polímero

Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	R²
R+30P_2.2	492,5	52,1	0,912
R+30P_2.3	523,1	51,1	0,938
R+30P_2.4	660,2	43,4	0,921

Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores de tensão de pico para as amostras de rejeito com 30% de polímero nas três densidades estudadas. Os resultados seguem a mesma tendência dos observados para o rejeito puro, onde a amostra de maior tensão de pico foi a de maior densidade e tensão de confinamento, porém com valores muito mais elevados variando de 4 a 11 vezes maior que o rejeito puro.

Tabela 4.8 – Tensões de Pico das Amostras de Rejeito + 30% de Polímero

Amostra	Tensão de Pico (kPa)	Amostra	Tensão de Pico (kPa)	Amostra	Tensão de Pico (kPa)
R+P30_2.2_50	574,3	R+P30_2.3_50	602,2	R+P30_2.4_50	716,8
R+P30_2.2_100	584,9	R+P30_2.3_100	617,1	R+P30_2.4_100	752,4
R+P30_2.2_150	704,1	R+P30_2.3_150	716,7	R+P30_2.4_150	777,8
R+P30_2.2_200	748,5	R+P30_2.3_200	775,4	R+P30_2.4_200	865,7

4.2.4.3. Rejeito com 40% de Polímero

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o rejeito estabilizado quimicamente com uma dosagem de 40% de polímero em relação à umidade de 15% estipulada para moldar as amostras e ensaiadas em quatro tensões de confinamento diferentes: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Na Figura 4.16 se tem os resultados para as amostras na densidade de 2,2 g/cm³, na Figura 4.17 para as amostras na densidade de 2,3 g/cm³ e na Figura 4.18 se tem os resultados para as amostras na densidade de 2,4 g/cm³.

Os resultados exibem um comportamento bastante similar aos do rejeito com 30% de polímero, apresentando tensões de pico ainda maiores. As curvas apresentaram o mesmo formato que as do rejeito com 30% de polímero, com baixas tensões nos deslocamentos iniciais, um pico extremamente elevado e uma tensão pós-pico significativa.

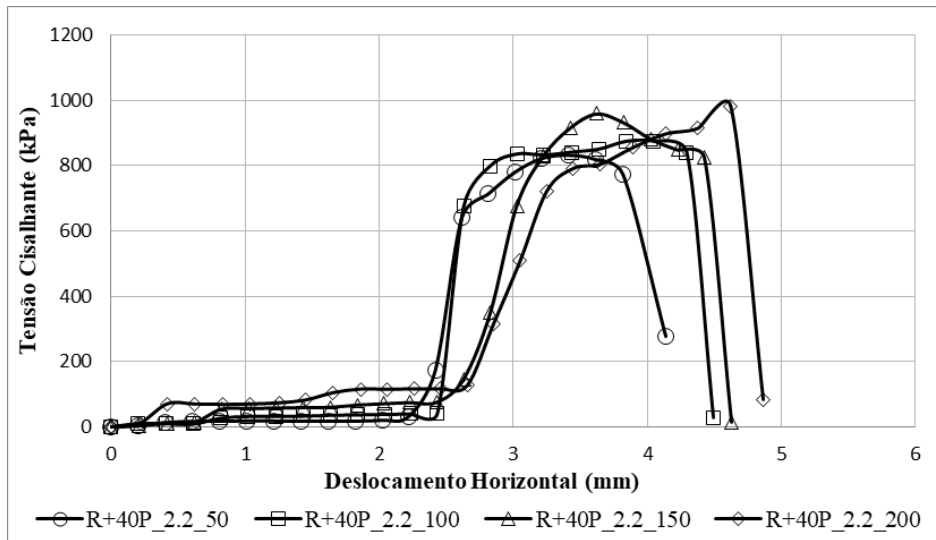


Figura 4.16 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+40P 2,2 g/cm³

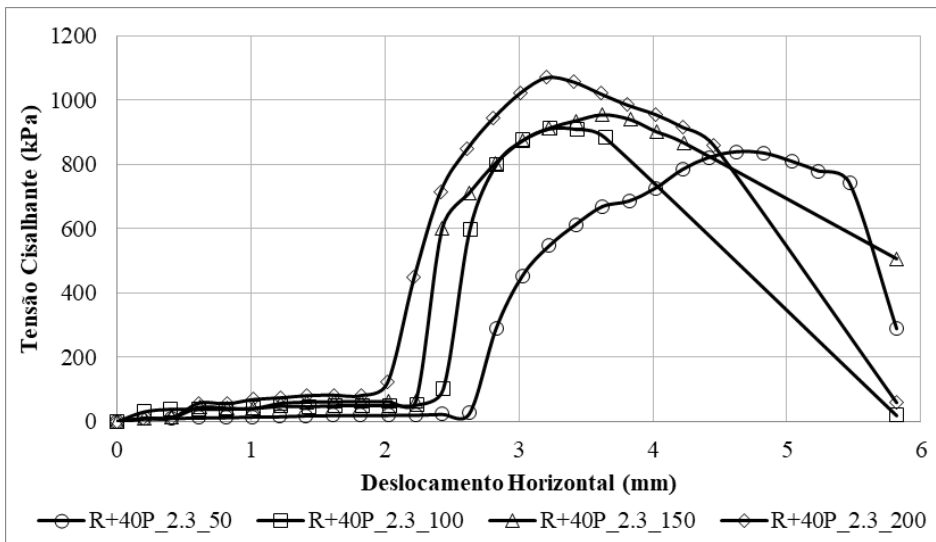


Figura 4.17 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+40P 2,3 g/cm³

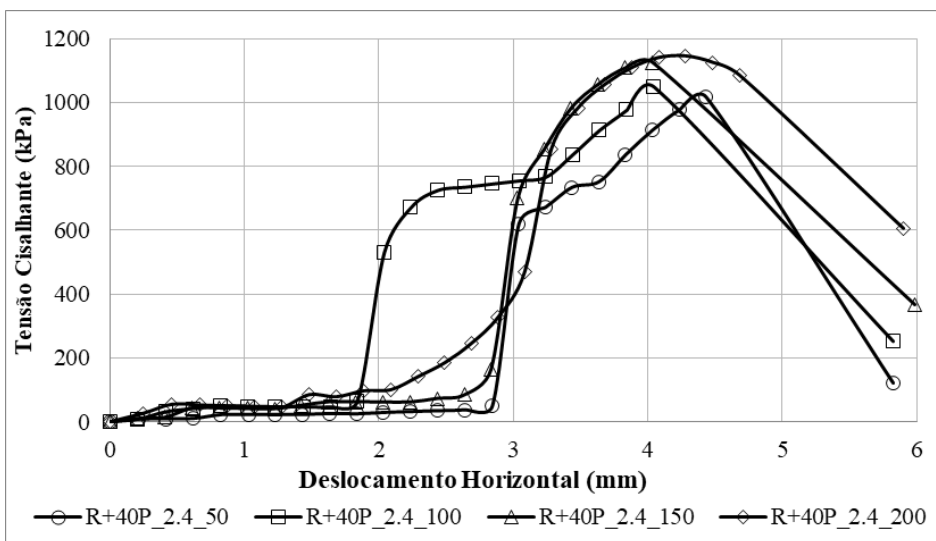


Figura 4.18 – Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal de R+40P 2,4 g/cm³

Na Figura 4.19 apresentam-se as envoltórias de ruptura para o rejeito com 40% de polímero nas três densidades estudadas. As envoltórias dos compósitos de rejeito com 40% de polímero apresentam o mesmo comportamento bilinear dos compósitos de rejeito com 30% de polímero, porém a envoltória R+40%P_2.3 apresentou uma pequena diminuição da coesão quando comparada com a envoltória R+40%P_2.2 e apresentou um ângulo de atrito maior que o das duas outras envoltórias.

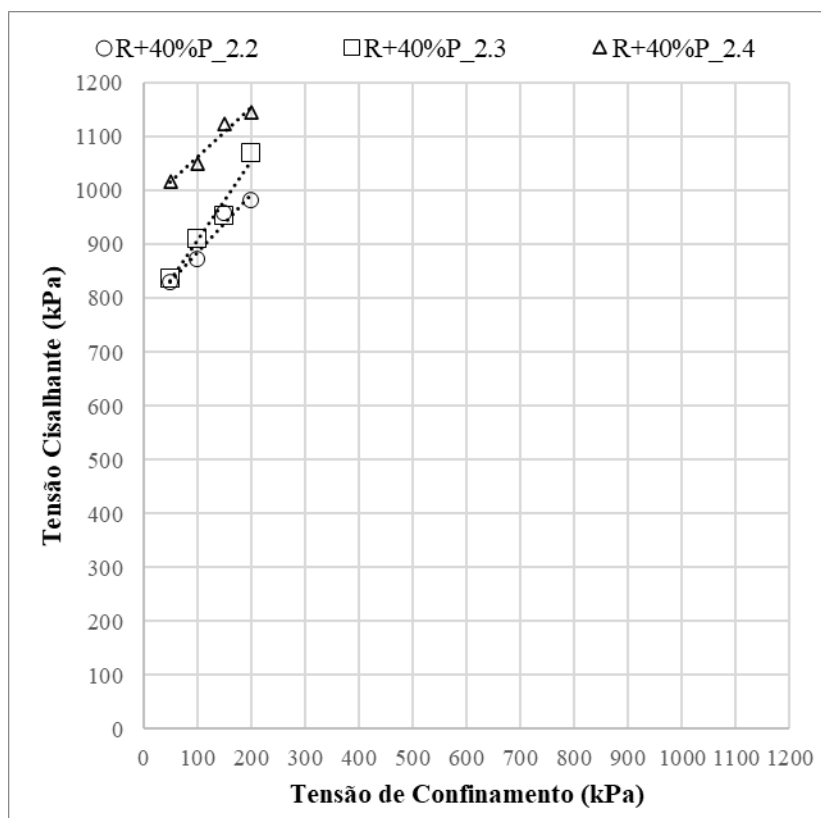


Figura 4.19 – Envoltórias de Ruptura para o Rejeito + 40% de Polímero

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores de coesão, ângulo de atrito e o fator de ajuste R^2 para cada envoltória. O fator R^2 também se apresentou um pouco menor que para as envoltórias de rejeito puro, assim como para as envoltórias de rejeito com 30% de polímero que podem ser explicados pela bilinearidade das envoltórias.

Tabela 4.9 – Parâmetros de Resistência do Rejeito + 40% de Polímero

Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	R^2
R+40P_2.2	777,1	47,2	0,957
R+40P_2.3	758,4	56,0	0,964
R+40P_2.4	970,0	42,7	0,955

Na Tabela 4.10 são apresentados os valores de tensão de pico para as amostras de rejeito com 40% de polímero nas três densidades estudadas. Os resultados seguem a

mesma tendência dos observados para os casos apresentados anteriormente, em que a amostra de maior tensão de pico foi a de maior densidade e tensão de confinamento, com valores muito mais elevados variando entre 6 e 16 vezes maior que o rejeito puro.

Tabela 4.10 – Tensões de Pico das Amostras de Rejeito + 40% de Polímero

Amostra	Tensão de Pico (kPa)	Amostra	Tensão de Pico (kPa)	Amostra	Tensão de Pico (kPa)
R+P40_2.2_50	831,70	R+P40_2.3_50	838,30	R+P40_2.4_50	1016,90
R+P40_2.2_100	874,20	R+P40_2.3_100	911,10	R+P40_2.4_100	1049,90
R+P40_2.2_150	960,00	R+P40_2.3_150	954,10	R+P40_2.4_150	1125,00
R+P40_2.2_200	983,40	R+P40_2.3_200	1071,00	R+P40_2.4_200	1145,80

4.2.4.4. Comparativo entre o Rejeito Puro e os Compósitos Rejeito-Polímero

Para concluir a análise da caracterização mecânica deste material, é necessário fazer um balanço das três análises em conjunto. Na Figura 4.20 estão colocadas lado a lado, em mesmas dimensões, os nove gráficos gerados para o rejeito puro, o rejeito com 30% de polímero e 40% de polímero nas três densidades avaliadas nesta pesquisa. Como é observável, o ganho de resistência de pico é extremamente significativo com a adição de polímero no rejeito, mas o polímero não foi capaz de conferir resistência pós-pico a qual o rejeito já não possuía.

Também é possível perceber o caminhar do pico dos gráficos para a esquerda, ou seja, a ruptura ocorre em deslocamentos horizontais menores. Este fenômeno ocorre pelo enrijecimento dos compósitos causados pela estabilização química que ocorre com a adição de polímero ao rejeito.

Na Tabela 4.11 estão compilados os valores de tensão de pico para todas as amostras, de forma que fique mais fácil de evidenciar os aumentos nas tensões de pico causados pela adição de polímero em diferentes porcentagens ao rejeito e nas três densidades estudadas por esta pesquisa. Como já dito anteriormente, ao aumento de tensão de pico causado pela adição de polímero é bastante expressivo, com valores que vão de 4 a 16 vezes o valor do rejeito puro para os compósitos com adição de 30% e 40% de polímero.

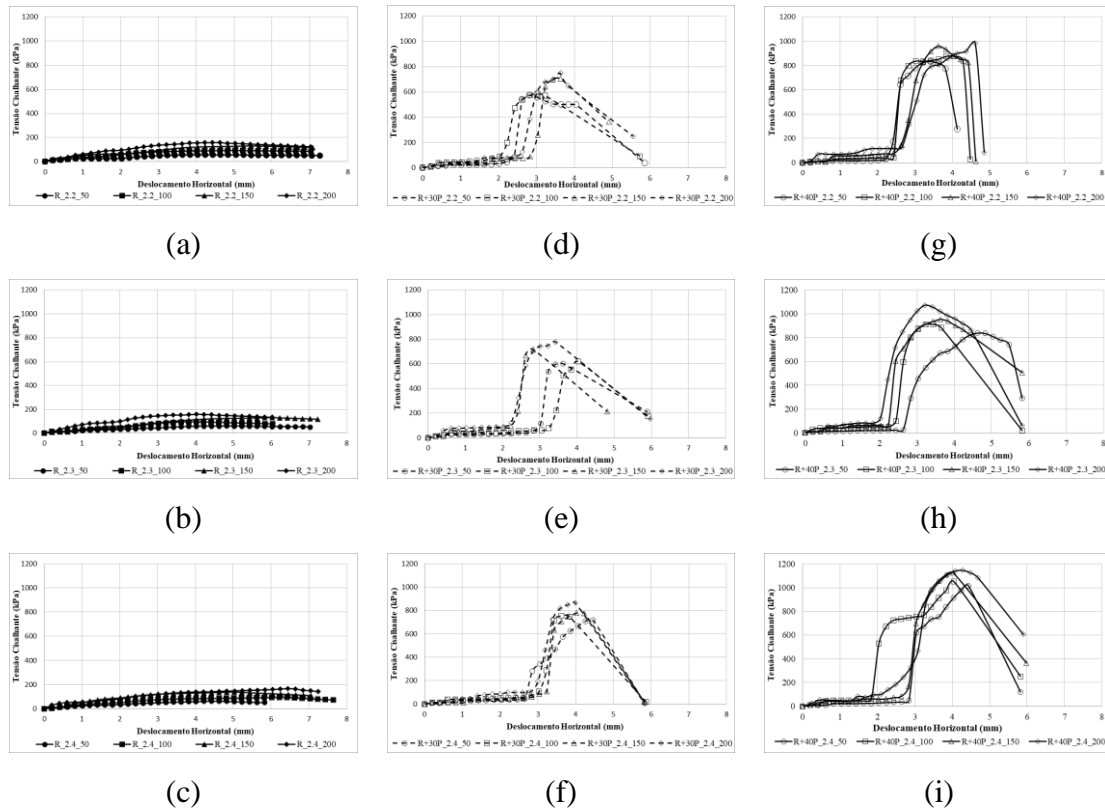


Figura 4.20 – Compilado dos Resultados de Cisalhamento Direto (a) Rejeito Puro 2,2 g/cm²; (b) Rejeito Puro 2,3 g/cm²; (c) Rejeito Puro 2,4 g/cm²; (d) Rejeito + 30% de Polímero 2,2 g/cm²; (e) Rejeito + 30% de Polímero 2,3 g/cm²; (f) Rejeito + 30% de Polímero 2,4 g/cm²; (g) Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm²; (h) Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm²; (i) Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm²

Tabela 4.11 – Tensões de Pico para todas as Amostras

Amostras	Tensão Confinante (kPa)			
	50	100	150	200
	Tensão de Pico (kPa)			
R_2.2	56,9	91	128,6	157,1
R_2.3	58,6	94,1	131,1	159,1
R_2.4	64,1	95,4	138,3	167,2
R+P30_2.2	574,3	584,9	704,1	748,5
R+P30_2.3	602,2	617,1	716,7	775,4
R+P30_2.4	716,8	752,4	777,8	865,7
R+P40_2.2	831,7	874,2	960,0	983,4
R+P40_2.3	838,3	911,1	954,1	1071,0
R+P40_2.4	1016,9	1049,9	1125,0	1145,8

Na Figura 4.21 estão compilados os valores de Ângulo de Atrito e Coesão para diferentes densidades para o Rejeito Puro. É notável que com o aumento da densidade há um aumento progressivo na coesão e no ângulo de atrito com o aumento da densidade.

Na Figura 4.22 estão compilados os valores de Ângulo de Atrito e Coesão para diferentes densidades para o Rejeito + 30% Polímero. Há um aumento progressivo na coesão, mas há uma leve diminuição do ângulo de atrito com o aumento da densidade.

Na Figura 2.23 estão compilados os valores de Ângulo de Atrito e Coesão para diferentes densidades para o Rejeito + 40% Polímero. Há uma leve diminuição da coesão e um aumento do ângulo de atrito para a amostra na densidade de 2,3 g/cm³ e há uma inversão para a amostra na densidade de 2,4 g/cm³, com um aumento na coesão e uma diminuição no ângulo de atrito.

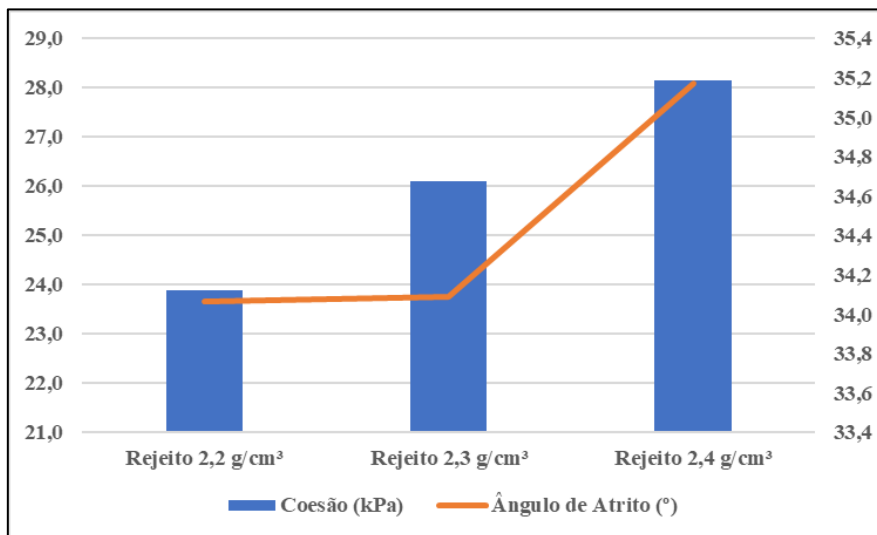


Figura 4.21 – Coesão e Ângulo de Atrito para o Rejeito Puro

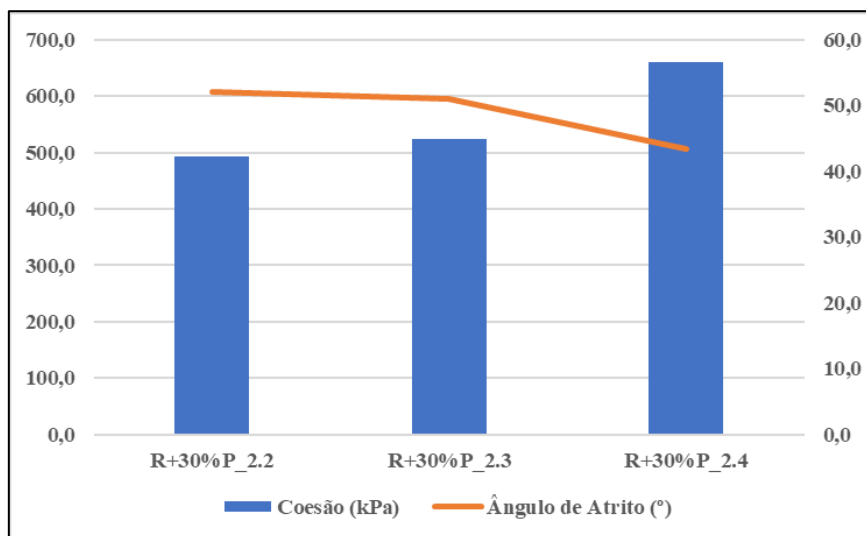


Figura 4.22 – Coesão e Ângulo de Atrito para o Rejeito + 30% Polímero

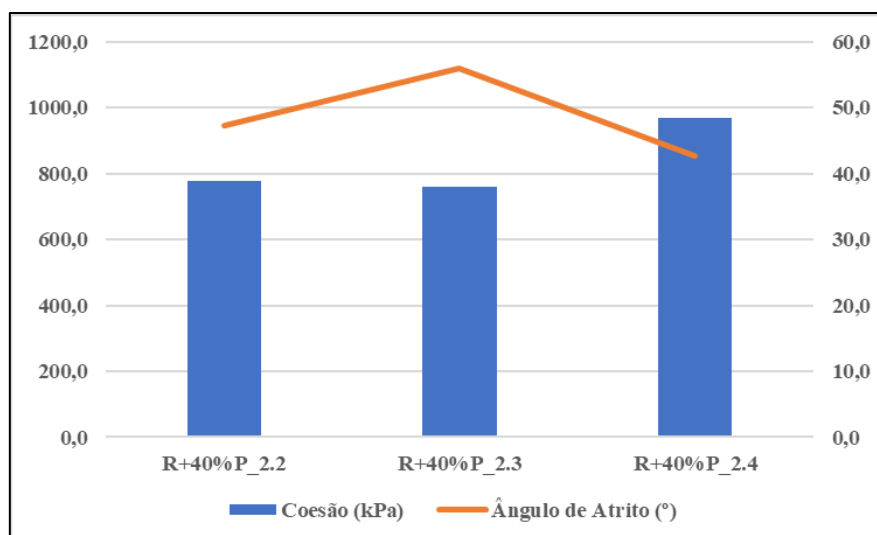


Figura 4.23 – Coesão e Ângulo de Atrito para o Rejeito + 40% Polímero

4.3. Caracterização Hidráulica - Ensaio de Permeabilidade

É necessário se investigar o coeficiente de permeabilidade para os compósitos, pois espera-se que o efeito floculador do polímero preencha os vazios do rejeito e o impermeabilize, com este apresentando uma menor permeabilidade. Na Tabela 4.12 estão apresentados os coeficientes de permeabilidade para as amostras de rejeito puro nas três densidades estudadas e os compósitos rejeito-polímero na dosagem de 40% também nas três densidades estudadas.

Tabela 4.12 – Coeficientes de Permeabilidade do Rejeito Puro e do Compósito

Amostra	Permeabilidade (cm/s)
Rejeito 2,2 g/cm ³	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Rejeito 2,3 g/cm ³	$9,5 \cdot 10^{-6}$
Rejeito 2,4 g/cm ³	$6,6 \cdot 10^{-6}$
Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³	$8,4 \cdot 10^{-6}$
Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³	$2,7 \cdot 10^{-6}$

Observa-se que há uma tendência de redução da permeabilidade conforme se aumenta a densidade do corpo de prova, o que já era esperado e condiz com a teoria da mecânica dos solos. Também fica evidente que, de fato, o polímero age como um impermeabilizante, porém a ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade se mantém a mesma, mostrando que não traz uma mudança significativa na permeabilidade do rejeito.

O que pode explicar esta redução marginal da permeabilidade com a adição de

polímero é o fato de que as partículas do rejeito são bastante angulosas, o que dificulta um ordenamento deste material e mesmo o polímero não é capaz de preencher todos os vazios. Uma evidência deste argumento é dada mais adiante com os resultados de MEV, mostrando a angulosidade das partículas e de microCT que mostram que a porosidade dos corpos de prova sofre pouca alteração com a adição de polímero ao rejeito.

4.4. Caracterização Mineralógica - Difração de Raio-X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado para analisar como a adição de polímero afeta a mineralogia do rejeito. Na Figura 4.24 é apresentado o resultado do DRX para o rejeito puro.

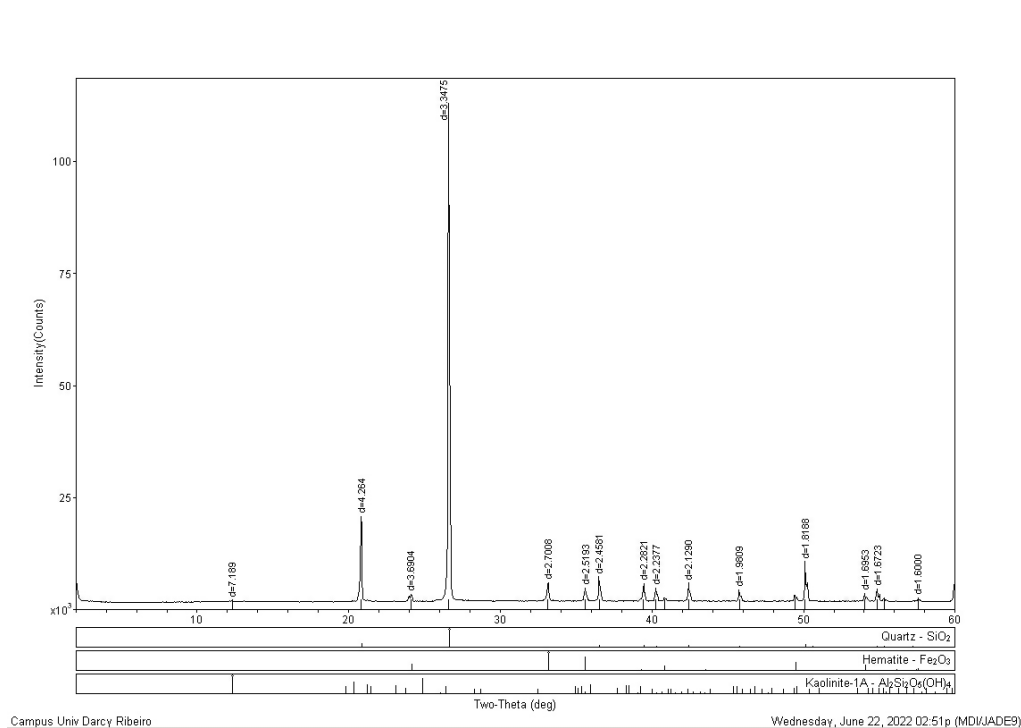


Figura 4.24 – DRX do Rejeito Puro

O resultado deste ensaio mostra que o rejeito de minério de ferro estudado é predominantemente composto de minerais de quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3), apresentando picos insipientes de caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Estes resultados são similares a outros realizados em diferentes rejeitos de minério de ferro como o de Santos (2018) e Carneiro (2020).

Abaixo são apresentados os resultados de DRX para os compósitos de Rejeito + 30% de Polímero e Rejeito + 40% nas Figuras 4.25 e 4.26, respectivamente. Na Figura 4.25 mostra-se que não houve alteração significativa na estrutura do compósito Rejeito + 30%

de Polímero, já na Figura 4.26 apresenta-se um pico insipiente de gibbsita ($Al(OH)_3$). O aparecimento deste mineral provavelmente tem sua origem na adição de uma proporção maior de polímero que pode ter aglutinado as partículas dando a impressão da formação deste mineral aos detectores do equipamento.

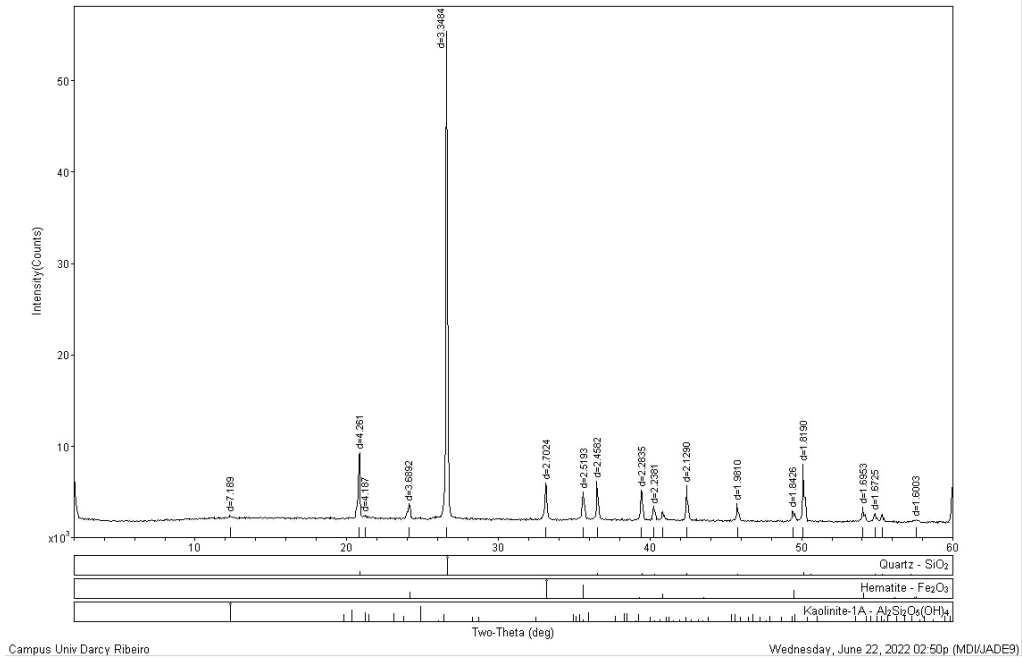


Figura 4.25 – DRX do Rejeito com 30% de Polímero

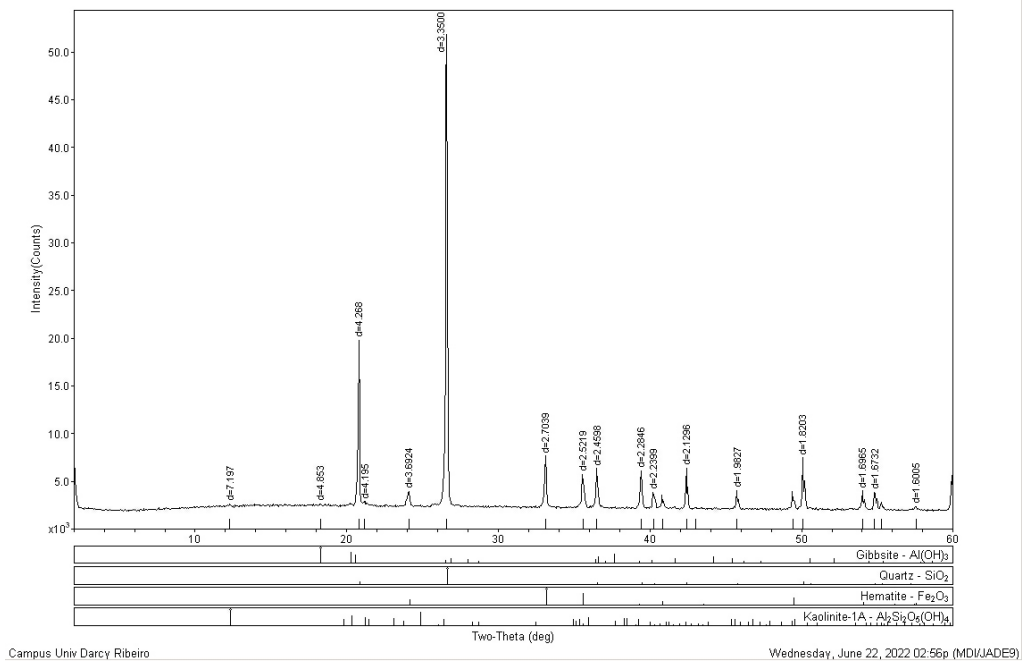


Figura 4.26 – DRX do Rejeito com 40% de Polímero

Para além do já exposto, estes resultados demonstram que a adição de polímero não apresenta mudança significativa na estrutura mineralógica deste rejeito de minério de ferro avaliado nesta pesquisa.

4.5. Caracterização Microestrutural

4.5.1. Microtomografia Computadorizada (MicroCT)

A análise de microtomografia trouxe a possibilidade de avaliar o comportamento e a estrutura do compósito por diversos aspectos. As imagens bidimensionais geradas para os corpos de prova de rejeito puro nas três densidades estudadas são apresentadas na Figura 4.27 (a), (b) e (c), é possível observar, claramente, o efeito de borda nos corpos de prova. É notável que nas regiões mais próximas do molde há uma densidade menor, representada pelas cores azul, verde e amarelo, e conforme se aproxima do centro são apresentadas uma maior densidade e uma maior homogeneidade pela cor roxa.

Na Figura 4.27 (d), (e) e (f) estão representadas as seções de interesse para cada corpo de prova analisado, elas são geradas para determinar a região das amostras na qual serão feitas as análises microtomográficas. As seções de interesse apresentadas são correspondentes a área da seção para a linha vermelha apresentada nas imagens (a), (b) e (c) da Figura 4.27. Nelas são eliminadas as bordas do corpo de prova para fazer uma análise da região mais homogênea, a parte representada em amarelo nestas figuras é eliminada da análise, e depois esta seção é aplicada ao longo de todo o corpo de prova.

Na Figura 4.28 apresentam-se as regiões de interesse para os corpos de prova de Rejeito + 40% de Polímero nas três densidades estudadas. Também são evidentes os efeitos de borda nestas imagens conforme visto na Figura 4.28 (a), (b) e (c), o que torna necessário a eliminação dessas bordas na análise conforme denota a Figura 4.28 (d), (e) e (f).

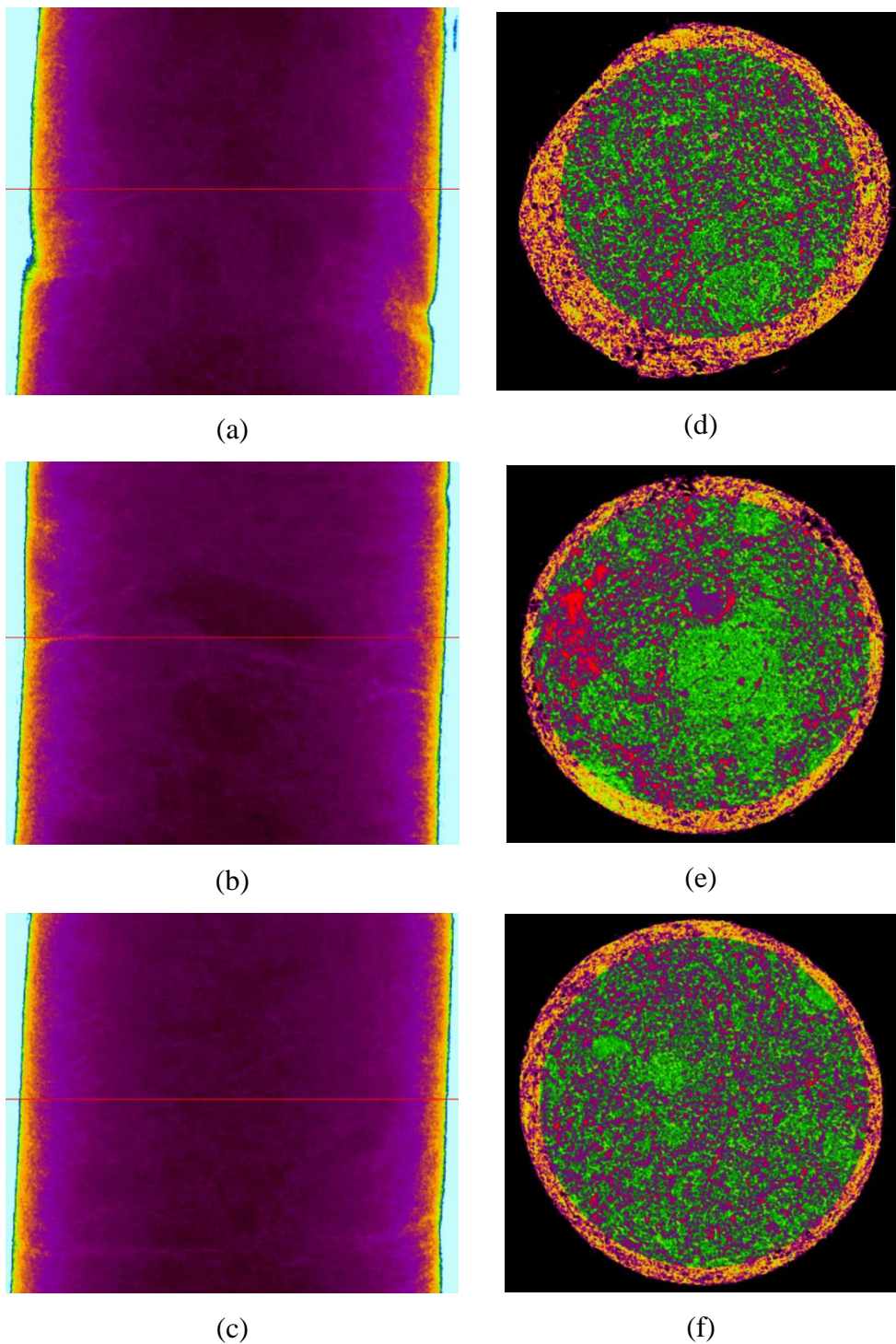


Figura 4.27 – Região de Interesse (a) Imagem Bidimensional do Rejeito Puro 2,2 g/cm³; (b) Imagem Bidimensional do Rejeito Puro 2,3 g/cm³; (c) Imagem Bidimensional do Rejeito Puro 2,4 g/cm³; (d) Área da Seção do Rejeito Puro 2,2 g/cm³; (e) Área da Seção do Rejeito Puro 2,3 g/cm³; (f) Área da Seção do Rejeito Puro 2,4 g/cm³

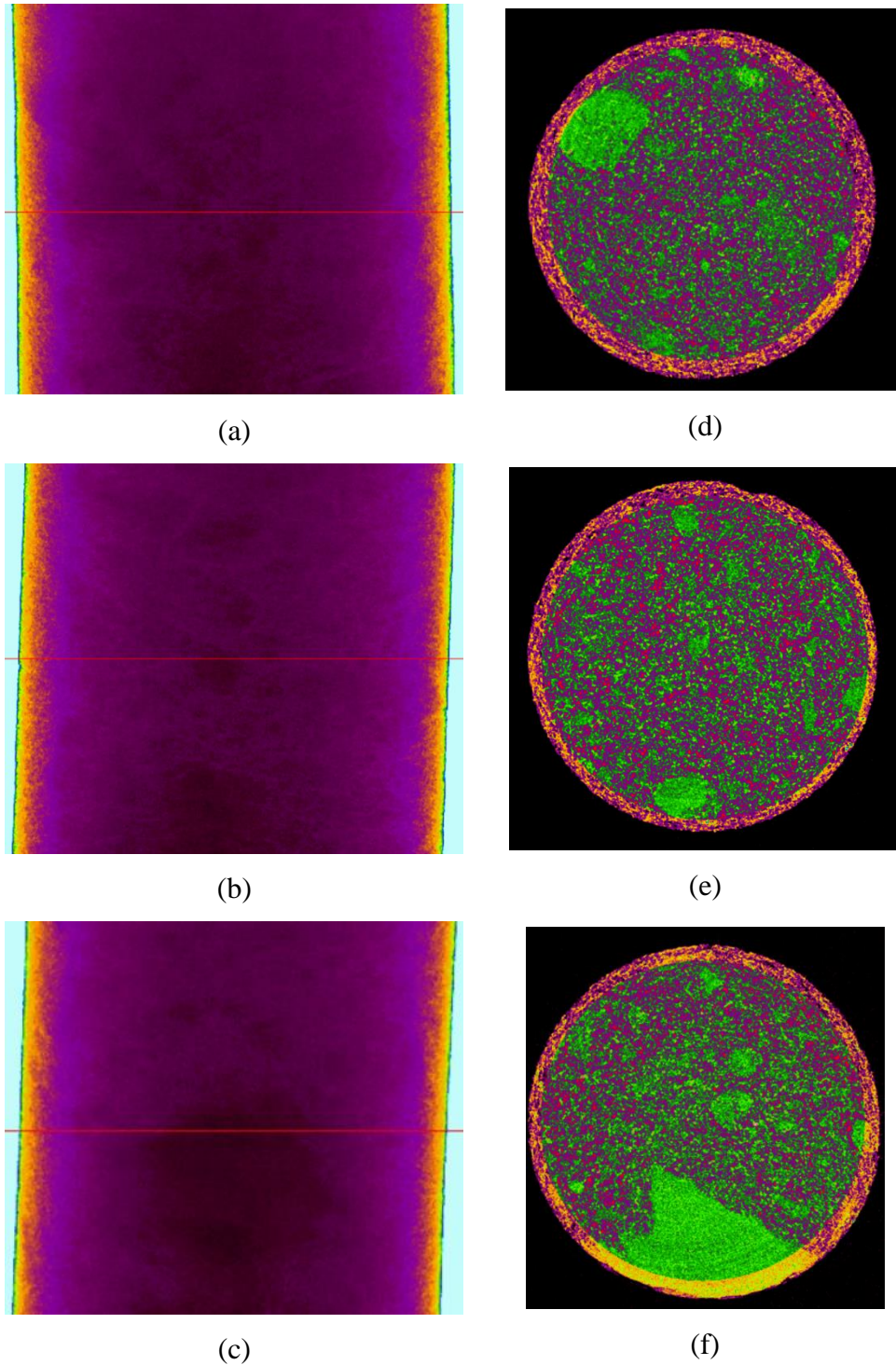


Figura 4.28 – Região de Interesse (a) Imagem Bidimensional do Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm³; (b) Imagem Bidimensional do Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm³; (c) Imagem Bidimensional do Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm³; (d) Área da Seção do Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm³; (e) Área da Seção do Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm³; (f) Área da Seção do Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm³

Na sequência estão apresentadas as análises tridimensionais para cada um dos componentes que constituem os corpos de prova analisados. Nas Figuras 4.29 a 4.31 estão apresentados os corpos de prova de rejeito puro nas três diferentes densidades, para estes têm-se representados o volume total do corpo de prova, a porosidade, os grãos de rejeito e os minerais mais pesados (em azul). Esta discriminação foi feita a partir da decomposição do histograma gerado pela passagem do raio-X pelas amostras.

Nas Figuras 4.32 a 4.34 estão apresentados os corpos de prova de rejeito com 40% de polímero nas três densidades estudadas, para estas amostras há uma nova categoria representada que se acredita ser formada pela união de grãos do rejeito com o polímero, pois esta apresenta uma maior densidade detectada no histograma.

Na Tabela 4.13, estão os percentuais de cada categoria discriminada a partir do histograma para cada uma das amostras analisadas. É notável que a porosidade em percentual apresenta uma diminuição aproximada de 2% para as amostras com a adição de 40% de polímero quando comparadas com as de rejeito puro, novamente evidenciando que o polímero tem a capacidade de fechar alguns poros na estrutura do compósito.

A categoria Porosidade não apresenta uma tendência de diminuição conforme o aumento da densidade nas amostras. Uma possível explicação para isso pode ser a angulosidade das partículas, que não permite uma maior ordenação dos grãos representativa para o pequeno volume que compõe as amostras avaliadas.

No entanto, na categoria Polímero + Grãos é possível perceber que há uma tendência de crescimento. Este fenômeno pode indicar que há uma maior aglutinação dos grãos na presença de polímero com o aumento da densidade das amostras, e a diminuição das porcentagens da categoria Grãos corrobora com esta avaliação de maneira que as partículas estão “saindo” desta categoria e “indo” para a outra.

Tabela 4.13 – Porcentagem das Composições das Amostras

Amostra	Porosidade (%)	Grãos (%)	Polímero + Grãos (%)	Densos (%)
Rejeito 2,2 g/cm ³	21,13	78,53	---	0,32
Rejeito 2,3 g/cm ³	21,14	78,44	---	0,41
Rejeito 2,4 g/cm ³	21,12	78,61	---	0,26
Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm ³	19,35	47,84	31,03	0,79
Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm ³	19,45	41,95	35,98	1,28
Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm ³	19,19	35,58	39,76	2,10

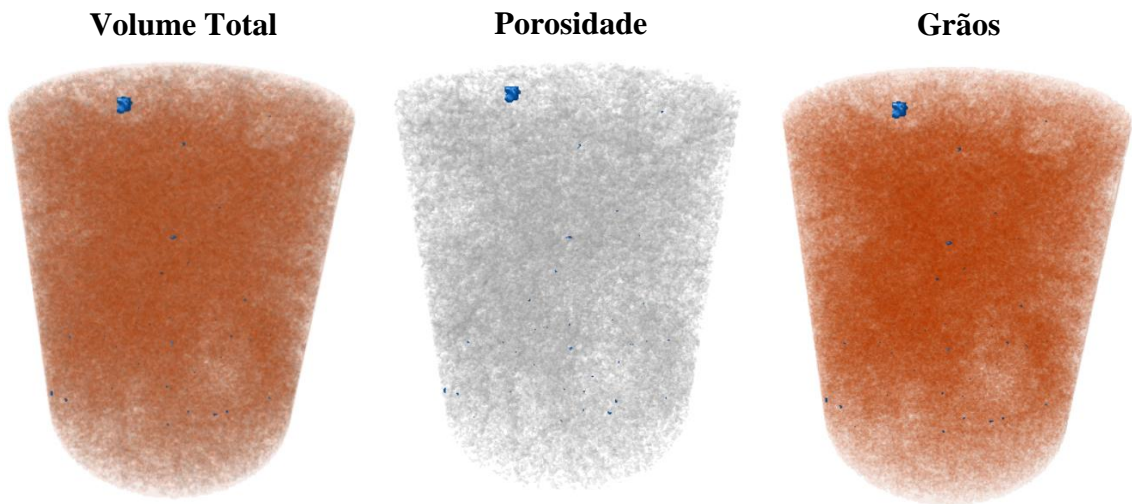


Figura 4.29 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro 2,2 g/cm³

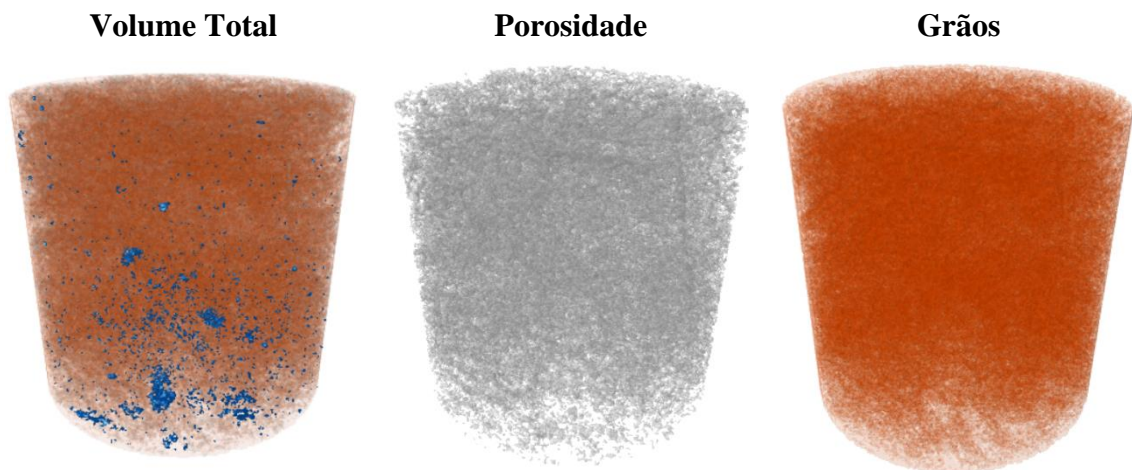


Figura 4.30 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro 2,3 g/cm³

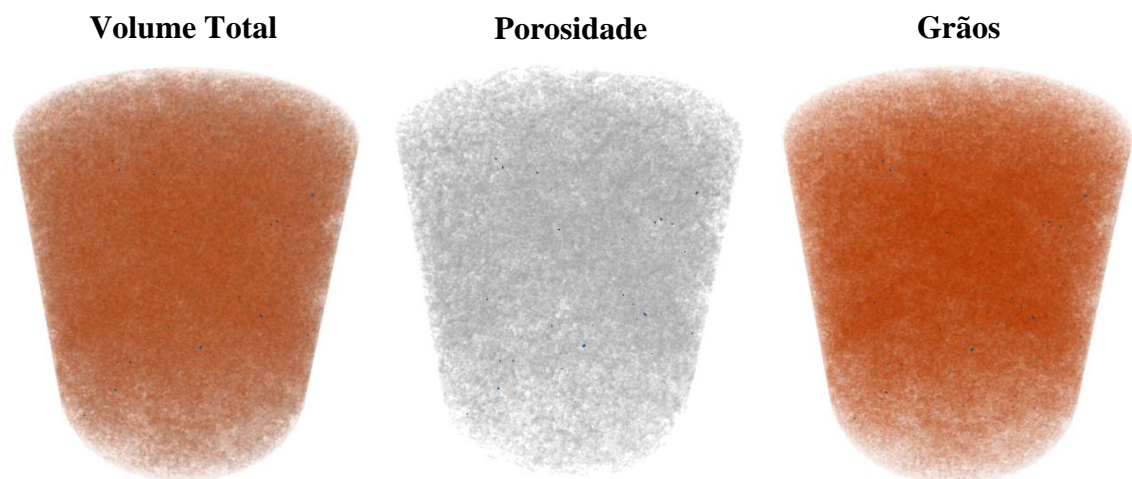


Figura 4.31 - Análise Tridimensional do Rejeito Puro 2,4 g/cm³

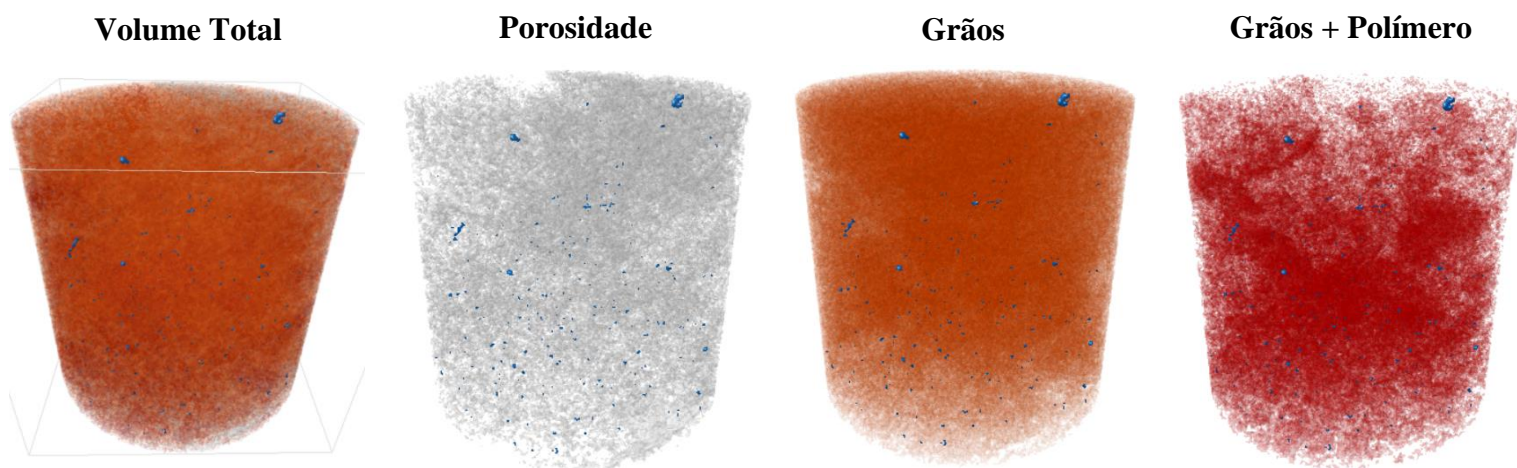


Figura 4.32 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro + 40% de Polímero 2,2 g/cm³

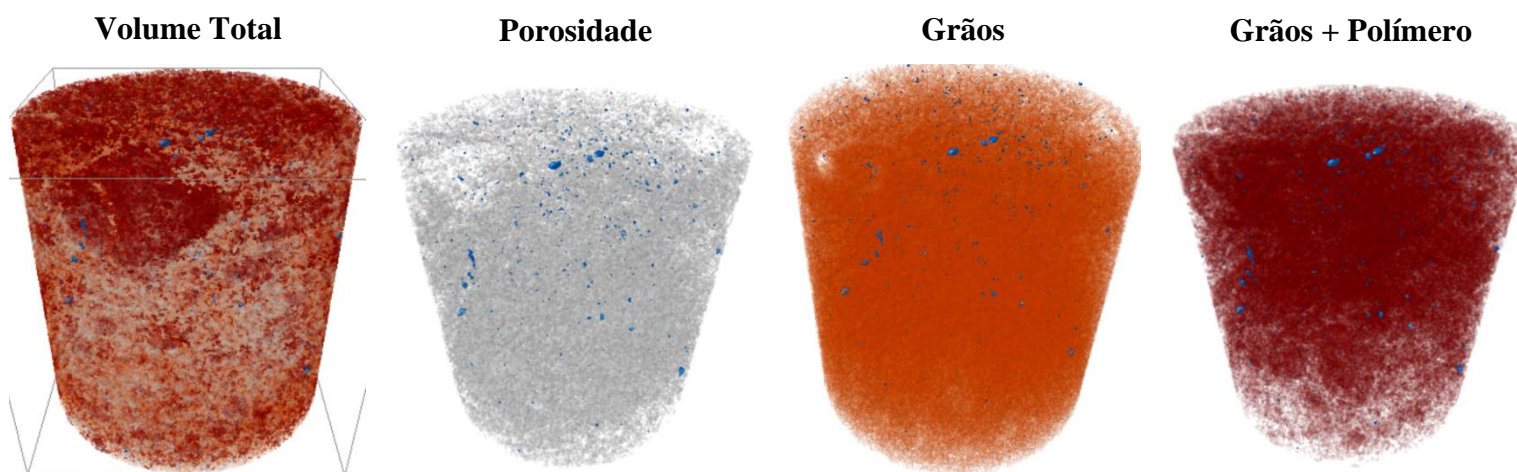


Figura 4.33 – Análise Tridimensional do Rejeito Puro + 40% de Polímero 2,3 g/cm³

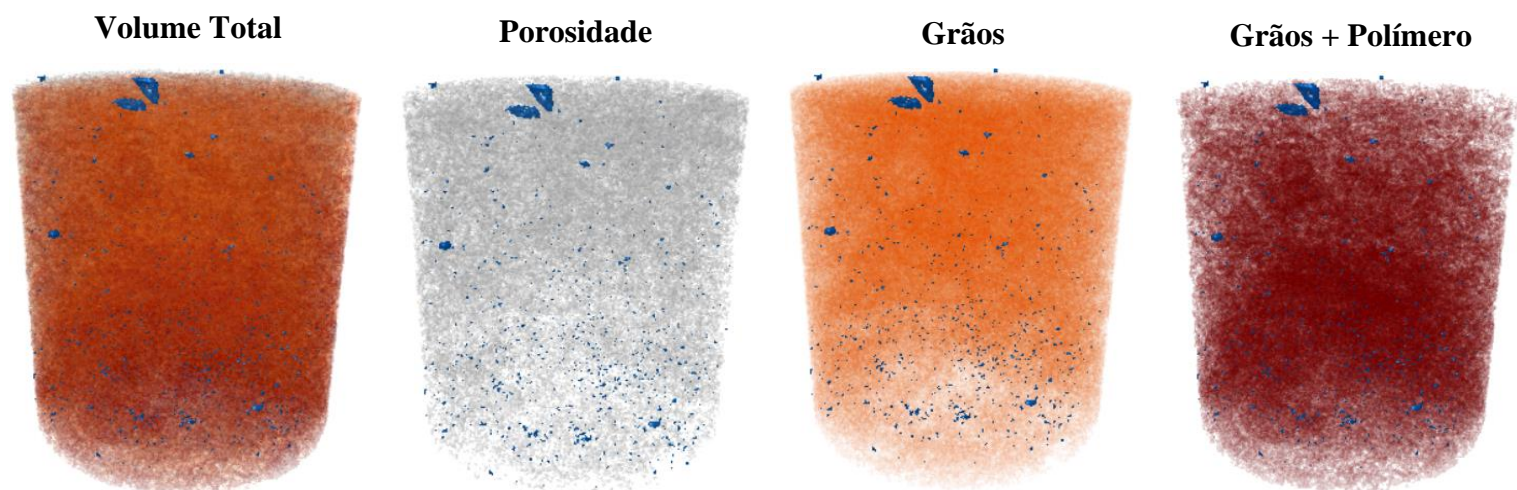


Figura 4.34 - Análise Tridimensional do Rejeito Puro + 40% de Polímero 2,4 g/cm³

Um fenômeno interessante é visto nas Figuras 4.35 a 4.40. Há uma ocorrência sutil de poros de tamanhos maiores com o aumento da densidade tanto para as amostras de rejeito puro quanto para as amostras de rejeito com 40% de polímero, mesmo que não ocorra aumento significativo da porosidade. É notável que ocorre uma diminuição da porcentagem de poros nas faixas de 0,015 a 0,283 milímetros e o aparecimento de poros nas faixas de 0,581 a 0,849 milímetros com o aumento da densidade para as amostras de rejeito puro. Para as amostras de rejeito com 40% de polímero a diminuição ocorre nas faixas de 0,015 a 0,313 milímetros e o aparecimento de poros nas faixas de 0,581 a 1,087 milímetros.

Ainda que este fenômeno aconteça, a maioria dos poros de todas as amostras, tanto de rejeito puro e rejeito com 40% de polímero, se concentram em tamanhos nas faixas de 0,045 e 0,194 milímetros, mesmo para densidades diferentes.

Um fator que pode explicar este fenômeno é o tipo de compactação aplicada nas amostras. Toda a pesquisa foi realizada em compactação dinâmica, ou seja, um peso é lançado de uma determinada altura contra o material, neste caso um soquete com altura de queda pré-estabelecida é golpeado uma série de vezes contra o rejeito. Este tipo de compactação pode restringir a livre rotação de partículas quando a área do soquete é próxima da área da seção do cilindro onde o material é disposto e, para um material anguloso como o rejeito estudado, isso pode levar justamente a um fechamento ineficiente de poros.

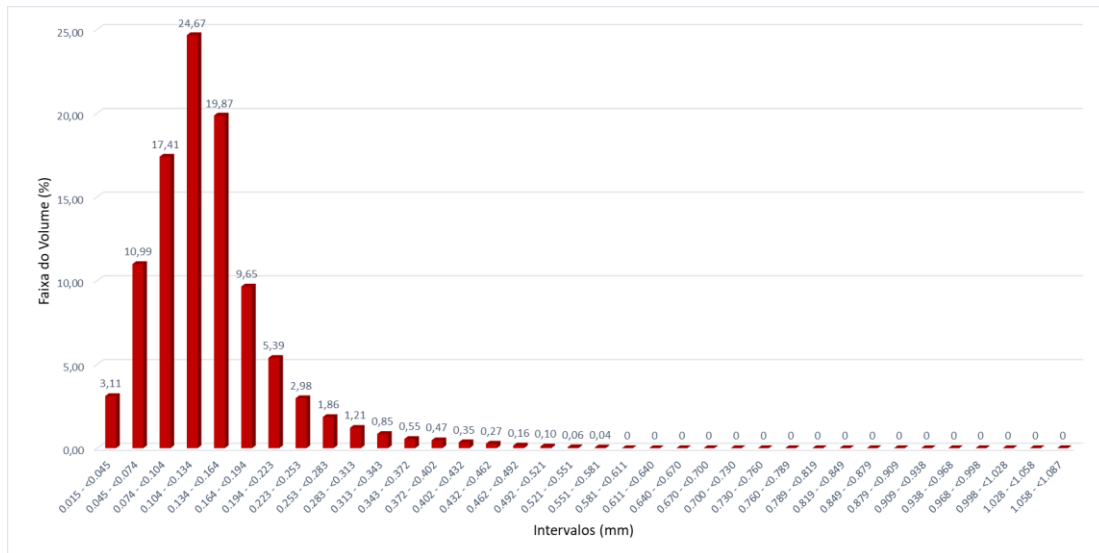


Figura 4.35 - Distribuição de Poros: Rejeito Puro 2,2 g/cm³

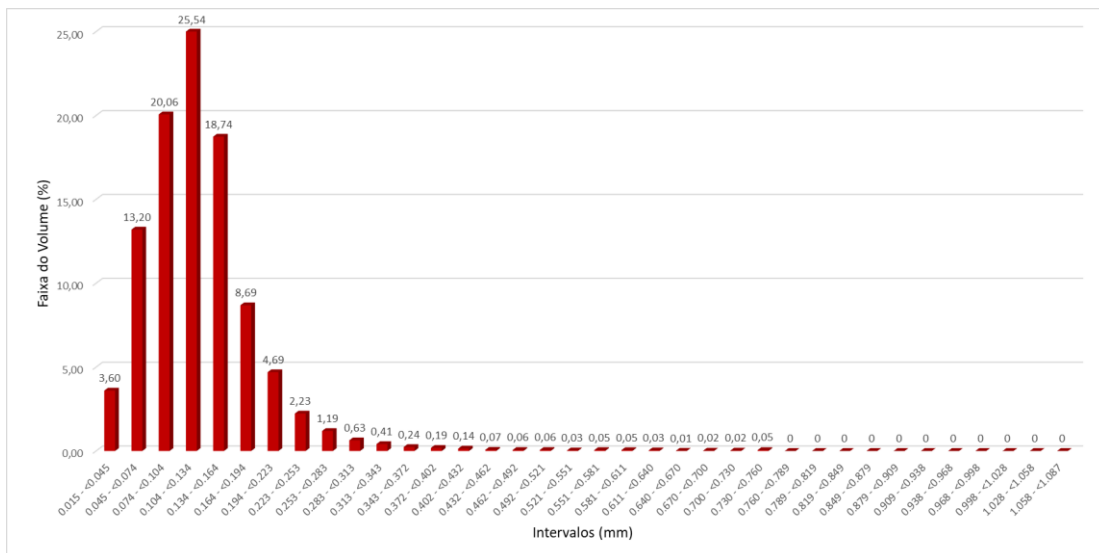


Figura 4.36 - Distribuição de Poros: Rejeito Puro 2,3 g/cm³

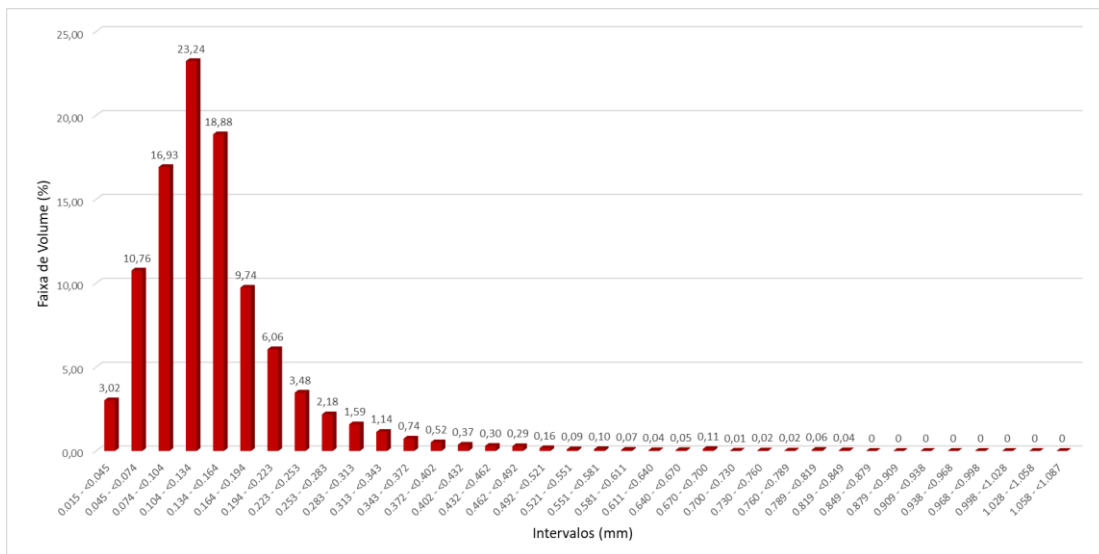


Figura 4.37 - Distribuição de Poros: Rejeito Puro 2,4 g/cm³

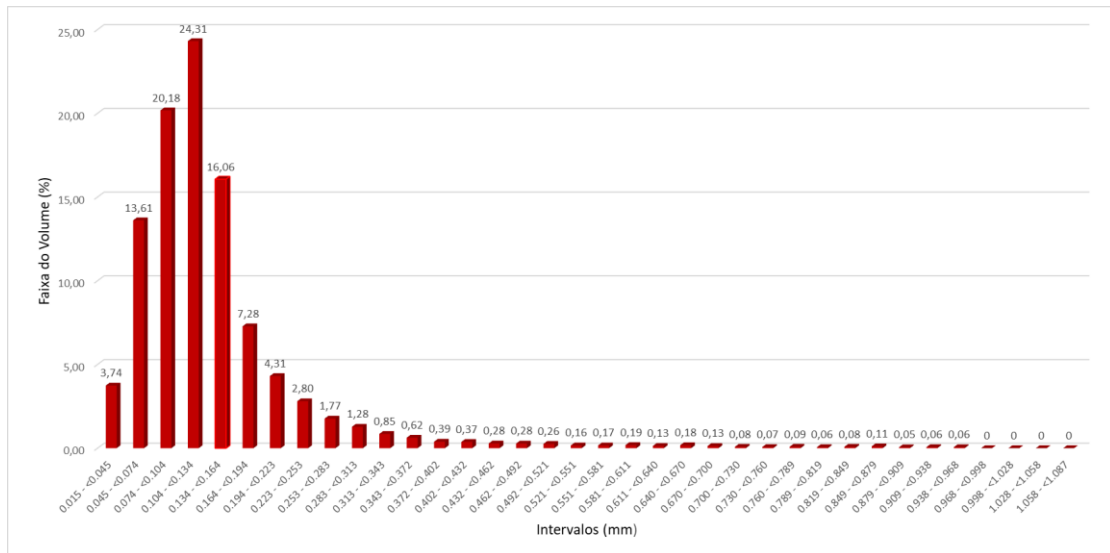


Figura 4.38 – Distribuição de Poros: Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm³

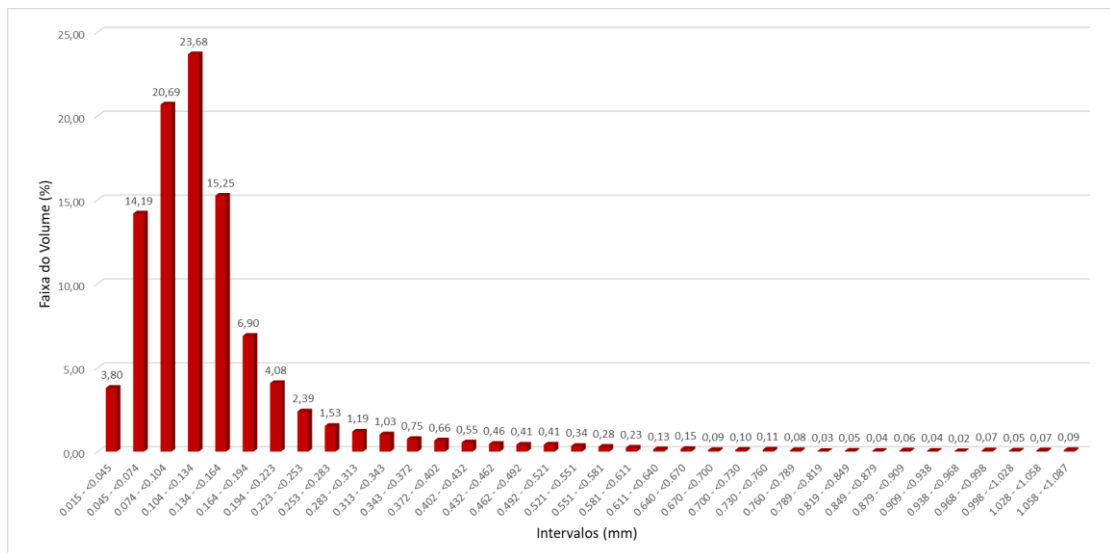


Figura 4.39 – Distribuição de Poros: Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm³

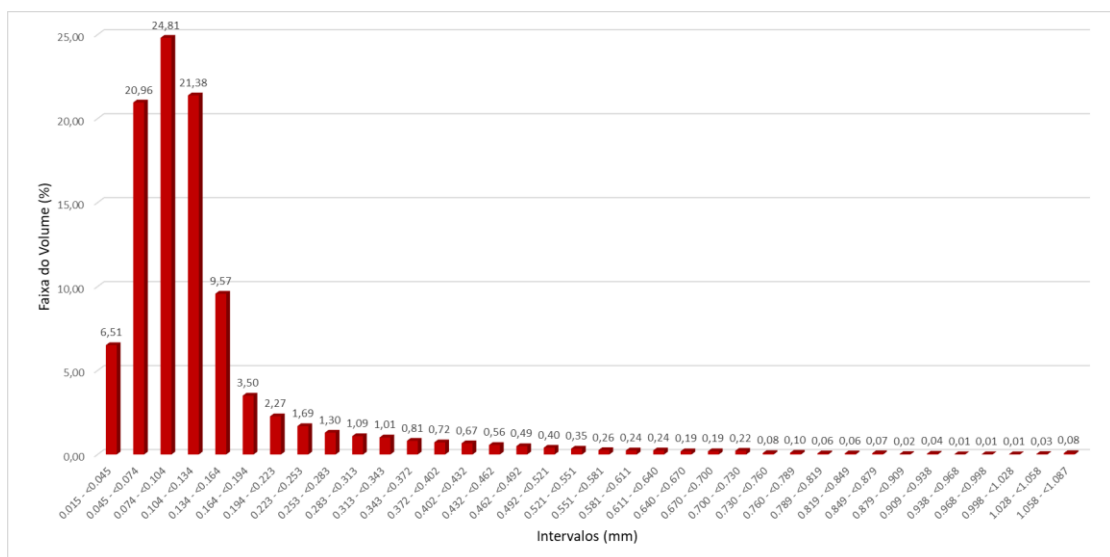


Figura 4.40 – Distribuição de Poros: Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm³

4.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 4.41 estão apresentadas as imagens feitas pelo MEV para um aumento de 70 vezes, na sequência as imagens mostram o rejeito puro e o rejeito com 40% de polímero em diferentes densidades. É possível notar que as partículas de rejeito são bastante angulares e com tamanhos de partículas bem variados, que corroboram com o resultado da análise granulométrica. Também fica visível que as partículas de rejeito se ordenam e se aglutinam com a adição de polímero e com o aumento da densidade, gerando uma espécie de homogeneidade na distribuição das partículas ao longo da superfície investigada.

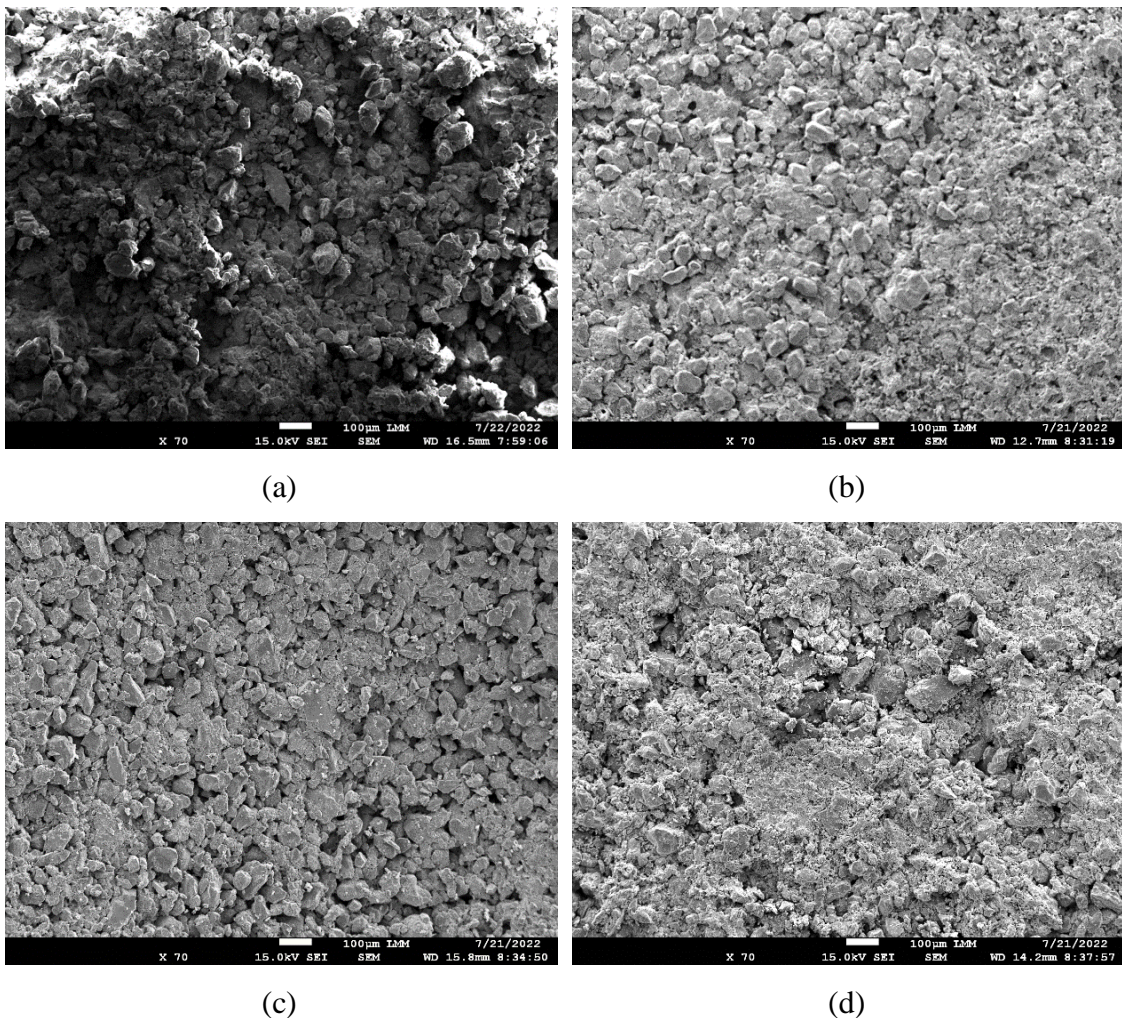


Figura 4.41 – MEV das Amostras Aumentadas 70 vezes (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,2 g/cm³; (c) Rejeito + 40% Polímero 2,3 g/cm³; (d) Rejeito + 40% Polímero 2,4 g/cm³

Na Figura 4.42 apresentam-se as imagens do MEV para as mesmas amostras de cima com um zoom de 190 vezes. Com estas imagens fica mais visível ainda o efeito aglutinante causado pela adição de polímero e pelo aumento da densidade dos compósitos, principalmente na Figura 4.42 (d) que apresenta a formação de um grumo conforme evidenciado pelo círculo vermelho.

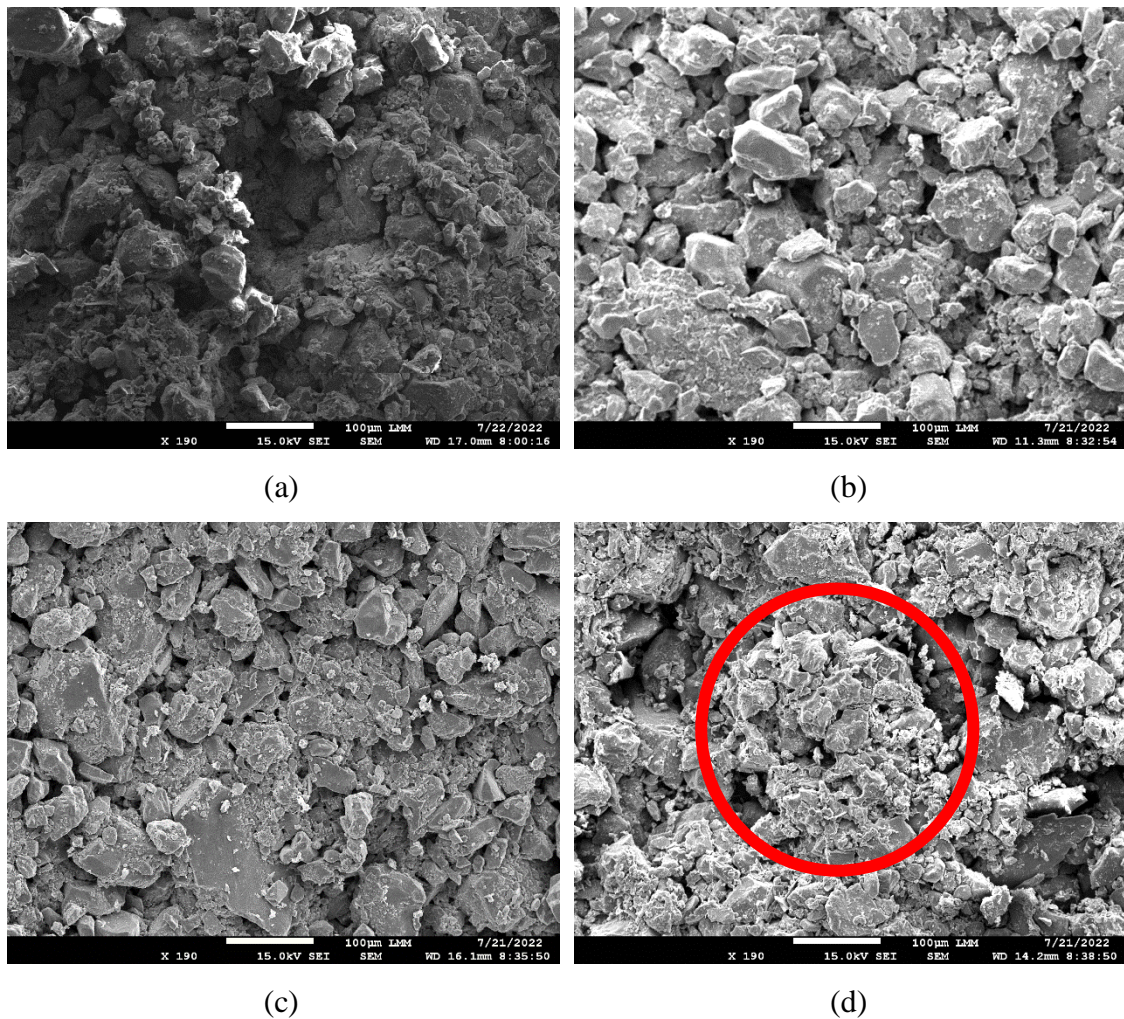


Figura 4.42 – MEV das Amostras Aumentadas 190 vezes (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,2 g/cm³; (c) Rejeito + 40% Polímero 2,3 g/cm³; (d) Rejeito + 40% Polímero 2,4 g/cm³

A Figura 4.43 apresenta as imagens do MEV aumentadas 500 vezes para as mesmas amostras anteriores. Na Figura 4.43 (b) é possível notar a formação de um menisco unindo duas partículas maiores de rejeito destacado pelo círculo vermelho, esta formação pode as vezes gerar pequenos vazios no compósito. Na Figura 4.43 (d) apresenta-se o grumo citado anteriormente com um maior zoom.

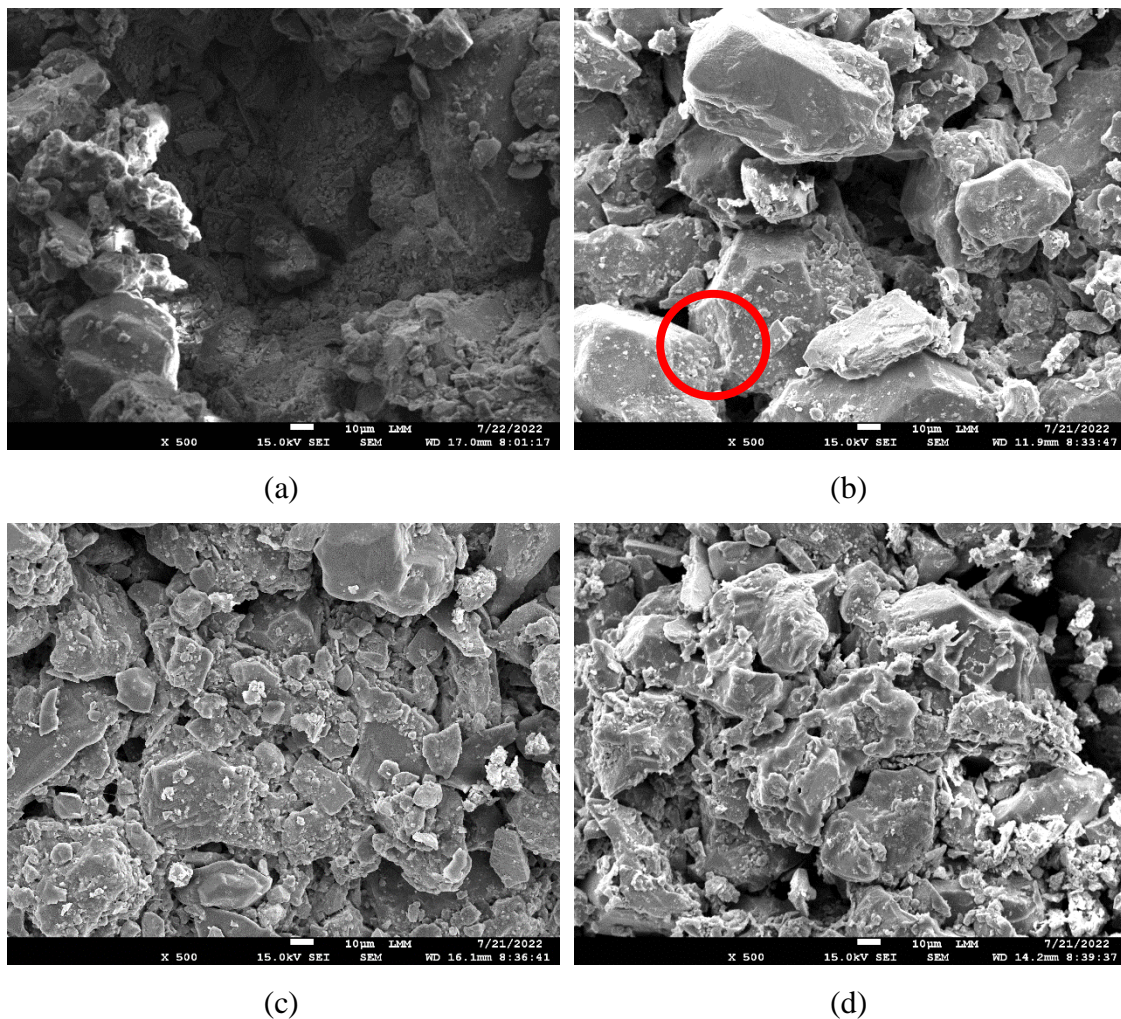


Figura 4.43 – MEV das Amostras Aumentadas 500 vezes (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero 2,2 g/cm³; (c) Rejeito + 40% Polímero 2,3 g/cm³; (d) Rejeito + 40% Polímero 2,4 g/cm³

4.6. Caracterização Química

4.6.1. Espectrometria de Florescência de Raio-X (XRF/EDX)

Na Figura 4.44 apresentam-se os resultados de XRF para o rejeito puro e os compósitos com 40% de polímero nas três densidades estudadas. O rejeito é composto em sua maioria por Ferro, Silício e Alumínio, com o aparecimento de menos de 1% de Cloro, Túlio e Manganês. Os compósitos também apresentam aproximadamente a mesma proporção do rejeito puro, com a diferença de que aparece também uma pequeníssima porcentagem de Enxofre e Potássio.

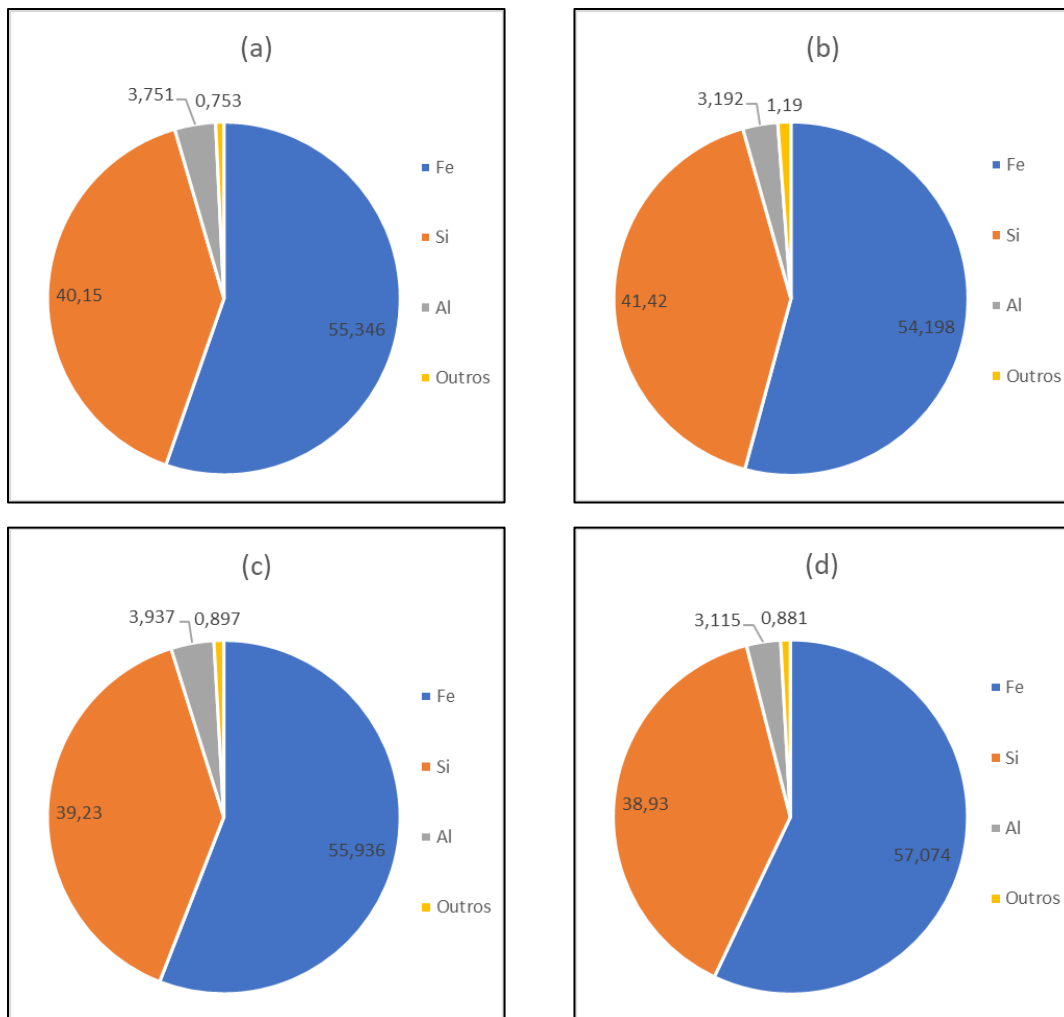


Figura 4.44 – Resultados de XRF (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% de Polímero 2,2 g/cm³; (b) Rejeito + 40% de Polímero 2,3 g/cm³; (b) Rejeito + 40% de Polímero 2,4 g/cm³

O único metal pesado que aparece neste rejeito e nos compósitos é o Manganês, em valores inferiores a 0,15%.

As autoras Silva (2020) e Carneiro (2020) realizaram a análise elementar CHN na solução poliméricas. O Resultado obtido apresenta que ele é composto em maioria por carbono (69,03%), seguido de hidrogênio (7,01%) e por fim nitrogênio (0,52%). É interessante destacar que a partir dessa composição observa-se que o polímero não seria agressivo ao meio ambiente.

4.6.2. Espectroscopia de Raio-X por Dispersão em Energia (EDS)

Abaixo estão apresentados os resultados do EDS na Figura 4.45. Eles reiteram o que foi apresentado pelo EDX com algumas informações a mais. Este ensaio detecta a presença de oxigênio e carbono, que não eram detectáveis no EDX, a aparição do carbono

é marginal e só é encontrada no compósito rejeito-polímero, o que se é esperado já que o polímero é composto por cadeias de carbono. A aparição do oxigênio também não é estranha, visto que os minerais Quartzo e Hematita possuem este elemento nas suas ligações e a aparição deste explica a mudança na proporção dos elementos detectados. Este ensaio não detectou nenhum outro elemento químico.

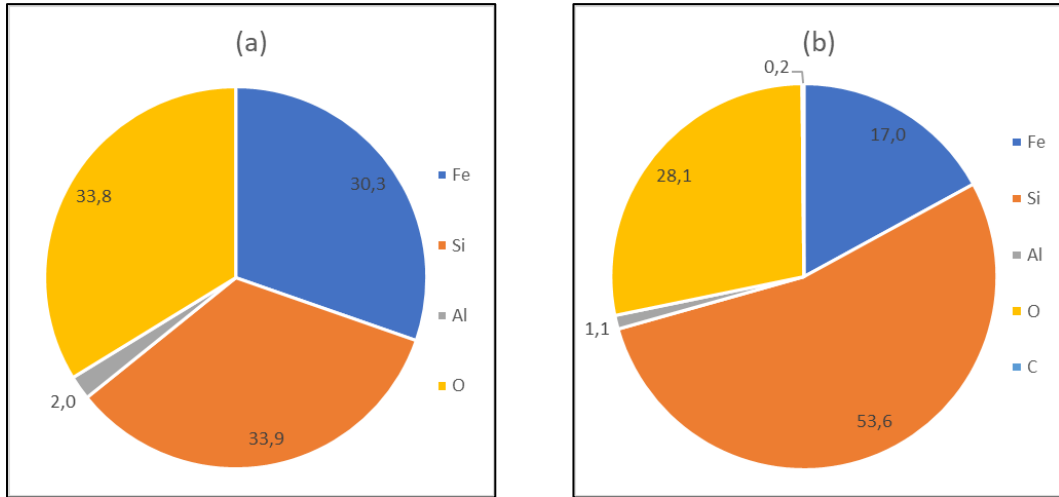


Figura 4.45 – Resultados EDS (a) Rejeito Puro; (b) Rejeito + 40% Polímero

4.7. Parâmetros Chave

O estudo dos parâmetros chave foi desenvolvido sobre as amostras em estado não saturado, situação comum nas estruturas geotécnicas, desta forma a relação entre a porosidade e o teor de polímero é mais apropriada para avaliação do comportamento mecânico de acordo com Consoli *et al.* (2007; 2019).

Para cálculo da porosidade (η) admitiu-se a contribuição das parcelas do polímero e do rejeito de acordo com:

$$\eta = 100 - 100 \cdot \frac{\left\{ \left[\frac{P \cdot \rho_d \cdot V_T}{(1 + P)} \cdot \frac{1}{d_p} \right] + \left[\frac{\gamma_d \cdot V_T}{(1 + P)} \cdot \frac{1}{\rho_{SR}} \right] \right\}}{V_T} \quad 4.1$$

Onde P é o teor polimérico na amostra; ρ_d a massa específica da amostra; d_p a densidade do polímero; ρ_{SR} a massa específica dos grãos de rejeito; V_T o volume total da amostra.

Para avaliar a influência do teor de polímero em um único índice, foi proposto um novo índice chamado de teor volumétrico de polímero (P_{iv}), conforme:

$$P_{iv} = \frac{V_P}{V_T} = \frac{m_P/d_P}{V_T} \quad 4.2$$

Onde V_P é o volume de polímero; V_T é o volume total da amostra; m_P é a massa de polímero; d_P é a densidade do polímero.

Na Figura 4.46 é apresentada curva gerada pela relação da RCS e a razão porosidade por teor polimérico para os compósitos de rejeito-polímero com tempo de cura de 28 dias.

- 40% de polímero 2,4 g/cm³ ○ 30% de polímero 2,4 g/cm³
- 40% de polímero 2,3 g/cm³ □ 30% de polímero 2,3 g/cm³
- ▲ 40% de polímero 2,2 g/cm³ △ 30% de polímero 2,2 g/cm³

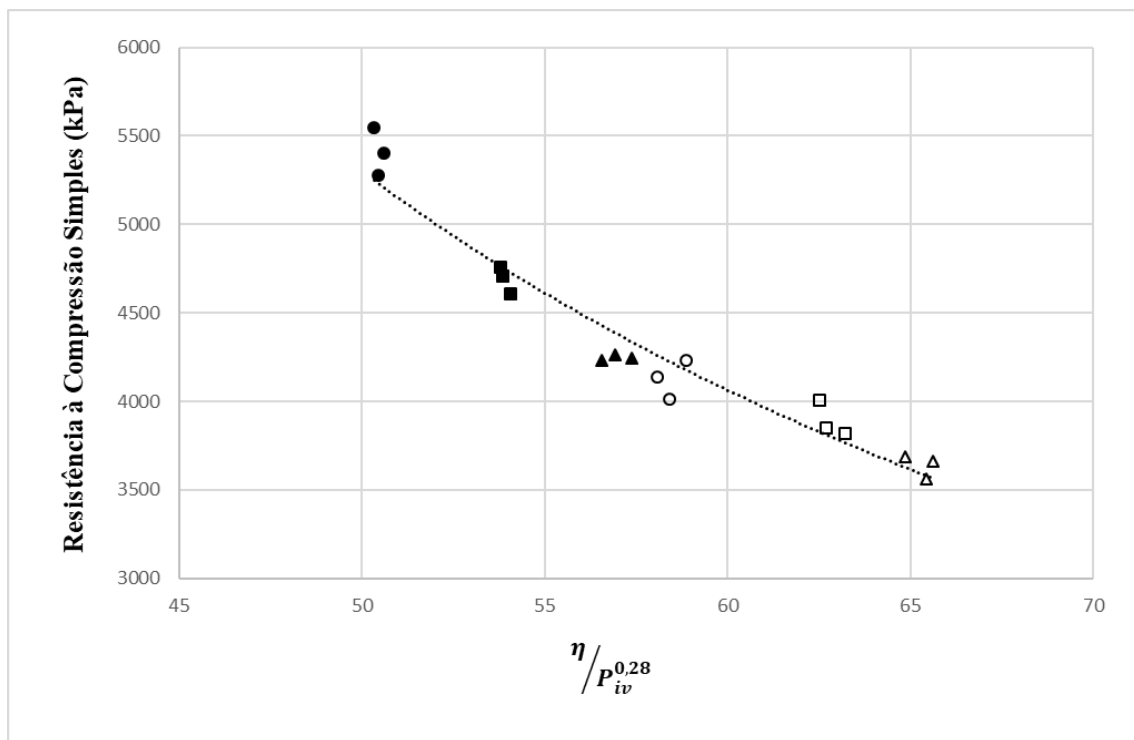


Figura 4.46 – Relação da RCS com a Razão Porosidade por Teor Polimérico

A relação entre os dados experimentais e o índice $\left(\eta/P_{iv}^{0,28}\right)$ proposto apresentou coeficiente de determinação R^2 com um valor bastante consistente, indicando a viabilidade do uso do índice para previsão da resistência a compressão simples para os compósitos rejeito-polímero. A Equação 4.3 apresentada é a relação encontrada:

$$RCS = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{P_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,456} \quad R^2 = 0,948 \quad 4.3$$

Na Figura 4.47 é apresentada curva gerada pela relação da tensão desvio $|\sigma - \tau|$ e a razão porosidade por teor polimérico para os compósitos de rejeito-polímero com tempo de cura de 28 dias.

- 40% de polímero 2,4 g/cm³ ○ 30% de polímero 2,4 g/cm³
- 40% de polímero 2,3 g/cm³ □ 30% de polímero 2,3 g/cm³
- ▲ 40% de polímero 2,2 g/cm³ △ 30% de polímero 2,2 g/cm³

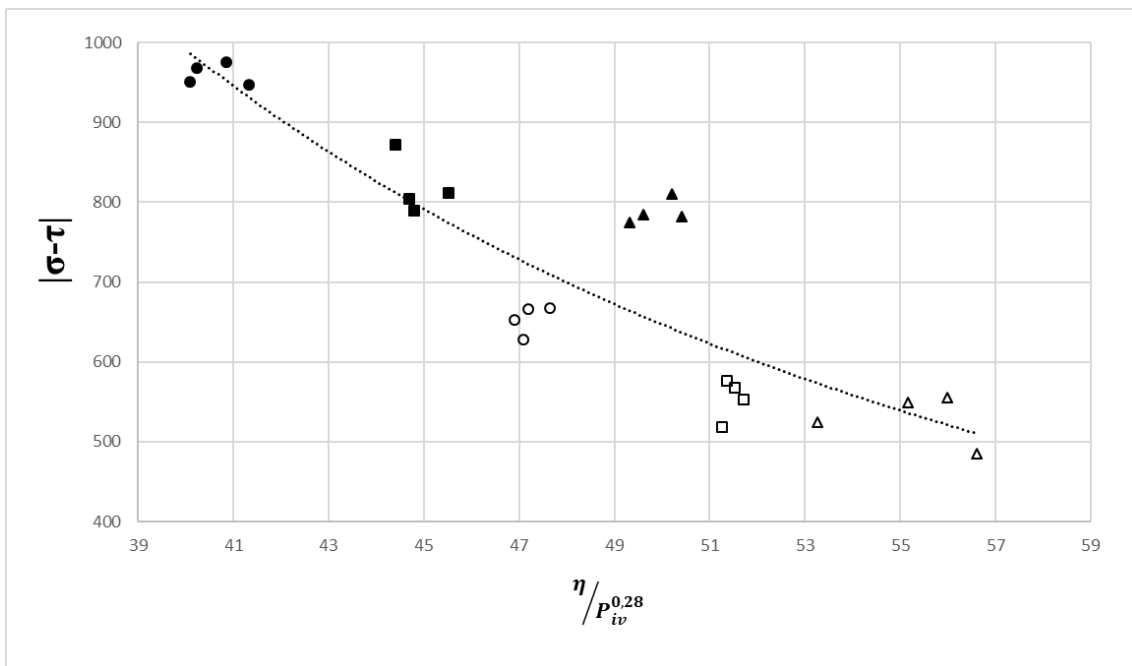


Figura 4.47 – Relação de $|\sigma - \tau|$ com a Razão Porosidade por Teor Polimérico

A relação entre os dados experimentais de cisalhamento direto e o índice $\left(\frac{\eta}{P_{iv}^{0,28}} \right)$ proposto apresentou coeficiente de determinação R^2 com um valor inferior ao da relação com RCS, mas ainda sim um valor aceitável para se realizar uma previsão da resistência ao cisalhamento para os compósitos rejeito-polímero. A Equação 4.4 apresentada é a relação encontrada:

$$|\sigma - \tau| = 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{P_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,913} \quad R^2 = 0,781 \quad 4.4$$

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa conduziu estudos para avaliar o comportamento físico-químico, mecânico, mineralógico e microestrutural de um rejeito de minério de ferro ultrafino estabilizado quimicamente com um copolímero acrílico-estirenado. Ademais, esta pesquisa propôs uma correlação matemática capaz de indicar os parâmetros de RCS e Tensão Desvio do compósito com a porosidade e o teor volumétrico de polímero.

O resultado de massa específica dos grãos do rejeito de minério de ferro estudado apresentou uma média de $3,23 \text{ g/cm}^3$, o que representa um valor um pouco acima da média dos valores encontrados em literatura. Este resultado pode ser explicado pelo fato de ser um rejeito ultrafino, ou seja, os grãos podem ser menores que os dos rejeitos encontrados em literatura, isto leva a uma tendência de apresentar uma quantidade maior de grãos por volume.

A análise granulométrica do rejeito classifica este rejeito de minério de ferro como uma areia bem graduada e uniforme, porém o comportamento do material se assemelha mais ao de uma argila, o que fica evidenciado pelo ensaio de cisalhamento direto onde as envoltórias de ruptura para o rejeito puro apresentaram coesão.

O ensaio de compactação foi bastante conturbado. O acréscimo de água ao rejeito em valores acima de 15% de teor de umidade cria uma estrutura que, ao receber o impacto do soquete, se torna fluida e escorrem pelas laterais do cilindro. Este fenômeno leva a perda de material, fazendo com que os corpos de prova compactados apresentem alturas inferiores com o acréscimo de água, o que impede de fazer uma comparação analítica conforme as normas. A adição de polímero contribuiu significativamente para este fenômeno. Desta forma, optou-se por utilizar o teor de umidade de 15% para se dar prosseguimento a pesquisa pelo fato de ser o teor mais próximo da umidade ótima a manter a integridade da estrutura dos corpos de prova.

Foram avaliadas seis dosagens de polímero diferentes aplicadas ao rejeito e todas as adições concederam ganho de resistência à compressão simples a este, visto que ao tentar romper corpos de prova de rejeito puro as células de carga não foram capazes de detectar resistência. Das dosagens estudadas, a de 40% concedeu o maior ganho de resistência e, levando em consideração custo benefício, a de 30% também foi considerada adequada para o estudo, devido ao seu bom desempenho em ganho de resistência mesmo com uma quantidade menor de polímero.

A adição de polímero nas dosagens de 30% e 40% ao rejeito foram avaliadas em três

diferentes densidades (2,2 g/cm³, 2,3 g/cm³ e 2,4 g/cm³) com tempo de cura ao ar de 28 dias. Em todos os casos a adição concedeu ganhos extremamente significativos para o rejeito, com ganhos progressivos com o aumento da densidade e com o aumento da dosagem de polímero. Os ganhos foram significativos de forma que rejeito puro não apresentou resistência detectável pelas células de carga disponíveis no laboratório e passou a apresentar RCS com ordem de grandeza na casa de 10³ kPa com a adição do polímero.

A mesma avaliação explicada no parágrafo anterior foi aplicada para os ensaios de cisalhamento direto. Este ensaio foi possível de ser realizado no rejeito puro e tornou possível ter uma comparação mais analítica dos ganhos pela adição de polímero ao rejeito. Os compósitos de rejeito-polímero apresentaram valores de tensões de pico que variam entre 4 a 16 vezes maior que do rejeito puro, na coesão e no ângulo de atrito das envoltórias de ruptura. A adição de polímero também alterou a forma das curvas de tensão cisalhante por deslocamento horizontal, com uma baixa tensão cisalhante nos deslocamentos iniciais, um pico bastante expressivo e deslocado para a esquerda e sem uma resistência pós-pico expressiva.

É verificada uma redução da permeabilidade das amostras quando comparadas as de rejeito puro com as de rejeito-polímero. Porém, constata-se que é uma redução pouco significativa, visto que os valores de coeficiente de permeabilidade se mantêm mesma ordem de grandeza de 10⁻⁶.

A partir dos resultados de DRX foi verificada a composição mineralógica do rejeito, majoritariamente formado por quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3), e com picos insipientes de caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), composição similar à encontrada por Santos (2018) e Carneiro (2020). Com a dosagem de 40% de polímero há o aparecimento de um pico insipiente de gibbsita ($Al(OH)_3$), provavelmente causado pela aglutinação das partículas com o polímero.

Os resultados obtidos pelos ensaios de microtomografia computadorizada evidenciaram a ocorrência do efeito de borda nos corpos de prova avaliados. Foi possível demonstrar que a adição de polímero ao rejeito concedeu uma diminuição de aproximadamente 2% na porosidade dos compósitos de rejeito + 40% de polímero quando comparados com o rejeito puro. Também foi aferível que com o aumento da densidade a parcela de Grãos + Polímero aumentava, o que indica que o polímero aglutina melhor quanto mais energia aplicada a ele.

Um outro fenômeno interessante que foi observável pela microtomografia

computadorizada foi a distribuição dos tamanhos dos poros. Com o aumento da densidade, tanto para o rejeito puro quanto para o rejeito-polímero, há uma redistribuição dos tamanhos dos poros, que levou ao aparecimento de poros maiores mesmo sem um aumento significativo de porosidade. Uma explicação para isso é o tipo de compactação aplicada ao material que, em conjunto com a alta angulosidade das partículas, pode dificultar um ordenamento dos grãos que favoreça o fechamento de poros.

Com as imagens geradas pelo MEV foi possível notar algumas interações entre partículas, tanto com o aumento da densidade quanto com a adição de polímero. É visível um certo ordenamento das partículas na superfície analisada com o aumento da densidade e adição de polímero, formação de aglomerados de partículas e a formação de meniscos entre grãos.

Os resultados de EDX mostram que o rejeito é composto em sua maioria por Ferro, Silício e Alumínio, com o aparecimento de menos de 1% de Cloro, Túlio e Manganês. O compósito rejeito-polímero também apresentou mais ou menos a mesma proporção dos elementos do rejeito puro, com a diferença de que aparece também uma pequeníssima porcentagem de Enxofre e Potássio.

O EDS é um ensaio detecta a presença de oxigênio e carbono, que não eram detectáveis no EDX, por conta disso há uma redistribuição das porcentagens de elementos químicos encontrados no rejeito e nos compósitos rejeito-polímero. No mais, os elementos encontrados são os mesmos do EDX.

Por fim, foi proposto avaliar a existência de um parâmetro chave que controle o comportamento dos compósitos, a partir dos resultados mecânicos pela razão porosidade por teor polimérico. Estas análises levaram ao resultado de que há uma curva única para obter os valores de RCS para o compósito rejeito-polímero para o tempo de cura ao ar de 28 dias com um R^2 de 0,948. Também foi encontrada uma única curva para os valores absolutos de tensão desvio para o compósito rejeito-polímero para o tempo de cura ao ar de 28 dias com um R^2 de 0,781.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar o comportamento do polímero em outros tipos rejeitos de mineração;
- Avaliar o efeito da adição de polímero ao rejeito no comportamento mecânico mediante ensaios triaxiais e os efeitos da poropressão na resistência do compósito;
- Elaborar modelos numéricos para avaliação e previsão do comportamento mecânicos dos compósitos rejeito-polímero;
- Realizar ensaios em grande escala ou escala piloto para avaliar o comportamento dos compósitos rejeito-polímero;
- Analisar o desgaste do material exposto a intempéries, solicitações cíclicas e contínuas;
- Desenvolver estudos na perspectiva de criação de uma teoria própria para ser aplicada aos rejeitos de mineração, uma Mecânica dos Rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica: NBR 6508**. Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457**. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). **NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016-a). **Solo – Análise granulométrica: NBR 7181**. Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016-b). **Solo - Ensaio de Compactação: NBR 7182**. Rio de Janeiro, 10p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). **NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro, 16p.
- AGÊNCIA BRASIL (2016), **Desastre em Mariana é o maior acidente mundial com barragens em 100 anos**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-01/desastre-em-mariana-e-o-maior-acidente-mundial-com-barragens-em-100-anos>>. Acesso em: 12 de Outubro de 2022.
- ALELVAN, G. M. (2022). **Análise Mecânica e Microestrutural de Rejeito de Minério de Ouro Estabilizado com Solução Polimérica**. Tese de Doutorado, Publicação G.DM – 343/2022 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 171p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2011). **ASTM D3080/ASTM D3080M-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. Pennsylvania, USA, 9 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2014). **D5550: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer**. Pennsylvania, USA, 5 p.
- BACHINI, M. S., ISMAIL, A., NASERALAVI, S. S. & FIROOZI, A. A. (2016). **Performance Evaluation of Road Base Stabilized with Styrene-Butadiene Copolymer Latex and Portland Cement**. Elsevier, Construction and Building Materials, 16p.

- CAMPANHA, A. (2011) **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 106 p.
- CMBH - CÂMARA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE (2019). **Maravilhas II só voltará a operar após laudo previsto para setembro**. Belo Horizonte, 18 de jun. de 2019. Disponível em: <<https://www.cmbh.mg.gov.br/comunica%C3%A7%C3%A3o/not%C3%ADcias/2019/06/maravilhas-ii-s%C3%B3-voltar%C3%A1-operar-ap%C3%B3s-laudo-previsto-para-setembro>>. Acesso: 11 de out. de 2021.
- CARNEIRO, A. A. (2020). **Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno** Tese de Doutorado, Publicação G.DM- 162/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.
- CONSOLI, N.C., THOMÉ, A., DONATO, M., GRAHAM, J. (2008). **Loading tests on compacted soil, bottom-ash and lime layers**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 161(GE1): 29–38. doi:10.1680/geng.2008.161.1.29.
- CONSOLI, N.C., DALLA ROSA, F., FONINI, A. (2009). **Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(12): 1846–1856. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000158.
- CONSOLI, N.C.; NIERWINSKI, H.P.; SILVA, A.P. e SOSNOSKI J. (2017). **Durability and strength old fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends**. Geotextiles and Geomembranes. 45(2): 98-102.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994). DNER-ME 228/94 “**Solos – compactação em equipamento miniatura**”.
- FAHEY, M., HELINSKI, M., FOURIE, A. (2009). **Some aspects of the mechanics of arching in backfilled stopes**. Canadian Geotechnical Journal, 46(11): 1322–1336. doi:10.1139/T09-063.
- FESTUGATO, L., CONSOLI, N.C., FOURIE, A. (2015). **Cyclic Shear Behaviour of Fibre Reinforced Mine Tailings**. Geosynthetics International, 22(2): 196-206.
- FILHO, H.C.S., MARTINS, C.G., MENDES, R.J.W., DORNELLES, L. E., CONSOLI, N. C. (2021). **The Effect of Key Parameters on the Strength of a Dispersive Soil Stabilized with Sustainable Binders**. Geotech Geol Eng 39, 5395–5404. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01833-9>.
- CONSOLI, N.C., SILVANO, L.W., LOTERO, A., FILHO, H.C.S., MONCALEANO, C.J., CRISTELO, N., (2022). **Key parameters establishing alkali activation effects on stabilized rammed earth**. Constr. Build. Mater. 345, 128299, <https://doi.org/10.1016/j.constrbuil.2022.128299>.

- GRASSE, B. P., SONCIM, S. P., ALMEIDA, M. O., OLIVEIRA, C. A. S., BELOTTI, F. M. (2019). **Avaliação do comportamento geotécnico de um solo laterítico estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro**. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú, SC, 12p.
- HEAD, K.H. (1994). **Manual of Soil Laboratory Testing – Volume 2**. John Wiley & Sons, New York, USA, 440 p.
- HELINSKI, M., FAHEY, M., FOURIE, A. (2011). **Behavior of cemented paste backfill in two mine stopes: measurement and modeling**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(2): 171–182. doi:10.1061/(ASCE)GT. 1943-5606.0000418.
- HUDSON-EDWARDS, K.A.; JAMIESON, H.E. & LOTTERMOSER, B.G., (2011). **Mine Wastes: Past, Present, Future**. Elements, 7: 375–380.
- IBGM – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS (2019). **A Mineração de Ouro no Brasil**. Instituto Brasileiro de Gemas & Metais Preciosos. Disponível em: <<https://ibgm.com.br/a-mineracao-de-ouro-no-brasil/>>; Acesso em: 12 de Setembro de 2022.
- KUMAR, S. (2001). **Reducing liquefaction potential using dynamic compaction and construction of stone columns**. Geotechnical and Geological Engineering, 19:169–182. doi:10.1023/A:1016672106067.
- LARA, L. L. D., QUEIROZ, B. G., SONCIM, S. P., ALMEIDA, M. O., OLIVEIRA, C. A. S., BELOTTI, F. M. (2018). **Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, Rio Grande do Sul, 12 p.
- LI, M., FANG, H., DU, M., ZHANG, C., SU, Z., WANG, F. (2020). **The behavior of polymer-bentonite interface under shear stress**. Construction and Building Materials, (248) 10 p.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A., (2010). **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2010). **Plano nacional de mineração 2030 Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Brasília. 180p.
- RODRIGUES, K. H. P. (2018) **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas – Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto, MG. 108 p.

- RODRÍGUEZ, R.P. & GARCÍA, A.C., (2006). **Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente**. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, 758p.
- SANTOS, T. G (2018). **Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-312/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.
- SERVI, S.; LOTERO, A.; SILVA, J. P. S.; BASTOS, C.; CONSOLI, N. C. (2022). **Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking**. Construction and Building Materials, (349) 14 p.
- SILVA, N. A. B. S. (2020). **Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-339/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.
- SOSA, E.R. (2016). **Caracterização e aproveitamento dos rejeitos oriundos de processos hidrometalúrgicos do níquel e cobalto com um enfoque geoambiental**. Tese de Doutorado em Geotecnia. Publicação: G.TD-123/16. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170p.
- SOTOMAYOR, J.M.G. (2018). **Avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado de rejeitos de minérios de ferro e de ouro reforçados com fibras de polipropileno**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 184p.
- TARAZONA C. F., BARBOSA, M. C. (2011), **Comparação das Características Geotécnicas de Alguns Rejeitos de Mineração Brasileiros**. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO)/Geossintéticos, Belo Horizonte, MG, 8p.
- TRIBUNAL REGIONAL DO TRABALHO DA 23ª REGIÃO (2022), **Rompimento em Brumadinho, maior Acidente de Trabalho do Brasil, Completa Três Anos**. Disponível em: <<https://portal.trt23.jus.br/portal/noticias/m%C3%BAsica-do-dia-rompimento-em-brumadinho-maior-acidente-de-trabalho-do-brasil-completa-tr%C3%AAs>>; Acesso em: 12 de Outubro de 2022.
- WIJEWICKREME, D., SANIS, M. V. & GREENAWAY, R. G. (2005). **Cyclic shear response of fine-grained mine tailings**. Can. Geotechn. J., 42:1408-1421.
- YUNHONG, C.; FEI, H., SHANSHAN, Q., WENCHUAN, L., RUI, L., GUANGLU, L. (2020). **Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings**. Construction and Building Materials. 242. 9p.