

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

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM REJEITO DE
MINÉRIO DE FERRO ESTABILIZADO COM POLÍMERO E
DO COMPÓSITO REJEITO-POLÍMERO REFORÇADO COM
FIBRAS DE POLIPROPILENO**

ANDRESSA DE ARAUJO CARNEIRO

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM-162/2020

BRASÍLIA - DF, 15 DE JULHO DE 2020

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

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO
ESTABILIZADO COM POLÍMERO E DO COMPÓSITO REJEITO-POLÍMERO
REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

ANDRESSA DE ARAUJO CARNEIRO

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ALFRAN SAMPAIO MOURA, D.Sc. (UFC)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**JUAN MANUEL GIRÃO SOTOMAYOR, D.Sc. (ITV/VALE S.A.)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 15 DE JULHO DE 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

CARNEIRO, ANDRESSA DE ARAUJO;

Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno (Distrito Federal) 2020.

xviii, - 146., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2020)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Novos Materiais Geotécnicos 2. Rejeito de Minério de Ferro

3. Obras Geotécnicas 4. Estabilização

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: ANDRESSA DE ARAUJO CARNEIRO.

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: **Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno .**

GRAU / ANO: Doutor /2020.

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

Andressa de Araujo Carneiro

Andressa de Araujo Carneiro

SGAN 912, Módulo C, Bloco G, Apt 15, Asa Norte
70.790-123 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por mais esta vitória.

À minha família, em especial aos meus pais Raimundo César e Mironeide, ao meu irmão César pelo apoio e carinho.

Ao Eduardo Negry, por tanto apoio, carinho, companheirismo, ajuda, atenção e paciência, principalmente nesta etapa final. Meu muito obrigada por seu cuidado e por tornar tudo tão melhor.

Aos meus amigos, que mesmo distantes me apoiaram e ajudaram muito através de palavras, carinho e amizade, em especial Daniele Teixeira, Julliana Aires, Rachel Mesquita, Daniela Lessa, Gabriela Meireles, Daniela Godoy, Paloma Medeiros, Igor Clemente, Joanes Souza.

Aos amigos que fiz em Brasília, Fatiane Ribeiro, Mari, Fernanda Vieira, Daniela Percinoto, Renata Trindade, Renata Miranda, Mirana, Luciana Chan, Cristina Colaço, Luiza Estela que me ajudaram a levar com maior leveza os momentos difíceis. Em especial, Pollyana Bezerra muito obrigada por todo carinho e ajuda.

Ao Chan Kou agradeço pelas diversas ajudas, receptividade, atenção e por sua amizade.

À Ana Carolina, obrigada pelas ajudas no laboratório e também fora da UnB, obrigada por sua amizade.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e seus professores por apoiarem e contribuírem com a realização desta pesquisa. Ao professor Manoel Porfírio, professor Márcio Muniz e aos profissionais do Infralab, por autorizar e ajudar com o uso dos equipamentos.

À professora Michéle Casagrande, minha orientadora, por desempenhar tão bem o papel de professora, orientadora e amiga separando muito bem cada um deles. Muito obrigada por toda sua ajuda, paciência, orientação e confiança no desenvolvimento desta pesquisa que mesmo diante de todos percalços finalizamos no prazo. Sou muito grata por todos ensinamentos.

À Giovanna Alelvan, agradeço por sua amizade, prestatividade, carinho, atenção, parceria e ajuda desde início e principalmente na etapa final. Obrigada pelos momentos de descontração e apoio!

Aos meus irmãos acadêmicos, muito obrigada pela ajuda e apoio, principalmente ao José Wilson, que além de ajudar nos proporciona tantas risadas e ao Adriano Malko.

À Nathalia Boaventura, a caçulinha, obrigada por ser minha parceira na pesquisa e ensaios, mesmo no 320v você ajudou demais para concretização desta pesquisa. Obrigada por ajudar dentro e fora da universidade. Muito Obrigada!

Aos meus amigos e colegas da Geotecnia que me ajudaram sempre que precisei, principalmente aos que fazem parte do laboratório, Nara, Andrea, Jair, Michael, Alonso, Débora, Julian, Rodrigo Pierozan, Carlos Cuartas. Aos técnicos Saimon, Rogério e o Seu Arthur que sempre foi tão prestativo.

À empresa WaterFlows, em especial ao Newton Vasconcelos, por todo apoio nessa pesquisa.

Aos membros da banca examinadora Prof. Alfran, Prof. Luís Fernando e Juan por suas contribuições para melhoria da tese.

Ao DER-DF pela ajuda com equipamentos para realização dos ensaios.

Ao CAIQ pelo apoio nas análises químicas. Ao departamento de Geologia, especialmente ao professor João Carlos Abreu e ao Rafael, nas análises geológicas. Ao departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, especialmente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Confocal Laser e ao professor Cosme Roberto Moreira da Silva e técnico Ivan Banho de Andrade Reis, pela ajuda nas análises microestruturais. Ao departamento de pós-graduação de Biologia, à técnica Yngrid, pela disponibilidade na metalização das amostras.

À Universidade Federal do Piauí, em especial aos meus colegas do DRHGSA pelo apoio para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

A falta de materiais com propriedades adequadas e a necessidade de reduzir impactos ambientais relacionados à sua extração tem criado uma demanda por novas técnicas de melhoria de materiais geotécnicos. A adição de polímeros em materiais granulares, como rejeitos de mineração, é uma técnica de melhoria de solos que propicia ganho de resistência mecânica ao compósito, reduzindo impactos ao meio ambiente. Esta pesquisa visa o estudo de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e deste compósito reforçado com fibras de polipropileno (0,5% em relação ao peso do rejeito seco, distribuídas aleatoriamente), com a avaliação da influência da dosagem de polímero (1:4 e 1:2 em proporção de solução polimérica), do tempo de cura e da solicitação de carga, para aplicabilidade em taludes, como camadas de revestimento em estradas não pavimentadas e aterros, por exemplo. A análise se deu nos âmbitos físico, mecânico, químico, ambiental e microestrutural. O programa experimental consistiu em ensaios de compactação, compressão não confinada, cisalhamento direto convencional e de superfície polida, tração por compressão diametral, triaxial cíclico de cargas repetidas (módulo de resiliência) e desgaste em simulador de tráfego laboratorial. Ensaio de sucção total, dano por umidade induzida, lixiviação, microscopia eletrônica e análises químicas também foram realizados nos compósitos, para melhor entendimento do comportamento destes. A estabilização do rejeito com polímero foi positiva, tanto para solicitações estáticas, como cíclicas. Observou-se uma mudança de comportamento das curvas tensão-deslocamento e incremento nos valores dos parâmetros de resistência dos compósitos rejeito-polímero, quanto maior o teor de polímero e com o aumento do tempo de cura, quando comparados com o rejeito de minério de ferro sem estabilização. A inserção de fibras influenciou o comportamento do compósito rejeito-polímero na atenuação da rigidez e estabilização da resistência residual. Os resultados de módulo de resiliência e desgaste, para a aplicação do compósito rejeito-polímero como camada de revestimento em estradas não pavimentadas, se mostraram mais efetivos para o teor de 1:2 de polímero. Devido à alta quantidade de resíduos gerados pelas atividades mineradoras, este estudo propõe novas aplicabilidades geotécnicas para o rejeito de minério de ferro, com consideráveis benefícios, tanto técnicos quanto ambientais.

ABSTRACT

The lack of materials with adequate properties and the need to reduce the environmental impacts related to their extraction has created a demand for new techniques for improving geotechnical materials. Incorporating polymers in granular materials such as mining tailing is a stabilization technique used to increase the composite mechanical strength, also addressing environmental concerns. This research aims to study a polymer stabilized iron ore tailings and this composite reinforced with polypropylene fibers (0.5% in relation to the dry tailings weight, randomly distributed), with the evaluation of the influence of the polymer dosage (1: 4 and 1: 2 in proportion of polymeric solution), curing time and bearing capacity for applicability on slopes, such as coating layers on unpaved roads and embankments, for example. The analysis took place in the physical, mechanical, chemical, environmental and microstructural areas. The experimental program consisted of compaction tests, simple compression, conventional shear and polished surface shear, diametral tensile strength, cyclic triaxial repeated loads (resilience module) and laboratory traffic simulator. Tests of total suction, moisture damage induced, leaching, electron microscopy and chemical analyzes were also performed on the composites, to better understand their behavior. The stabilization of tailing with polymer was positive, both for static and cyclical stresses. There was a change in the behavior of the stress-displacement curves and an increase in the values of the resistance parameters of the polymer-tailing composites, the higher the polymer content and the increase in the curing time, when compared with the ore tailings iron without stabilization. The insertion of fibers influenced the behavior of the polymer-tailing composite in attenuating stiffness and stabilizing residual strength. The results of resilience and wear modulus, for the application of the polymer-tailing composite as a coating layer on non-paved roads, were more effective for the 1:2 polymer content. Due to the high amount of waste generated by mining activities, this study proposes new geotechnical applicability for iron ore tailings, with considerable benefits, both technical and environmental.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3	ESTRUTURA DA TESE	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	ATIVIDADES DE MINERAÇÃO	5
2.2	BARRAGENS PARA REJEITO DE MINERAÇÃO	7
2.3	PESQUISAS COM REJEITOS DE MINERAÇÃO	9
2.4	ESTABILIZAÇÃO E ADITIVOS	11
2.5	PESQUISAS COM POLÍMEROS	15
2.6	SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS	20
2.6.1.	HISTÓRICO.....	20
2.6.2.	FATORES DE INFLUÊNCIA DA FIBRA	23
2.6.3.	ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES PELA INCLUSÃO DE FIBRAS	24
3.	MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA	27
3.1	MATERIAIS	27
3.1.1.	REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	27
3.1.2.	POLÍMERO	28
3.1.3.	FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	29
3.1.4.	MOLDAGEM DAS AMOSTRAS.....	30
3.2	ENSAIOS REALIZADOS	35
3.2.1.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	35
3.2.1.1	COMPACTAÇÃO	35
3.2.1.2.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA.....	36
3.2.1.3.	CISALHAMENTO DIRETO.....	36
3.2.1.4.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	38
3.2.1.5.	TRIAxIAL CÍCLICO DE CARGAS REPETIDAS - MÓDULO DE RESILIÊNCIA	39
3.2.1.6.	DANO POR UMIDADE INDUZIDA	42
3.2.1.7.	SIMULADOR DE TRÁFEGO LABORATORIAL - HAMBURG WHEEL-TRACK ADAPTADO	44
3.2.2.	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA.....	45

3.2.2.1.	SUCÇÃO TOTAL.....	45
3.2.2.2	EXPANSÃO.....	46
3.2.2.3.	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	46
3.2.2.4.	ABSORÇÃO DE ÁGUA	47
3.2.3.	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-AMBIENTAL	48
3.2.3.1.	ESPECTROMETRIA DE FLORESCÊNCIA DE RAIOS X	48
3.2.3.2.	ANÁLISE ELEMENTAR CHN	48
3.2.3.2.	ANÁLISE DO LIXIVIADO	49
3.2.4.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA-ESTRUTURAL	50
3.2.4.1.	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	50
3.2.4.2.	MICROSCOPIA ÓPTICA	51
3.2.4.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	52
3.2.4.4.	ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS).....	53
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	54
4.1.1.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	54
4.1.2.	PESO ESPECÍFICO	55
4.1.3.	DENSIDADE RELATIVA DOS GRÃOS.....	55
4.1.4	LIMITES DE CONSISTÊNCIA	56
4.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	56
4.2.1	COMPACTAÇÃO	56
4.2.3.	CISALHAMENTO DIRETO	63
4.2.4.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	91
4.2.5.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	92
	MÓDULO DE RESILIÊNCIA – INDICADO PARA SOLOS	92
	MÓDULO DE RESILIÊNCIA –INDICADO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	103
4.2.6.	DANO POR UMIDADE INDUZIDA	103
4.2.7.	ENSAIO HAMBURG WHEEL-TRACK – SIMULADOR DE TRÁFEGO.....	105
4.3.	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA.....	106
4.3.1.	ENSAIO DE SUCÇÃO	106
4.3.2.	EXPANSÃO.....	107
4.3.3.	ENSAIO DE PERMEABILIDADE	107
4.3.4.	ENSAIO DE ABSORÇÃO	108
4.4.	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-AMBIENTAL	109

4.4.1.	ESPECTROMETRIA DE FLORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	109
4.4.2.	ANÁLISE ELEMENTAR DE CNH.....	111
4.4.3.	ANÁLISE DO LIXIVIADO	111
4.5.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA-ESTRUTURAL.....	113
4.5.1.	DIFRAÇÃO DE RAIOS – X (DRX).....	113
4.6.	MICRÓSCOPIA ÓPTICA	115
4.7.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	117
4.8.	ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)	123
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	129
5.4.	CONCLUSÕES.....	129
5.5.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Componentes toxicológicos do produto (Fonte: Fabricante)	28
Tabela 3.2. Características técnicas das fibras de polipropileno.....	29
Tabela 3.3. Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (AASHTO T 307/99).	41
Tabela 3.4. Critérios das normas e adotados para realização do ensaio.....	45
Tabela 4.1. Índices físicos do Rejeito de minério de ferro.....	55
Tabela 4.2. Resultados do Proctor Normal	57
Tabela 4.3. Resultados de RCC para compósitos rejeito-polímero em diferentes tempos de cura	58
Tabela 4.4. Resultados de RCC para compósitos rejeito-polímero-fibra em diferentes tempos de cura	59
Tabela 4.5. Valores dos parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro (R) e compósitos rejeito-polímero (RP) e rejeito-polímero-fibra (PP) nas tensões de pico e residual.	67
Tabela 4.6. Valores dos parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósito rejeito-polímero após ensaio de cisalhamento direto com superfície polida.....	72
Tabela 4.7. Valores dos parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro nas tensões de pico e residual.	76
Tabela 4.8. Tabela com os parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósitos.....	81
Tabela 4.9. Tabela com os parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósitos.....	84
Tabela 4.10. Tabela com os parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósitos.....	88
Tabela 4.11. Resultados do valor da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos.....	91
Tabela 4.12. Média dos valores de MR.....	93
Tabela 4.13. Constantes de regressão para tensão confinante e desvio	96
Tabela 4.14. Constantes de regressão e R^2 para o modelo composto.	102
Tabela 4.15. MR adaptado de misturas asfálticas dos compósitos.	103
Tabela 4.16. Resultados da determinação por umidade induzida	104
Tabela 4.17. Valores do ensaio de sucção total.....	106

Tabela 4.18. Valores de coeficiente de permeabilidade (k) do rejeito puro e compósitos.....	108
Tabela 4.19. Valor de absorção dos compósitos.	109
Tabela 4.20. Resultado das análises do lixiviado dos compósitos	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. a) Materiais utilizados rejeito e polímero, b) Rejeito e polímero misturados, c) Corpo de prova moldado.	29
Figura 3.2. Fibras de polipropileno.	29
Figura 3.3. a) Materiais utilizados rejeito, fibra e polímero, b) Rejeito e fibra desfiada, c) Rejeito, fibra e solução polimérica misturados, d) Corpo de prova moldado.	30
Figura 3.4. Etapas de moldagem, desmoldagem e cura ao ar do compósito.	31
Figura 3.5. Corpo de prova utilizado para realização dos referidos ensaios.	31
Figura 3.6. Corpo de prova utilizado para realização do ensaio de sucção.	32
Figura 3.7. a) Polimento realizado com fio de nylon resistente; b) regularização da superfície; c) caixa após polimento.	33
Figura 3.8. Corpo de prova moldado para ensaios adaptados em mistura asfáltica.	33
Figura 3.9. Corpo de prova gerado para ensaio de umidade induzida.	34
Figura 3.10. Corpo de prova usado para ensaio de simulador de tráfego.	34
Figura 3.11. Corpo de prova e equipamento utilizado para ensaio de MEV e fluorescência de Raio-X.	35
Figura 3.12. Prensa utilizada para realização do ensaio.	36
Figura 3.13. a) Equipamento de cisalhamento direto; b) posição dos instrumentos e detalhe do ensaio corpo de prova utilizado para realização do ensaio de sucção.	37
Figura 3.14. (a) Prensa utilizada para realização do ensaio; b) corpo de prova após ruptura. .	38
Figura 3.15. Equipamento triaxial cíclico com corpo de prova sendo ensaiado.	39
Figura 3.16. Ensaio para determinação do MR para mistura asfáltica com detalhe para o corpo de prova.	42
Figura 3.17. Procedimento da realização do ensaio de dano por umidade induzida.	43
Figura 3.18. a) Prensa utilizada para realização do ensaio; b) Corpo de prova reforçado com fibra rompido após ensaio.	43
Figura 3.19. DWT - Double Wheel Tracker.	44
Figura 3.20. Equipamento utilizado para obtenção de valores de sucção total.	46
Figura 3.21. Materiais e métodos para a determinação do coeficiente de permeabilidade, carga constante e variável respectivamente.	47
Figura 3.22. Método para determinação da absorção de água dos compósitos.	47
Figura 3.23. Lixiviado coletado.	49
Figura 3.24. Difratômetro de raios-X, sendo indicada amostra de rejeito em pó.	51

Figura 3.25. Imagens obtidas pelo microscópio óptico rejeito puro e com solução polimérica, aumento de 40x.	52
Figura 3.26. Ensaio de microscopia eletrônica de varredura a) dados obtidos durante um ensaio b) compósito rejeito polímero e fibra e compósito rejeito polímero c) equipamento de MEV.	53
Figura 4.1. Curva granulométrica do rejeito de minério de ferro.	54
Figura 4.2. Densidade relativa dos grãos de rejeito (Gs).	55
Figura 4.3. Curvas de compactação Proctor Normal para o rejeito de minério de ferro e os compósitos solo-polímero (RP).....	56
Figura 4.4. Curvas RCC x Def. Axial referentes aos compósitos rejeito-polímero de acordo com tempo de cura.	59
Figura 4.5. Curvas RCC x Def. Axial referentes aos compósitos rejeito-polímero de acordo com tempo de cura.	61
Figura 4.6. Curvas RCC x Dias de cura referentes aos compósitos.....	61
Figura 4.7. Corpos de prova com 28 dias de cura (a) com 1:4 de solução polimérica (b) com 1:2 de solução polimérica (c) com 1:4 de solução polimérica e fibras (d) com 1:2 de solução polimérica e fibras.	62
Figura 4.8. Gráficos de cisalhamento direto em rejeito de minério de ferro puro e compósitos rejeito-polímero (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	64
Figura 4.9. Gráficos de cisalhamento direto em rejeito de minério de ferro puro e compósitos rejeito-polímero-fibra (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	65
Figura 4.10. Envoltórias de resistência para rejeito e compósitos rejeito-polímero (a) tensão de pico e (b) tensão residual.....	66
Figura 4.11. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.....	69
Figura 4.12. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibras (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	70
Figura 4.13. Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto com superfície polida, para rejeito de minério de ferro e compósito rejeito-polímero.....	71
Figura 4.14. Gráficos de cisalhamento direto de rejeito de minério de ferro puro e compósitos (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	73
Figura 4.15. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibras (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	74

Figura 4.16. Envoltórias de resistência para rejeito e compósito rejeito-polímero com solução polimérica 1:2 (a) tensão de pico e (b) tensão residual.	75
Figura 4.17. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibras (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	78
Figura 4.18. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibra (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.	79
Figura 4.19. Envoltórias do ensaio de cisalhamento direto com rejeito de minério de ferro...	80
Figura 4.20. Gráficos de cisalhamento direto com rejeito de minério de ferro para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.	82
Figura 4.21. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida no rejeito de minério de ferro para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.	82
Figura 4.22. Envoltórias do ensaio de cisalhamento direto com rejeito de minério de ferro e compósitos rejeito-polímero.....	83
Figura 4.23. Gráficos de cisalhamento direto no rejeito de minério de ferro para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.	85
Figura 4.24. Gráficos de cisalhamento direto no rejeito de minério de ferro com inserção de fibra em superfície polida para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.....	85
Figura 4.25. Envoltórias do rejeito de minério de ferro com inserção de fibra em superfície polida a) solução de 1:4 % , b) solução 1:2, c) solução de 1:4 e d) solução 1:2.....	87
Figura 4.26. Relação ângulo de atrito e intercepto coesivo por tempo de cura para os compósitos com parâmetros obtidos para (a) tensão de pico (b) tensão residual e (c) tensão de pico para ensaio em superfície polida.	89
Figura 4.27. Relação Módulo de Resiliência x tensão confinante a) solução polimérica com 1:4 e b) solução polimérica com 1:2.	94
Figura 4.28. Relação Módulo de Resiliência x tensão desvio (a) solução polimérica com 1:4 e (b) solução polimérica com 1:2.....	95
Figura 4.29. Modelo composto do rejeito puro.	97
Figura 4.30. Modelo Composto para os compósitos rejeito-polímero (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.	98
Figura 4.31. Modelo Composto para os compósitos rejeito-polímero-fibra (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.	99
Figura 4.32. Modelo Composto para os compósitos rejeito-polímero (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.	100

Figura 4.33. Modelo Composto para os compósitos rejeito-polímero-fibra (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.	101
Figura 4.34. Gráfico referente ao número de ciclos versus deformação máxima para ambos compósitos com 1:4 e 1:2 de solução polimérica, respectivamente.....	105
Figura 4.35. Gráficos dos elementos químicos encontrados no ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-x realizados em polímero puro e compósito rejeito-polímero com solução de 1:4 e solução de 1:2.	110
Figura 4.36. CHN do polímero.....	111
Figura 4.37. Difrátograma a) rejeito de minério de ferro puro; b) compósito rejeito polímero com 1:4 de solução e c) compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução.	114
Figura 4.38. Imagens obtidas por microscopia ótica com aumento de 40 x a) rejeito puro, b) compósito rejeito-polímero, c) rejeito-polímero-fibra.	115
Figura 4.39. Imagens obtidas por microscopia ótica com aumento de 40 x a) compósito rejeito-polímero, b) rejeito-polímero-fibra.	116
Figura 4.40. MEV a) vista geral dos grãos de minério de com aumento de 45 x, b) grãos do rejeito puro aumento 110 x e c) superfície do grão com aumento de 370 x	118
Figura 4.41. MEV a) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 80 x b) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 700 x e c) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 550 x.	119
Figura 4.42. MEV a) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 85 x e b) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 700 x.....	120
Figura 4.43. MEV a) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 150 x e b) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 450 x.....	121
Figura 4.44. MEV a) vista geral com aumento de 15x b) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 85 x e c) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 430 x.	122
Figura 4.45. EDS (a) rejeito puro e (b) e (c) compósito rejeito-polímero com 25 % e 50 % de solução polimérica, respectivamente; (d) e (e) compósito rejeito-polímero-fibra com 25 % e 50 % de solução polimérica, respectivamente.	128

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

\bar{A}	Área das amostras
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
k	Coefficiente de permeabilidade
cv	Coefficiente de adensamento
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
c'	Intercepto coesivo
Φ'	Ângulo de atrito efetivo
Cc	Coefficiente de curvatura
Cu	Coefficiente de uniformidade
D ₁₀	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 10% passante em peso
D ₅₀	Diâmetro médio das partículas presentes
DER	Departamento Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
F	Carga vertical aplicada
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
H	Altura do corpo de prova
h ₀	Altura inicial referência do corpo de prova
R ²	Coefficiente de determinação
k ₁	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
k ₂	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
k ₃	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
m	Massa das amostras
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
RCC	Resistência à compressão não confinada
T	Temperatura
UnB	Universidade de Brasília
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
Δ	Deformação elástica ou resiliente

Δh	Deslocamento vertical máximo
δ	Massa específica dos grãos
R	Rejeito
RP	Rejeito Polímero
PP	Fibra de polipropileno
L	Linha
SP	Superfície polida
RT	Resistência a tração
RTc	Resistência a tração com condicionamento
RTT	Razão a tração retida
μ	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão normal
σ_1	Tensão normal vertical
σ_3	Tensão de confinamento ou Tensão normal horizontal
σ_d	Tensão desviadora ou desvio
σ_h	Tensão normal horizontal
σ_v	Tensão normal vertical
σ_τ	Tensão de tração aplicada no plano diametral
S	Enxofre
Si	Silício
Al	Alumínio
Na	Sódio
K	Potássio
Zn	Zinco
C	Carbono
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DRX	Difração de Raio – X
Fe	Ferro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a grande quantidade de resíduos gerados pela indústria mineradora tem causado vários problemas ambientais, não só no Brasil como no mundo. Logo, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de novas técnicas de utilização e reaproveitamento dos rejeitos promovendo uma minimização dos impactos ambientais ocasionados. Durante a extração de minério de ferro, o processo de beneficiamento produz um grande volume de rejeitos, para o máximo aproveitamento do material de interesse.

Em função da alta demanda por minério de ferro, rochas com teor de ferro reduzido passaram a ter sua extração viabilizada, implicando em aumento na quantidade de rejeitos, o que requer barragens com tamanhos cada vez maiores para disposição desse material.

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 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, compostos principalmente por sílica e óxido de ferro, foram lançados no meio ambiente, atingindo 663 km de rios e córregos e 1.469 ha de vegetação. Outro acidente ocorreu em janeiro de 2019, com o rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho no estado de Minas Gerais. A ruptura da barragem lançou, aproximadamente, milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro ao meio ambiente e a lama chegou a uma distância maior que 85 km do ponto de ruptura. Rios e inúmeros hectares de florestas foram atingidos, 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 230 perdas de vida humana.

Diante do esgotamento das jazidas naturais nos locais próximos aos centros urbanos, diversos estudos estão sendo conduzidos, com o objetivo de melhorar o desempenho do material utilizado nas obras geotécnicas, reduzindo o montante de material a ser utilizado.

A implementação de materiais alternativos em diversas obras geotécnicas tornou-se um tema de grande interesse para estudo e aplicação. Seja para estabilização, melhoramento ou reforço em obras geotécnicas.

Garcia *et al.* (2015), Baghini (2016), Mirzababaei *et al.* (2017), Xing *et al.* (2018), Liu *et al.* (2018, 2019), Barreto (2019), Okonta (2019), Lee *et al.* (2019), dentre outros, mostram que a técnica de melhoramento em solos é aplicável, rentável e não prejudica ao meio ambiente, além disso, estas pesquisas mostram que os polímeros podem ser utilizados em diversas obras na engenharia geotécnica.

Os polímeros são compostos de origem natural ou sintética, formados por uma repetição

de unidades químicas. Sendo uma unidade da molécula de uma substância química, chamada de monômero.

Quando aplicado corretamente e na dosagem adequada, o polímero torna-se um forte estabilizador de solos em estradas não pavimentadas, aterros, proteção e estabilidade de taludes, bem como selante no controle de poeira e erosão em camadas de pavimentação, devido à aglutinação dos grãos, melhorando a estabilidade da matriz de solo.

A aplicação de polímeros apresenta-se como uma solução promissora, melhorando a microestrutura dos compósitos, além de aumentar a durabilidade deste. Os polímeros influenciam nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade das misturas. Apresentam uma durabilidade superior à apresentada pelo cimento Portland, além possuir resistência ao ataque de ácidos, descongelamento e difusão de cloretos (BAGHINI, 2016).

A utilização de fibras como reforço em solos é um método de melhoramento antigo, enquanto o desenvolvimento científico de pesquisas para entender os mecanismos de interação fibra-solo não é de longa data, começou a acontecer há aproximadamente três décadas.

Li *et al.* (2018), Sotomayor (2018), Cao *et al.* (2019), Liu *et al.* (2020) entre outros, mostram que as técnicas de melhoramento de solo utilizando fibras são eficientes como alternativa, com melhoria no comportamento geotécnico dos materiais estudados.

Dentro deste contexto, esta pesquisa busca estudar técnicas para o melhoramento de um rejeito de mineração, por meio da inserção de polímero como estabilizante e de fibras como reforço a este compósito, objetivando avaliar a melhoria dos parâmetros de resistência, para aplicação em obras geotécnicas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é efetuar uma análise do 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, como por exemplo taludes, aterros e camada de revestimento em pavimentos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Complementando o objetivo geral, citam-se os objetivos específicos:

- Realizar ensaios de caracterização física, química, mecânica e ambiental do rejeito de minério de ferro e compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra;
- Avaliar a influência da inserção de polímero e fibras de polipropileno no comportamento mecânico dos compósitos, por meio da realização de ensaios de compactação, cisalhamento direto convencional e de superfície polida, resistência à compressão não confinada, triaxial de cargas repetidas (módulo de resiliência) e desgaste em simulador de tráfego laboratorial;
- Verificar a influência da dosagem da solução polimérica e de tempos de cura no comportamento mecânico dos compósitos, para solicitações estáticas e cíclicas ;
- Analisar a influência de inserção de fibras de polipropileno no compósito rejeito-polímero, a fim de verificar a potencialização da resistência interna dos compósitos, bem como nos parâmetros de resistência pós-pico e residual;
- Complementar a análise do comportamento dos compósitos com ensaios de sucção total, dano por umidade induzida, lixiviação, microscopia eletrônica e análises químicas;
- Validar a aplicabilidade técnica e ambiental dos compósitos estudados em obras geotécnicas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está organizado em capítulos, conforme descrição apresentada na sequência.

No Capítulo 1 é exposto a introdução da tese, onde é retratado o problema em estudo e as principais considerações, assim como apresentam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

Na sequência, no Capítulo 2 é apresentado a revisão bibliográfica, relacionando e sintetizando os principais conhecimentos que orientaram a presente pesquisa, englobando os tópicos sobre mineração, minério de ferro e barragens de mineração; breve definição de polímero e fibras; e uma sucinta revisão dos trabalhos mais recentes envolvendo aplicação de polímeros, rejeitos de mineração e fibras.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição dos materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento dos estudos laboratoriais realizados, bem como as metodologias aplicadas nos ensaios.

Por sua vez, o Capítulo 4 realiza-se a apresentação e análise dos resultados, onde estão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório, assim como apresenta-se a análise dos resultados e as principais considerações.

Por fim, o Capítulo 5 descreve as conclusões e as principais contribuições da presente pesquisa. Neste capítulo também são relatadas sugestões para pesquisas futuras baseando-se nos conhecimentos advindos da presente pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a revisão da literatura englobando os tópicos sobre mineração, métodos de estabilização e aditivos

2.1 ATIVIDADES DE MINERAÇÃO

A mineração é de grande relevância no setor econômico e social no Brasil, conforme dados do Plano Nacional de Mineração (PNM) 2030, é responsável em média por 4,2% do Produto Interno Bruto (PIB) nas últimas décadas. As indústrias de mineração são responsáveis pela produção primária de vários materiais utilizados diariamente, como é exemplo das indústrias da construção civil, automobilística, aeroespacial entre outras.

O minério bruto, ao ser extraído, não se encontra na forma suficientemente puro ou adequado para a utilização industrial devido aos processos naturais de sua formação.

Na atividade de mineração são gerados dois tipos de resíduos, os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais que ao serem extraídos da mina, não possuem valor econômico e localizam-se geralmente dispostos em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento.

A etapa de beneficiamento prepara granulometricamente, purifica ou enriquece minérios através de métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais, tornando-os aptos à utilização na indústria metalúrgica (ARAÚJO, 2006; GUIMARÃES, 2012).

De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), o beneficiamento de minérios abrange: cominuição (britagem e moagem), para redução dos tamanho das partículas; separação por granulometria e classificação (ciclonagem, classificação em espiral) com finalidade de separar as espécies minerais, obtendo-se um concentrado e um rejeito; concentração (gravítica, eletromagnética, eletrostática, por flotação), para remoção da maior parte das impurezas presente no minério; espessamento e filtragem; secagem (secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado); e disposição de rejeito, geralmente sob a forma mistura sólido – água, e comumente são dispostos em reservatórios, em pilhas e em barragens construídas com o próprio rejeito.

O número total de empregos diretos no setor mineral vem crescendo a cada ano, a constante expansão da demanda para o ferro e aço no mundo acelera a geração de resíduos de minério de ferro (Iron Ore Tailing - IOT), constituindo um problema ambiental devido as

grandes áreas requeridas para disposição dos mesmos, logo é necessário que sejam viabilizados métodos de disposição destes materiais obedecendo as restrições ambientais, sociais e econômicas. Com isso, diante da enorme quantidade de materiais residuais gerados, as barragens de rejeitos representam uma das técnicas mais adotadas por mineradoras e geotécnicos.

De acordo com os dados obtidos pelo DNPM (2018), nota-se uma expansão da atividade econômica da indústria extrativa. Entre os anos de 1995 e 2012, a produção extrativa mineral saiu 0,8% para 4,3% do PIB, reduzindo para 4,0% do PIB no ano de 2014. Em 2014, o Brasil se destacou como o principal produtor de nióbio, com participação de 93,7% no mercado desse metal e ocupando o posto do segundo maior produtor de Magnesita, com 14,5%. Outras substâncias minerais também mostraram elevada participação na produção mundial, tais como: crisotila (15,6%), Manganês (15,3%), Alumínio (14,9%), Vermiculita (13,9%), Ferro (12,8%), Tântalo (10,0%), Talco e Pirofilita (9,2%), Estanho (8,3%) e Grafita (7,8%).

Os minerais de ferro estão presentes em 4,5% da crosta terrestre, sendo considerado o quarto elemento mais abundante, superado apenas pelo o oxigênio, o silício e o alumínio. O ferro geralmente ocorre em seus minérios sob a forma de óxidos minerais, tais como a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) ou goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) e também, em menores proporções, a limonita ($\text{FeO(OH).nH}_2\text{O}$) (GIRODO, 2005).

Os principais estados produtores de minério de ferro no Brasil são Minas Gerais e Pará, com 51,6% e 32%, respectivamente (IBRAM, 2016).

Os minérios de ferro originam-se em uma grande diversidade de ambientes geológicos, por essa razão, há variações nos teores e nas combinações químicas de metais existentes nas rochas, havendo aplicações distintas e sua viabilidade como minério (MIRON & BOYD, 2006).

Os itabiritos, são formações ferríferas bandadas, compostas de hematita (Fe_2O_3) e sílica, constituindo os maiores depósitos de minério de ferro. Os processos geológicos possibilitaram a existência de itabiritos intercalados com hematita compacta com teores de ferro elevados.

O volume das exportações brasileiras do minério de ferro cresceu 6% no acumulado do ano até setembro, em relação ao mesmo período em 2014, devido ao aumento na demanda da China. Já o valor exportado reduziu 49%, como consequência da queda no preço do minério de ferro.

Na atividade de mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos, gerados pelos processos de beneficiamento em que volumes são dispostos de forma direta sobre a superfície do terreno em reservatórios, formando bacias de disposição conhecidas também como barragens de rejeitos (BOSCOV, 2008; PEIXOTO et al. 2016).

2.2 BARRAGENS PARA REJEITO DE MINERAÇÃO

A partir da década de 30 com intuito de manutenção da mineração e redução dos impactos ambientais, as indústrias investiram na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos. As primeiras barragens, no início do século XIX, eram projetadas transversalmente aos cursos d'água, com considerações limitadas apenas para inundações. Consequentemente, poucas destas barragens permaneciam estáveis, com ocorrência de chuvas fortes. Somente na década de 40 foi possível a construção de barragens de contenção de rejeitos com técnicas de compactação e maior grau de segurança, de maneira similar às barragens convencionais devido a disponibilidade de equipamentos mais sofisticados para movimentação de terras, especialmente em minas a céu aberto (MELLO; PIASSENTIN, 2011).

Em 2016, as substâncias da classe dos metálicos equivaleram a cerca de 77% do valor total da produção mineral comercializada no Brasil. Oito substâncias são salientadas por corresponderem a 98,6% do valor da produção comercializada, as quais são: alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel e ouro (DNPM, 2016).

A construção da barragem de rejeito é realizada em etapas de acordo com espaço geográfico, por meio de alteamento sucessivos aplicando o próprio rejeito ou materiais externos oriundos da área de empréstimo ou do estéril de mina. O método mais utilizado é o alteamento para montante (IBRAM, 2016), por ser mais econômico (VICK, 1983).

A grande produção dos rejeitos minerais advindos da etapa de beneficiamento do minério torna viável a construção de diques para estocagem deste material formando então as barragens de rejeitos. Entretanto, se construído de forma inadequada, essas estruturas representam um grande risco para sociedade, meio ambiente e também para a economia.

Em 1986, quando sucedeu o rompimento da barragem de rejeitos da Mina de Fernandinho, em Itabirito/MG, ocorreu um destaque no noticiário nacional, sobretudo pela morte de 7 pessoas. Já em 2001, evidenciou-se que a ruptura de uma barragem pode ocasionar, além de danos a vida humana e de animais, impactos negativos sobre o meio ambiente. No rompimento da barragem da mineradora localizada em Sebastião de Águas Claras (Macacos), distrito de Nova Lima, estado de Minas Gerais, matou 5 operários, assoreou mais de 6 km do leito do córrego Taquaras e atingiu quarenta e 3 ha de vegetação. No ano de 2014, operários mineiros, que realizavam a manutenção no talude de uma barragem de rejeitos desativada, no Estado de Minas Gerais, foram soterrados depois de seu rompimento (TOLEDO; RIBEIRO; THOMÉ, 2016).

No dia 5 de novembro de 2015, devido ao rompimento da barragem de Fundão, aproximadamente 40 milhões de m³ de rejeitos de mineração, compostos principalmente por sílica (areia) e óxido de ferro, foram lançados no meio ambiente, atingindo 663 km de rios e córregos e 1.469 ha 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. (TOLEDO; RIBEIRO; THOMÉ, 2016). De acordo com a Samarco, 55 bilhões de litros de rejeitos eram armazenados no Fundão.

Em 25 de janeiro de 2019, ocorreu o rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho no estado de Minas Gerais, a barragem era construída utilizando o método de alteamento a montante, possuía 86 m de altura e começou a ser construída em 1976. Aproximadamente 12 milhões de m³ 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 216 mortos e dezenas de desaparecidos.

Mesmo que a maioria dos acidentes ocorridos e barragens, se localizarem em Minas Gerais, o Estado de São Paulo conta com 21 barragens de rejeitos e já ocorreram acidentes de menores proporções, como em Jacareí, lançando os resíduos no rio Paraíba do Sul (SABBO et al. 2017).

Evidencia-se que quase a metade dos acidentes com barragens no final do século XX e início do século XXI compreendeu estruturas alteadas com a utilização do método para montante, que é o mais utilizado.

Silva et al. (2017) faz uma revisão bibliográfica, analisando estudos sobre reutilização de rejeitos da mineração. Neste artigo é apresentado que 42% dos trabalhos analisados aplicam o rejeito na fabricação de cerâmica vermelha, seguido de concreto (25%), argamassas (17%), filtro de barragens (8%) e agricultura (8%).

O reaproveitamento de rejeitos, vem ganhando espaço no setor de rochas ornamentais. Este setor gera grandes volumes de perda de material, tanto na etapa de extração quanto no beneficiamento. Pesquisas apresentam uso de alternativas tecnológicas, não só para o tratamento desses resíduos, como também para o seu aproveitamento industrial: nas indústrias da cerâmica, do vidro, da construção civil, metalúrgica, química, na agricultura e no artesanato, na confecção de pavimentos e tijolos, dentre outros.

2.3 PESQUISAS COM REJEITOS DE MINERAÇÃO

Devido os acidentes ocorridos em barragens de mineração, mesmo com o avanço da tecnologia acerca da disposição destes rejeitos, o estudo sobre rejeitos de minérios começou a gerar interesse na comunidade científica.

O comportamento mecânico desses materiais pode mudar, quando comparado ao solo natural, pois estes sofrem um grande desgaste físico e químico durante sua formação, daí a importância de um estudo para melhor compreensão acerca do comportamento destes materiais.

Em decorrência do processo de formação das rochas, intemperismo ou erosão que alteram as rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas, onde são encontrados estes rejeitos, fazem com que eles tenham propriedades e comportamento diferentes diante diversas solicitações que podem ser submetidos. Essa variabilidade, muitas vezes, não permite determinar comportamentos gerais.

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 parâmetros 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.

As pesquisas sobre utilização de rejeitos como materiais de construção são recentes, devido à grande diversidade destes produtos e por sua utilização só ser aconselhável em alguns projetos. Geralmente, os rejeitos de minério não apresentam boa propriedade geotécnica, sendo necessário a combinação de algum material com boa característica ou um reforço da matriz de rejeito.

Coelho (2008) realizou uma mistura com argila (20%), rejeito de minério de ferro fino (10%) e rejeito de jigagem (70%) reforçado com fibras de polipropileno para aplicação na base em aterros rodoviários. Após o estudo o autor concluiu que, a adição de fibra reduziu a resistência inicial do compósito favorecendo maiores efeitos de ductilidade e impondo um comportamento elasto-plástico de enrijecimento do material. A envoltória de resistência se apresentou bi-linear na qual o primeiro trecho possui um baixo intercepto coesivo, mas alto ângulo de atrito enquanto o segundo trecho um alto intercepto coesivo, porém o ângulo de atrito

é reduzido. Por fim, foi possível concluir que a mistura não é indicada, pois foi encontrado efeitos maiores de contração sob cisalhamento tornando crítico o risco de liquefação de rejeitos.

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 foi realizado 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. Através das análises os autores concluíram a aplicação das misturas em camadas de pavimentos, especialmente como material de reforço de subleito e sub-base.

A estabilização de solos finos com cangas de minério de ferro foi avaliada por Sanchez (2015). A mistura testada pelo autor, composta de 50% de solo e 50% de canga, apresentou

comportamento mecânico melhorado, podendo ser utilizado na composição de camadas de sub-base em pavimentos com baixo volume de tráfego

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. Concluiu-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 (ITP) 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.

A utilização de resíduos adicionados ao solo ou materiais alternativos para as diversas áreas da geotecnia, tem como objetivo principal melhorar as propriedades mecânicas dos materiais/solos utilizados nas obras.

2.4 ESTABILIZAÇÃO E ADITIVOS

O tema estabilização de solos é definido como uma metodologia que visa atribuir à esse material resistência mais elevadas e mais estável às cargas, desgaste ou erosão, seja por meio da compactação, ajuste granulométrico e plasticidade ou através da adição de produtos que conferem coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (VARGAS, 1977).

A utilização de resíduos adicionados ao solo, para as diversas áreas da geotecnia, tem como objetivo principal, melhorar as propriedades mecânicas dos materiais/solos utilizados em diversas obras e uma destinação ao resíduo. Diversas vezes o solo natural de uma determinada região não atende às especificações necessárias para que o mesmo seja utilizado, sendo necessário um melhoramento ou uma estabilização.

O melhoramento de solos tem como agentes tradicionais a cal, cimento e cinzas volantes, os quais visam a melhora do comportamento mecânico do solo, promovendo ganhos de resistência, diminuição de permeabilidade e compressibilidade, com consequente aumento da durabilidade (CASAGRANDE, 2005).

Trabalhos desenvolvidos com esses agentes tradicionais foram realizados por Consoli et al. (2011), os quais investigaram as variáveis que governam a resistência de misturas sol-cinza-cal, determinando um índice que correlaciona porosidade e quantidade volumétrica de cal na Resistência à Compressão Simples (RCS).

A utilização da cal como meio de tratamento de um solo, de maneira geral, pode ocorrer de duas formas: como estabilizante químico incrementando valores de resistência e rigidez do solo pelas reações pozolânicas existentes; como modificadora das características físicas do solo (redução da plasticidade, melhoria da trabalhabilidade e resistência à erosão).

Método proposto por Consoli (2014) parte do conceito que a relação entre a resistência à compressão simples e a resistência à compressão diametral é única para cada mistura de solo tratado. Consoli (2014) conclui que o ângulo de atrito de um determinado solo melhorado com cal é independente da porosidade e da quantidade de cal, além que o intercepto coesivo é diretamente proporcional da função da resistência à compressão simples ou diametral.

Almeida et al. (2016) especificam a estabilização em três tipos: química, mecânica e física. A estabilização química consiste nas reações ocorrem entre a massa de solo, agente estabilizante e a água. Estabilização mecânica consiste em um conjunto de operações mecânicas que alteram o arranjo das partículas do solo ou granulometria cujo objetivo principal a redução dos vazios do solo. Por fim a estabilização física consiste na correção da granulometria do substrato, tendo como exemplo a adição de fibras (PINTO, 2008).

Sandroni & Consoli (2010) mostram que o uso de cimento pode ser usado para estabilização dos mais diversos tipos de solos, contudo o uso em argilas muito plásticas e orgânicas apresenta maiores dificuldades. Os Cimentos Portland são cimentos que ganham resistência por meio das reações de hidratação. Na maior parte dos casos, quanto mais fino o solo, ou seja, maior a fração de finos, maior a quantidade requerida de cimento para a estabilização.

Klinsky et al. (2014) utilizaram o ensaio triaxial cíclico para avaliar diferentes teores de areia de fundição residual e de cal hidratada a dois solos argilosos, um de comportamento laterítico e um não-laterítico. Concluíram que a adição da areia de fundição residual reduziu os valores dos módulos das misturas de comportamento laterítico, e com aumento desse teor nos solos não-laterítico, houve um incremento dos valores. A adição da cal aumentou os valores dos módulos das misturas e foi verificado que o tempo de cura é determinante para ganhos significativos.

Belchior et al. (2017) utilizaram uma centrífuga para analisar a redução do inchamento em solos expansivos visando tratamentos de estabilização visando a melhoria do tratamento com cal. Os autores verificaram que o teor de umidade da compactação afeta o mecanismo de inchamento na amostra. A eficiência da adição de cal pode ser aumentada, reduzindo a compactação para obtenção de uma menor densidade seca. No entanto, concluíram que as operações de tratamento de cal durante a construção deve verificar a umidade da mistura cal-solo. Soltani et al. (2017) compararam a variação volumétrica de solo expansivo australiano para diferentes agentes químicos e fibras. Mesmo que as estabilizações com cal e cimento tenham se mostrado mais efetivas na redução da expansão, os autores salientam que a incorporação polimérica e reforço com fibra são obviamente mais sustentáveis e econômicas, sendo consideradas como importantes alternativas para a utilização de cal e cimento em solos expansivos.

Não obstante a comprovada eficácia dessas técnicas na melhoria das respostas hidráulica, compressiva e resistiva dos solos, efeitos adversos de quantidades elevadas de matéria orgânica, sulfatos, sais, somada à inerente influência do tempo de cura no comportamento mecânico, custo de transporte, quantidades relativamente grandes de aditivo a um custo significativo para obtenção de melhorias e preocupação ambiental, gerada pela grande emissão de dióxido de carbono para produção de cimento, têm estimulado estudos com estabilizantes alternativos para aprimoramento das técnicas de estabilização (TINGLE et al., 2007; MALKO et al., 2016; SOLTANI et al., 2017).

Entende-se por materiais alternativos, aqueles que não seguem uma especificação técnica tradicional e não possuem abrangência na utilização. Contudo, eles podem apresentar certas características que os tornam bons substitutos dos convencionais, que estão cada vez mais escassos (REZENDE et al., 2015; ROQUE, 2017).

Antes, durante e após a 2ª Grande Guerra houve a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de estabilização de solos, com o objetivo de atender às necessidades militares e ao progresso e expansão das cidades. Os problemas de escassez, custos dos materiais convencionais e solos problemáticos incentivaram a pesquisa de novos materiais. Produtos químicos foram desenvolvidos, porém uma grande maioria tinha desvantagens como dificuldades de mistura, sensibilidade ao tipo de solo ou alto custo (DAVIDSON; HANDY, 1960 apud BRAZETTI, 1998).

Diante do crescimento das cidades viu-se a necessidade de expansão da malha rodoviária, para o transporte e troca de mercadorias, além da quantidade de lama, poeira e instabilidade do solo. Uma solução em termos de novos materiais se requeria (KÉZDI, 1978 apud BRAZETTI, 1998).

Antes do início da 2ª Grande Guerra, produtos químicos como o cimento portland, cloreto de cálcio, cloreto de sódio, ligninas, alcatrões e asfaltos eram utilizados como técnicas

de melhoramento dos solos. O cimento e o betume eram adicionados para proporcionar resistência e durabilidade, já os cloretos e a lignina eram utilizados para atenuar problemas com o pó e lama. O uso da cal e misturas cal-pozolana, apesar de serem utilizados já desde antes do Império Romano, era localizado e restrito (JOHNSON, 1960 apud BRAZETTI, 1998).

Os estudos concluíram que o melhor caminho seria desenvolver uma forma de ligação química entre as partículas do solo que utilizasse a sua atração natural por íons; estes, por sua vez, poderiam ser conectados por uma substância química adicionada. Este método empregaria as reações de troca iônica e polimerização do produto adicionado, construindo uma cadeia de moléculas que conectaria as partículas, gerando um compósito solo-aditivo coerente; o objetivo foi, até certo ponto, atingido.

Investigações foram realizadas pela Federal Highway Administration FHWA e os departamentos rodoviários estaduais, United States Department of Agriculture USDA, Civil Aeronautics Administration CAA e outros órgãos militares além das Universidades e Indústrias, visando a aplicação substâncias químicas em aeroportos e rodovias. Pistas circulares com simuladores de carga já nos anos 30-40 foram concebidas para acelerar os testes (WILLIS & CARPENTER, 1939; WILLIS & SMITH, 1940, apud BRAZETTI, 1998).

O Massachusetts Institute of Technology MIT, em 1946, patrocinado pelo exército americano, iniciou um programa visando o desenvolvimento de materiais e técnicas para melhorar a estabilidade dos solos. O objetivo inicial do programa era desenvolver um processo que evitasse a formação de lama. “Solidificação do Solo” foi o termo adotado para o programa.

Segundo Buchanam (1952), o desenvolvimento no campo da química dos polímeros indicava que eles podiam gerar futuramente uma forma de estabilização química bastante adequada.

Thomas Willian Lambe pesquisador e professor emérito do MIT, foi um dos precursores no incentivo à pesquisa e desenvolvimento de aditivos na primeira conferência sobre estabilização de solos. Em 1953, o mesmo autor, praticou a copolimerização com soluções monoméricas no estudo de impermeabilização de solos in situ. Em seu trabalho evidencia a teoria das reações químicas do tratamento, seus efeitos e as modificações geradas nas propriedades do solo. Sua pesquisa concluiu que os polímeros são promissores como agentes estabilizantes e que novos e melhores materiais poliméricos teria a possibilidade de serem desenvolvidos juntamente com estudiosos da área de química e solos.

2.5 PESQUISAS COM POLÍMEROS

Os polímeros são compostos de origem natural ou sintética, formados por uma repetição de unidades químicas. Sendo uma unidade da molécula de uma substância química, chamada de monômero (AKCELRUD, 2007).

A palavra polímero é de origem grega e significa poli (muitas) mais mero (partes), ou seja, muitas partes repetidas. De acordo com Blass (1985), a polimerização, é o processo na qual as várias unidades de repetição (monômeros) reagem para formar um polímero.

Os polímeros podem ser classificados de acordo com sua estrutura química em: métodos de elaboração, características tecnológicas e comportamento mecânico. Conforme sua estrutura química Callister (2006), os classificam em homopolímeros e copolímeros. Tratando-se homopolímero como uma macromolécula derivada de um único tipo de monômero. Um copolímero é uma macromolécula originada de dois ou mais tipos de monômeros na sua estrutura, podendo ser subdividido em: estáticos ou aleatórios, alternados, em blocos e grafitizados ou enxertados.

Os polímeros, ainda, podem ser classificados de acordo com a carga elétrica existente na molécula. Aniônicos são aqueles que possuem agentes tensoativos que quando em contato com uma solução aquosa seus íons são carregados negativamente. Já os catiônicos possuem agentes tensoativos que ao ionizar com uma solução aquosa fornecem íons positivos.

Os polímeros são encontrados na maioria das atividades do dia a dia, seja através de materiais utilizados ou nos processos adotados. Sua aplicação é comum em utensílios domésticos, nas indústrias automobilística e de brinquedos. A variedade de aplicação desses materiais é recorrente do baixo custo de produção, peso reduzido e a elevada resistência à corrosão, não há necessidade de mão de obra específica para aplicação, assim como instrumentação específica para o serviço, tornando-os componentes mais resistentes a intempéries, estendendo a vida útil do material (BARRETO, 2018).

Os fabricantes de polímeros fornecem em sua maioria, o material na forma líquida em maior concentração, havendo necessidade da dissolução em água. A indústria prefere esse tipo de polímero (solução polimérica) do que polímeros em pó, devido maiores dificuldades de dissolver podendo ocorrer redução de sua eficácia (CANEVAROLO, 2006; LAM & JEFFERIS, 2018).

Quando aplicado corretamente e na dosagem adequada, a aplicação do polímero torna-se um forte estabilizador de solos em estradas não pavimentadas, pisos de estacionamentos, proteção de taludes, como selante no controle de poeira, controle de erosão e camadas de

pavimentação. Podendo ser utilizado em aterros com solos finos, pois evita a erosão por intemperismo devido aglutinação dos grãos, melhorando a estabilidade do maciço.

Os aditivos poliméricos estão sendo cada vez mais usados devido serem mais confortáveis, eficazes e favoráveis ao meio ambiente.

Para Visconte et al. (2001), os copolímeros de butadieno são muito aplicados em misturas poliméricas, originadas de mistura mecânica de dois ou mais polímeros, como NR/SBR (mistura de borracha natural com o SBR).

Zandieh e Yasrobi (2010) aplicaram polímero em solos arenosos advindos de dunas do deserto de Garmsar no Irã. Avaliaram o tempo de cura de 1, 2, 7, 14 e 28 dias com 7 porcentagens diferentes de dois tipos de polímeros, por meio do ensaio de resistência à compressão não confinada. Observaram um aumento considerável na resistência à compressão não confinada e melhora da resistência à deterioração na presença de água. Avaliaram que entre o 3º e 7º dia de cura já há 90% de ganho da resistência a compressão não confinada total.

Khatami & O’Kelly (2013) analisaram o comportamento de um solo arenoso quando misturados a dosagens distintas de um biopolímero. Foi constatado que à medida que aumentava-se a porcentagem de polímero adicionado na amostra, havia um incremento dos valores de resistência a compressão e aumento da tensão desviadora, além de melhorar todos valores do solo arenoso não tratado.

Jiménez (2014) descreve betumes modificados através da inclusão de alguns polímeros, asfaltos naturais, borracha ou outros compostos para obtenção de melhorias em importantes propriedades como maior tenacidade, resistência à fadiga, suportar deformações permanentes e aumento da coesão.

Garcia et al. (2015) estudaram o comportamento de um solo arenoso adicionado polímero, cimentado artificialmente e puro. Após as análises o autor observou altos incrementos nas forças de cimentação, tração e resistência ao cisalhamento do solo arenoso adicionado com polímero quando comparado aos demais.

Os compostos mais utilizados em misturas solo-polímeros são: acetatos de vinil, ou copolímeros acrílicos suspensos em emulsão por surfactantes. A aplicação de polímeros apresenta como uma solução promissora, melhorando a microestrutura das misturas, além de aumentar a durabilidade do compósito. Os polímeros influenciam nas propriedades mecânicas e trabalhabilidade das misturas solo/agregado/cimento. Possuem características de apresentarem uma durabilidade superior a apresentada pelo cimento Portland, além possuir resistência ao ataque de ácidos, descongelamento e difusão de cloretos. (BAGHINI, 2016).

O copolímero acrílico-estireno quando disperso em meio aquoso, possui um aspecto líquido de coloração branco leitoso, viscoso e solúvel em água. Por se tratar de um aditivo com alta potência, atua como ligante interfacial nas partículas do solo em contato, proporcionando a perfeita coesão entre os agregados, conferindo resistência e rigidez ao material. A compactidade necessária ao solo para melhorar sua qualidade quanto aos parâmetros de resistência, permeabilidade, compressibilidade e absorção de água é obtida a partir da compactação. A umidade juntamente com a fração fina dos materiais granulométricos influencia diretamente na coesão do terreno (AG-TERRA, 2005).

Floss (2016), avaliou o uso de uma metodologia de dosagem de solo/cimento, empregando resíduo do beneficiamento de pedras semipreciosas, investigando a influência do teor de cimento, da porosidade e da relação vazios/cimento. Para isso, realizou ensaios de resistência à compressão simples e tração em amostras do resíduo artificialmente cimentado. Com os ensaios verificou-se que houve um aumento da resistência da mistura de acordo com aumento do teor de cimento. O estudo possibilitou encontrar, a redução da porosidade da mistura compactada quando obteve-se alto valores de resistência a tração e resistência à compressão. O autor observou que independentemente da relação de vazios/cimento, há uma correlação única entre a resistência à tração e a resistência a compressão simples do material.

Kolay et al. (2016), investigaram o efeito do polímero líquido em solos finos. As amostras foram compactadas e deixadas curar por 7, 14 e 28 dias. As amostras foram analisadas através de ensaios de compressão não confinada e observou um aumento, mesmo que pequeno, na resistência de ambos os solos estudados com o tempo de cura, independente se a cura ocorreu ao ar livre ou em confinamento. Porém após 14 dias as amostras não aumentaram consideravelmente a resistência.

Xing et al. (2018) estudaram o desempenho mecânico de um solo arenoso estabilizado utilizando polímero. Foi avaliado no estudo uma comparação da força, taxa de perda de umidade e energia de tensão sob diferentes tempos de cura, tipo de polímero, quantidade de polímero e condições de teste. Este estudo mostrou que após 14 dias ocorreu a máxima resistência a compressão e a adição de polímeros em condições úmidas e secas melhorou a resistência da amostra.

Liu et al. (2018) utilizaram polímero orgânico em diferentes concentrações em um solo arenoso. Para isso, realizaram ensaios de resistência à compressão simples, cisalhamento direto e tração. Os resultados indicam que com a adição do polímero houve um aumento de resistência à compressão, coesão e resistência à tração em todas amostras, além de aumentar a densidade conforme elevou a concentração de polímero.

Okonta (2019) analisou a aplicação de solução polimérica acrílica em diferentes tempos de cura, porcentagens e temperaturas para um solo característico da região da África do Sul. O autor verificou a redução de vazios com o aumento da porcentagem de solução polimérica. Além disso, constatou que a cura submetidas à maiores temperaturas gera um incremento da resistência à compressão não confinada quando comparado a cura para mesmo tempo com menor temperatura. O solo estudado tinha predominantemente características arenosas e assim a adição da solução polimérica mostrou-se eficaz por gerar cimentação entre os grãos.

Liu et al. (2019) avaliaram as características da areia reforçada com diversos teores fibra de polipropileno (PF) e várias dosagens de polímero orgânico de poliuretano (POP), através de ensaio de compressão não confinada. Para os testes, os autores variaram o tempo de cura e densidade das amostras. Os resultados dos testes indicaram que houve melhora na resistência da areia com 48 horas e o índice de estabilidade da amostra quase chegou na estabilidade quando a densidade atingiu $1,55 \text{ g / cm}^3$ usando o POP de 3%.

Mirzababaei et al. (2017) analisaram o efeito dos polímeros utilizando ensaio de resistência à compressão não confinada em amostra de solo argiloso. As amostras foram compactadas e curadas por 1 e 14 dias. Após os ensaios os autores observaram uma melhoria significativa da resistência à compressão e o aumento dessa resistência com o tempo de cura. No entanto, a eficiência dos aditivos é altamente dependente do peso unitário do solo. Além disso, a durabilidade das amostras estabilizadas também foi examinada usando testes de imersão e os resultados revelaram que as amostras com aditivos obtiveram melhor durabilidade.

Liu et al. (2018) estudaram o comportamento mecânico de misturas de solo com polímero de poliuretano (PU) e fibra de polipropileno (PF) em comparação com areia pura. O estudo foi realizado através de ensaio de tração variando o tempo de cura, as proporções de PF/PU/Solo/Água e a densidade seca do material, constatou-se que a resistência a tração foi influenciada por estes fatores. Assim, foi possível concluir que o tempo de cura influencia a resistência a tração da mistura, e que até a saturação, o tempo de cura resultará aumento da resistência a tração.

Barreto et al. (2018) analisaram o melhoramento do solo arenoso com a utilização de copolímero de butadieno e estireno modificado (XSBR) através da realização de ensaios de cisalhamento direto e permeabilidade utilizando o permeâmetro de carga variável. Através da realização do ensaio de cisalhamento direto, constataram que houve melhoria nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras adicionais com o copolímero, para diferentes tempos de cura e dosagens, quando comparado com a areia pura.

Jigheh et al. (2019) analisaram o polímero de poliacrilamida catiônica (PAM) no solo de granulometria fina em condições de descongelamento, congelamento e degelo. Para esse fim, dosagens diferentes do aditivo PAM foram adicionadas ao solo. Analisou-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada (UCS) e testes de congelamento e descongelamento das amostras de solo. Os resultados mostram que a inserção do aditivo conferiu uma melhoria significativa e rápida na resistência à compressão do solo. Além disso, o aditivo aumenta a durabilidade de congelamento e degelo do solo.

Lee et al. (2019) analisaram a viabilidade de aplicação de biopolímero (xanthan gum), na estabilização do solo local, para a construção da estrada no Sri Lanka, através do ensaio de compressão não confinada. Os resultados foram comparados com os realizados com cinzas volantes, cimento portland e cinzas de fundo. A resistência à compressão não confinada do solo melhorado com a solução biopolimérica foi menor nos primeiros dias e maior com 28 dias. Nos resultados do estudo as amostras melhoradas com a solução biopolimérica mostraram-se mais dúcteis do que os outros materiais.

Li et al. (2020) investigaram o comportamento do cisalhamento da interface polímero-bentonita sob 4 tensões normais, 4 valores de umidade e 3 densidades poliméricas. Os resultados mostram que a resistência ao cisalhamento da interface polímero-bentonita é maior que a da bentonita pura. Um aumento na tensão normal ou densidade do polímero melhora a resistência ao cisalhamento da interface polímero-bentonita, enquanto um maior teor de umidade da bentonita a reduz.

Khoeini et al. (2019) estudaram misturas à base de polímeros, AP Soil 600, como alternativa às misturas de asfalto em estradas de baixo volume de tráfego para mitigar os impactos ambientais. Segundo os autores, uma das vantagens de um pavimento à base de polímeros é a redução da absorção de calor, que pode efetivamente reduzir as temperaturas do pavimento, bem como a redução das emissões de gases de efeito estufa (como o CO₂) durante e após a construção. Foram realizados ensaios para avaliar a resistência mecânica das misturas à base de polímeros sob compressão, tensão indireta e resistência ao sulco em comparação com as misturas de asfalto convencionais. Os resultados indicaram que as misturas à base de polímeros podem atender à demanda de construção de estradas de baixo volume, considerando sua relativa facilidade de trabalho, aumento da resistência em condições secas e benefícios ambientais.

Silva (2020) estudou o comportamento de um solo arenoso melhorado com solução polimérica como agente estabilizante, visando a aplicação em estradas não pavimentadas, base de pavimentos, bem como aterros e taludes. A análise ocorreu por meio de ensaios de compressão

simples, cisalhamento direto e simulador de tráfego laboratorial. A autora concluiu através das análises realizadas que a solução polimérica adicionada no solo estudado possa ser aplicada como um novo material geotécnico para melhoramento desse solo.

2.6 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

2.6.1. HISTÓRICO

A utilização de fibras como reforço em solos é um método de melhoramento antigo, enquanto o desenvolvimento científico de pesquisas para entender os mecanismos de interação fibra-solo não é de longa data, começou a acontecer há aproximadamente três décadas.

Uma das pesquisas mais antigas foi realizada por Endo & Tsuruta (1969), que constataram que a lei de Coulomb poderia ser utilizada para expressar a relação de um sistema de raízes com resistência ao cisalhamento do solo. A relevância pelo assunto levou pesquisadores a inserir fibras de forma aleatória dentro de uma massa de solo com o intuito de avaliar mudanças no comportamento da matriz (GRAY & OHASHI, 1983).

Fundamentado por estes trabalhos pesquisadores desenvolveram pesquisas para maior entendimento do assunto, de forma que, na década seguinte, nos livros de Engenharia dos Materiais, os materiais compósitos fibrosos eram expostos em capítulos específicos (HANNANT, 1994; HOLLAWAY, 1994; TAYLOR, 1994; ILLSTON, 1994; BUDINSKI, 1996).

Um dos materiais alternativos bastante utilizado como reforço são as fibras, e eventualmente são aplicadas na pavimentação. Vários tipos de fibra podem ser utilizados: naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

Lima Neto et al. (2016) estudaram a aplicação de fibras de polipropileno como reforço em solo para utilização na pavimentação. Na pesquisa foram avaliados quatro teores de fibra, 0,5, 1, 1,5 e 2 %, adicionada a um solo tipo A-2-4. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia e expansão foram realizadas nas amostras e no solo puro com a finalidade de verificar as propriedades mecânicas dos materiais.

Os autores perceberam que o acréscimo de fibra na mistura promove aumento no ISC, embora não suficiente para atender as especificações do DNER para aplicação em base e/ou sub-base. No que se refere a expansão verificou-se um leve aumento desta para o teor de 0,5 % de fibras, depois queda considerável para a mistura com 1 % de fibra e depois um novo aumento para teores acima de 1,5 %. Lima Neto et al. (2016) concluíram que adição de 1 % de fibra

poderia ser uma boa alternativa para solos com ISC próximos aos valores normativos, mas com elevada expansibilidade.

Quanto maior for o comprimento da fibra, maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Heineck & Consoli, 2002) e menor será a possibilidade delas serem arrancadas (Casagrande, 2005). Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será mais solicitada se seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual à sua resistência à tração.

A densidade do solo influencia na resistência e até na contribuição da fibra, somente até certo limite de teor de fibra, porque se a matriz for densa e o teor de fibras alto, a fibra terá uma influência desprezível (Li & Zornberg, 2013), mas se o teor de fibra é ótimo a contribuição da fibra no solo denso será importante (Casagrande, 2005). Em ensaios de carga em placa se demonstrou que o efeito da fibra é maior em solos como densidades relativas mais altas (CONSOLI et al. 2009).

Specht et al (2000) realizaram diversos ensaios com o intuito de avaliar os efeitos da inclusão de fibras poliméricas, sob condições de carregamento estático e dinâmico, analisando as propriedades de resistência e deformabilidade em um solo residual artificialmente cimentado. Os autores constataram a importância das características mecânicas das fibras, bem como a influência do comprimento dos reforços nas variáveis de respostas medidas, fibras mais longas agregam ao solo-cimento características que tendem a ductilidade.

Santos (2008) estudou o comportamento mecânico de materiais compósitos constituídos a partir da utilização de areia fina, cimento Portland CP-V e fibras de polipropileno sob altas pressões. Os resultados indicaram mudanças no comportamento do material não reforçado devido à inclusão de fibras e/ou cimento, os comprimentos das fibras medidos após a aplicação de altas tensões, mostraram que algumas fibras sofreram quebra e outras extensão, indicando que as fibras trabalham em compressão isotrópica. Os autores observaram um aumento do módulo volumétrico devido à presença de ambos: fibras e cimento, além de constatarem que a cimentação pode aumentar a eficiência deste sistema melhorando o ancoramento das fibras, permitindo que as fibras atuem mais efetivamente na matriz, ao menos para as tensões mais baixas.

Girardello (2010) avaliou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibra de polipropileno, através de ensaios de placa em densidade relativa de 50% e 90%; ensaios triaxiais e ensaios de sucção. O melhor resultado foi obtido para o ensaio de placa realizado na maior densidade relativa.

Nos ensaios de sucção, o autor observou que a inserção de fibra não ofereceu nenhuma influência na magnitude da resistência para os valores de sucção sondados. Quanto aos ensaios de placa, a inclusão aleatória das fibras confere ao material uma melhoria no comportamento carga-recalque, com influência na mudança dos mecanismos de ruptura. Para os primeiros estágios de carga, o comportamento carga-recalque não difere no solo reforçado e sem reforço. A diferença é perceptível a partir do momento em que a mobilização das fibras começa a se mostrar mais efetiva, que ocorre somente após um nível de recalque e carga aplicada.

Eldesouky et al. (2016) realizaram ensaios de cisalhamento direto em 108 amostras para estudar o efeito do teor de fibra, densidade relativa, tensão normal e teor de umidade na resistência ao cisalhamento e comportamento volumétrico da areia reforçada com fibra. O estudo concluiu que, a adição de fibra incrementa a resistência ao cisalhamento e aumenta o comportamento volumétrico dilatante, enquanto o incremento do teor de umidade reduz a contribuição da fibra na resistência de pico e pós pico.

Forcelini et al. (2016) realizaram ensaios de compressão axial em misturas de areia, cimento Portland e água, variando três proporções e cinco tempos de cura diferentes. As conclusões mostram que quanto maior a porcentagem de cimento e menor a taxa de vazios, maior a resistência, estabilizando o aumento da resistência em torno do décimo quarto dia.

Li et al. (2018) estudaram a influência de 3 tipos de fibras naturais e uma sintética (polipropileno) nos solos calcários mediante ensaios de compressão não confinada e compressão triaxial, os resultados mostraram que havia um incremento no reforço para todos os tipos de fibra, sendo a fibra de polipropileno a mais efetiva.

Cao et al. (2019) analisaram a resistência e propriedades microestruturais de um aterro de rejeitos cimentado reforçado com fibras polipropileno, poliácridonitrila e fibras de vidro. O estudo analisou diferentes teores de fibras. Como conclusão os autores constataram um aumento na resistência à medida que o teor de fibra aumenta, portanto a aplicação das fibras são indicadas.

Liu et al. (2020) estudaram a estabilização da areia usando diferentes tipos de fibras curtas e polímero orgânico. Foram realizados ensaios de compressão e tração não confinados. Os resultados mostraram que as propriedades de resistência e os comportamentos quebradiços foram melhorados pela incorporação da fibra em comparação com apenas o reforço de polímero.

2.6.2. FATORES DE INFLUÊNCIA DA FIBRA

Nos compósitos fibrosos é importante conhecer os fatores que ajudam no entendimento do comportamento desse material, esses fatores têm sido amplamente estudados e são apresentados posteriormente.

- **RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

A resistência à tração é importante pois as fibras são esticadas sofrendo deformações plásticas de tração em grandes deformações (CASAGRANDE, 2005) e podem mudar o comportamento volumétrico da matriz.

Vale ressaltar, que o solo não possui uma significativa resistência à tração, enquanto a inserção das fibras provocam um trabalho sempre resistente à tração (TAYLOR, 1994).

No contexto geral, as fibras controlam a propagação das fissuras, quando material é submetido a uma carga, tendendo ao incremento da resistência no compósito. Ressalta-se que as fibras sintéticas possuem uma alta resistência à tração, portanto, dificilmente serão fragmentadas durante o cisalhamento do solo, antes disso, serão rompidas de um dos segmentos da matriz.

- **RELAÇÃO DE ASPECTO**

A relação de aspecto consiste na razão entre o comprimento e o diâmetro das fibras. Respeitando um determinado limite, quanto maior o comprimento, maior é o ganho de resistência mecânica (GRAY & OHASHI, 1983; ULBRICH, 1997; HEINECK & CONSOLI, 2002) e menor será a possibilidade delas serem arrancadas (CASAGRANDE, 2005).

Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será mais solicitada se seu comprimento for capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual à sua resistência à tração (SOTOMAYOR, 2018).

- **TEOR DE FIBRAS**

Quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, porém há um limite a partir do qual este efeito não é mais observado (GRAY & OHASHI, 1983; CASAGRANDE, 2001; CASAGRANDE, 2005; CONSOLI et al. 2007). A maior quantidade de fibras provoca um aumento da capacidade de absorção da energia de deformação (CASAGRANDE, 2005). Ressalta-se que a inserção de fibras aumenta a ductilidade (GRAY & OHASHI, 1983; ULBRICH, 1997).

- **MÓDULO DE ELASTICIDADE**

O módulo de elasticidade consiste na razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada. Fibras de vidro e PET, relativamente rígidas, desempenham um efeito mais pronunciado na resistência de ruptura, ao passo que as fibras de polipropileno, relativamente flexíveis, exercem efeito mais acentuado no modo de ruptura e no comportamento final (MONTARDO, 1999; MONTARDO ET AL, 2002; CONSOLI ET AL., 2002).

- **ORIENTAÇÃO**

A orientação é a posição das fibras em relação à direção das deformações de tração do solo. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura ou fissura atua fortemente sua capacidade de transmitir cargas. Conseqüentemente, uma fibra que se posiciona perpendicular ao plano de ruptura tem efeito máximo, enquanto uma paralela não tem esse efeito (MOREL & GOURC, 1997; DIAMBRA, 2010).

2.6.3. ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES PELA INCLUSÃO DE FIBRAS

As características almeçadas com a inclusão de fibras dependem da finalidade da aplicação do compósito e não necessariamente serão de ganho de resistência. Em um projeto de material sísmo-resistente, por exemplo, a ênfase será no aumento da capacidade de absorção de energia e ductilidade, assim como a redução da queda de resistência pós-pico (MARTINS, 2014). Diversos autores apresentam em seus trabalhos algumas mudanças que ocorrem no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras. Estas mudanças são relacionadas à compactação, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica, rigidez inicial e condutividade hidráulica. Posteriormente são descritas algumas nas propriedades dos materiais devido à inclusão de fibras.

- **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE PICO**

Acréscimos na resistência ao cisalhamento de pico pela inserção de fibras ao solo foram relatados por vários autores (GRAY & OHASHI, 1983; MAHER & GRAY, 1990; BUENO ET AL., 1996; MICHALOWSKI & CERMÁK, 2003; CONSOLI ET AL., 2007; AHMAD ET AL., 2010; JAMEI ET AL., 2013; DIAMBRA & IBRAIM, 2015; SENEZ, 2016; DIAB ET AL., 2018). Plé et al. (2009) observaram que a adição de fibra aumenta a resistência ao cisalhamento do solo, mas dependendo do tipo de fibra o aumento será do ângulo de atrito ou da coesão.

O aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com o aumento do teor de fibras também foi relatado por diversos pesquisadores (HOARE, 1979; GRAY & OHASHI, 1983; BUENO et al., 1996; NATARAJ et al., 1996; STAUFFER & HOLTZ, 1995). Diversos autores relataram apenas o aumento do intercepto coesivo com a inclusão de fibras (BUENO et al., 1996; NATARAJ et al., 1996; TEODORO, 1999; CASAGRANDE, 2001; HEINECK, 2002; PRABAKAR & SRIDHAR, 2002; LEOCÁDIO, 2005; SANTIAGO, 2011; BOLAÑOS, 2013). Porém, outros autores relataram apenas o aumento do ângulo de atrito com a inclusão de fibras (ANDERSLAND & KATTAK, 1979; AL WAHAB & AL-QURNA, 1995; TEODORO, 1999; HEINECK, 2002).

- **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PÓS-PICO**

Diversos trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (GRAY & OHASHI, 1983; GRAY & ALREFAI, 1986; FATANI et al., 1991; RANJAN et al., 1996; CONSOLI et al., 1999; DONATO et al., 2004; LEOCÁDIO, 2005; CASAGRANDE, 2005; FESTUGATO, 2008; MARTINS, 2014). ANDERSLAND & KATTAK (1979), RANJAN et al. (1996), FEUERHARMEL (2000), SANTONI et al. (2001), CASAGRANDE & CONSOLI (2002) e SANTIAGO (2011) observaram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de endurecimento.

- **PROPAGAÇÃO DE FISSURAS**

Esta propriedade é comumente referida como tenacidade, e representa o trabalho das fissuras ou a capacidade de absorção de energia do compósito (CASAGRANDE, 2005).

A inserção de fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração, a deformação de ruptura e a tenacidade pelo controle da abertura e do espaçamento e com isso o controle da propagação das fissuras (TAYLOR, 1994). Hannant (1994) acredita que as fibras que atravessam as fissuras aproximam as interfaces das fissuras, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração pelo aumento da ductilidade.

- **DEFORMABILIDADE**

McGown et al. (1985) estudando areias e Maher & Ho (1994) e Nataraj et al. (1996) estudando argilas, observaram um aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto

maior o teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997) e Consoli et al. (1999) verificaram uma redução do módulo com a inclusão de fibras para areias cimentadas e não cimentadas. A deformabilidade dos compósitos é dependente das características da matriz e do elemento de reforço.

Consoli et al. (2007) avaliaram que quanto maior é o deslocamento cisalhante no ensaios, maior vai ser a quantidade de fibras rompidas, concluindo que as fibras se alongam até que as deformações do ensaio superem a deformação de ruptura das fibras, porém as fibras sofrem deformações plásticas antes de romper.

- **MODO DE RUPTURA**

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em caráter unânime pelos vários autores que avaliaram este parâmetro (HOARE, 1979; MCGOWN et al. 1985; MAHER & HO, 1994; NATARAJ et al. 1996; CONSOLI et al. 1999; GHAVAMI et al. 1999; CASAGRANDE, 2005; MARTINS, 2014), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior for a quantidade de fibras.

Feuerharmel (2000) afirma que a forma de ruptura do solo é altamente alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA

3.1 MATERIAIS

3.1.1. REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Por medidas de segurança das mineradoras, os rejeitos foram coletados e manipulados por funcionários da companhia e entregues para transporte.

O rejeito de minério de Ferro origina-se dos diques de alteamento, compactado pela passagem dos equipamentos, sobre uma barragem de material de empréstimo. Os rejeitos são transportados por via úmida até as barragens de mineração, onde passam por um processo de ciclonagem que separa as partículas grossas (underflow) e finas (overflow), sendo a parte grossa aquela utilizada para o alteamento da barragem.

As amostras deformadas de rejeito grosso com umidade de 14,0%, foram coletadas por funcionários da mineradora em diferentes posições distanciadas 50 m do eixo central do último dique de alteamento a coleta foi realizada utilizando ferramentas manuais. As amostras foram embaladas e conservadas em sacolas plásticas identificadas e lacradas, para posteriormente serem acondicionadas em caixas e entregues para transporte.

As características de um rejeito de minério estão relacionadas com a forma de deposição deste material, local e idade da jazida, tipo de minério, processo submetido para extração do minério, processo intempéricos que a rocha sofreu. Portanto, ao se caracterizar fisicamente um rejeito, leva-se sempre em consideração que é resultante de uma sucessão de processos físicos e químicos, e que não há necessariamente correlação entre a distribuição de tamanhos das partículas sólidas e a sua composição mineralógica, como ocorre nos solos naturais (Barbosa *et al.*, 2003).

O material aplicado nesta pesquisa é o mesmo utilizado na pesquisa desenvolvida por Sotomayor (2018). Os ensaios de caracterização física foram realizados pelo mencionado autor, em sua pesquisa, para obter propriedades índice como peso específico natural (γ_{nat}), índice de vazios (e), grau de saturação (S) e densidade real dos grãos.

O peso específico seco máximo ($\gamma_{\text{d,máx}}$) e umidade ótima ($w_{\text{ót}}$) foram obtidas por meio do ensaio de compactação na energia Proctor Normal em amostras com e sem polímero para analisar a influência do aditivo.

3.1.2. POLÍMERO

O polímero utilizado é o TERRAFIX 11, trata-se de um copolímero acrílico estirenado, orgânico, obtido por reações de polimerização aleatórias, através de emulsão aquosa com caráter aniônico. O material estudado é produzido pela empresa Waterflows. De acordo com o fabricante, possui densidade de 0,98–1,04 g/cm³, pH 8,0–9,0, e viscosidade 3.000–10.000 cps e totalmente solúvel em água. Segundo informações do fabricante o produto pode ser usado como selante (reductor de poeira) e estabilizante do solo.

As informações sobre a composição quali-quantitativa do material não foram fornecidas pelo fabricante, devido sigilo comercial e industrial. A Tabela 3.1, fornecida pelo fabricante, apresenta informações de três compostos que podem possuir impurezas com potencial toxicológico.

Tabela 3.1. Componentes toxicológicos do produto (Fonte: Waterflows)

Composto Químico	Fórmula Química	Faixa de Concentração (%)
Éster de ácido acrílico na forma livre	C ₃ H ₄ O	< 0,5
Vinil Benzeno	C ₈ H ₈	< 0,5
Amoníaco em Solução	H ₅ NO	< 0,25

Visando um maior conhecimento do material e possíveis reações com o rejeito foram realizadas caracterizações química e biológica do polímero.

A aplicação do polímero no rejeito foi realizada em duas dosagens. Uma solução polimérica contendo 25% de polímero e 75% de água, ou seja, na proporção de 1:4 em volume, seguindo a utilização do fabricante, após a solução ficar bem homogênea foi misturada ao rejeito e moldados os corpos de prova. A segunda solução continha 50% de polímero e 50% de água, ou seja, na proporção de 1:2 do volume total. A adição da solução foi realizada em relação à massa do rejeito seco, na umidade ótima encontrada para os compósitos. A Figura 3.1 apresenta o rejeito e polímero utilizado.

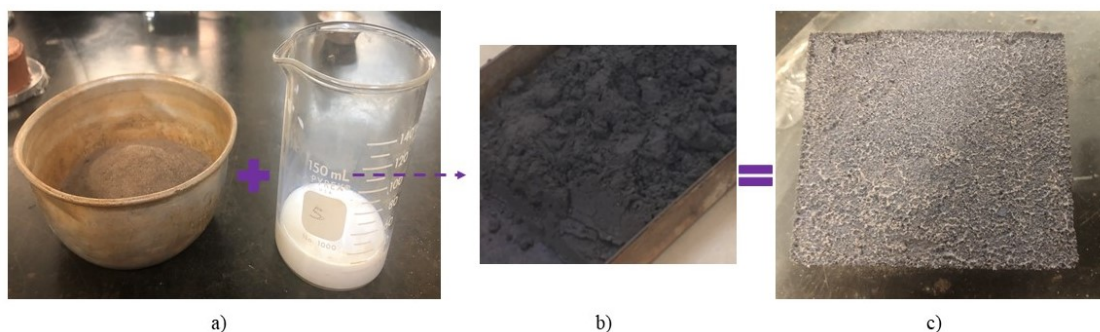


Figura 3.1. a) Materiais utilizados rejeito e polímero, b) Rejeito e polímero misturados, c) Corpo de prova moldado.

3.1.3. FIBRAS DE POLIPROPILENO

As fibras sintéticas de polipropileno foram fornecidas pela empresa Maccaferri e selecionadas para reforçar os rejeitos de mineração pela resistência ao ataque álcali e ácido que possuem. O produto de uso comercial é geralmente indicado para reforço de concretos e argamassas apresentando boa trabalhabilidade para gerar compósitos homogêneos.

Diante dos ensaios a serem executados, com moldes de dimensões 60x60 mm, foram escolhidas as fibras de 24 mm de comprimento, como mostra a Figura 3.2, pois estas devem possuir menor comprimento que o diâmetro da amostra, para assegurar uma boa distribuição das fibras.



Figura 3.2. Fibras de polipropileno.

A Tabela 3.2 apresenta as principais características técnicas da fibra fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.2. Características técnicas das fibras de polipropileno.

Propriedades físicas	Valor
Diâmetro (μm)	18
Comprimento (mm)	24
Peso específico (g/cm^3)	0,91
Propriedade Mecânicas	
Resistência à tração (MPa (N/mm ²))	300
Módulo de Young (MPa)	3000

Segundo Sotomayor (2018), as fibras de polipropileno utilizadas apresentaram resistência à tração mínima de 325 Mpa apresentando assim, coerência com a resistência fornecida pelo fabricante (300 MPa).

As fibras sintéticas de polipropileno foram aplicadas na proporção de 0,5 % em relação ao peso seco do rejeito, valor este escolhido de acordo com estudos realizados em diversas pesquisas encontradas na literatura. O procedimento de preparação das amostras consistiu em: primeiramente desfiar as fibras para que ficassem soltas, adicioná-las ao rejeito em um recipiente e por fim, misturar a solução de polímero, conforme descrito anteriormente. Este procedimento, conforme apresentado na Figura 3.3, foi adotado para moldagem de todos corpos de prova.

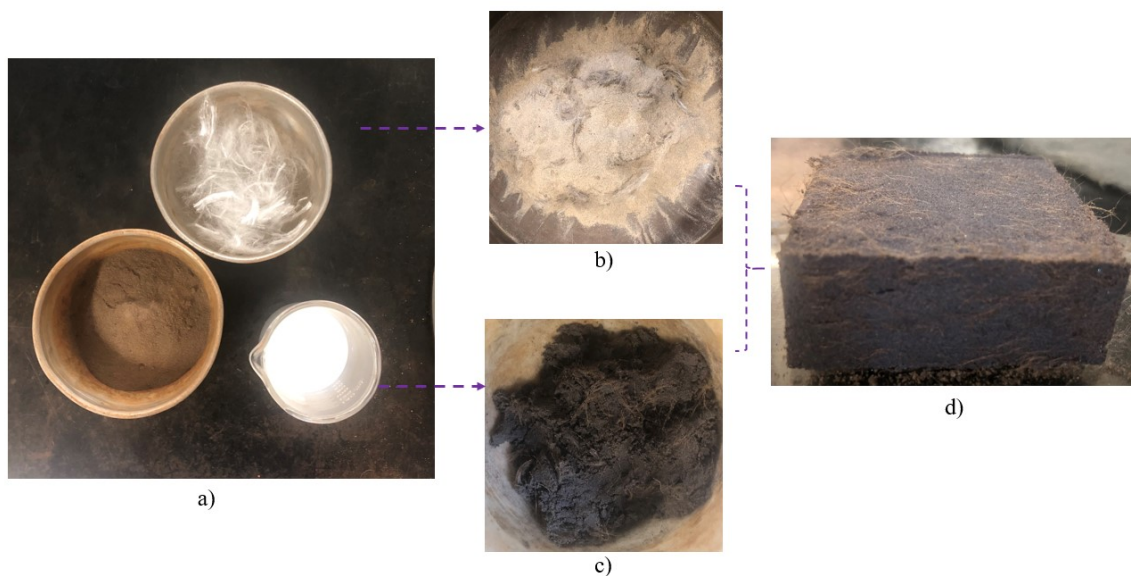


Figura 3.3. a) Materiais utilizados rejeito, fibra e polímero, b) Rejeito e fibra desfiada, c) Rejeito, fibra e solução polimérica misturados, d) Corpo de prova moldado.

3.1.4. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Em todos ensaios realizados os corpos de prova foram moldados com teor de umidade ótima e peso específico seco máximo, cujos valores foram obtidos através do ensaio de compactação com energia Proctor Normal, tanto para as amostras quanto para os compósitos, adicionando a solução polimérica.

Os corpos de provas foram moldados no Laboratório de Geotecnia do PPG- Universidade de Brasília, de acordo com os ensaios a serem realizados. Para realização do ensaio de cisalhamento direto, utilizou-se um molde metálico de seção transversal quadrada com lados de 60 mm e altura igual a aproximadamente 25 mm. O rejeito de minério de ferro

foi moldado diretamente no molde metálico, a quantidade de material foi calculada segundo o volume do molde. Na Figura 3.4 estão apresentadas fotografias obtidas durante a moldagem dos corpos de prova.

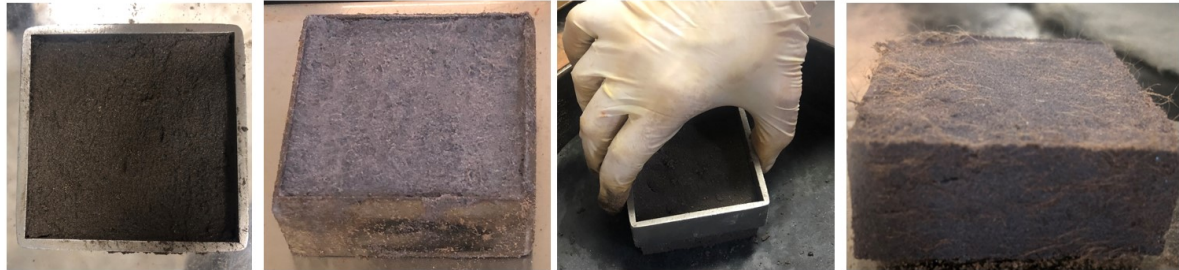


Figura 3.4. Etapas de moldagem, desmoldagem e cura ao ar do compósito.

Durante a moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio de resistência à compressão não confinada, módulo de resiliência e de absorção d'água, utilizou-se um molde circular de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. O rejeito de minério de ferro foi compactado no cilindro com energia Proctor Normal. Na Figura 3.5 mostra-se o corpo de prova após a moldagem.

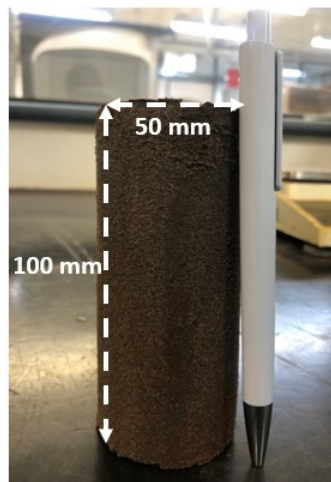


Figura 3.5. Corpo de prova utilizado para realização dos referidos ensaios.

Para análise da sucção total no equipamento WP4C, as amostras possuíam dimensões de 10 mm de altura e com 20 mm de diâmetro (Figura 3.6). Novamente a moldagem foi feita com valores obtidos no ensaio de compactação na energia de Proctor Normal.



Figura 3.6. Corpo de prova utilizado para realização do ensaio de sucção.

O tempo de cura dos corpos de prova ocorreu com umidade do ar de 20-40% e temperatura de 21-35°C, para que, assim, fosse possível analisar o comportamento mecânico do rejeito e a influência dos aditivos. No procedimento de cura ao ar, uma de suas faces ficava exposta durante o período de 24 horas, posteriormente alternava-se a face exposta, prosseguindo até o tempo final de cura para que houvesse a maior semelhança possível nas faces.

O tempo de cura analisado para ambos ensaios de cisalhamento direto, determinação da resistência não confinada, triaxial cíclico de cargas repetidas (módulo de resiliência) e WP4C (medidor de potencial hídrico- sucção total), foram realizados com tempo de cura de 0,7,14 e 28 dias, exceto determinação da resistência não confinada que não foi possível realizar o ensaio de 0 dias.

Alguns ensaios realizados nos compósitos ocorreram com 28 dias de cura como determinação do módulo de resiliência para misturas asfálticas, dano de umidade, determinação da resistência à tração por compressão diametral, ensaio da Hamburg Wheel-Track, determinação de permeabilidade, determinação da absorção d'água, avaliações químicas, ambientais e microestruturais.

Após o ensaio de cisalhamento direto convencional, como já mencionado anteriormente, foi realizado também o ensaio de plano cisalhado com superfície polida, na mesma amostra. Para isso, retirava-se a caixa e para separar a parte superior e inferior, arrastou-se um fio fino de nylon resistente através da superfície cisalhada entre ambas as caixas no sentido do plano de cisalhamento. Com as caixas separadas e com auxílio de um uma régua ligeiramente umedecida, procedeu-se ao alisamento das superfícies sempre na direção do plano de cisalhamento como mostra a Figura 3.7.

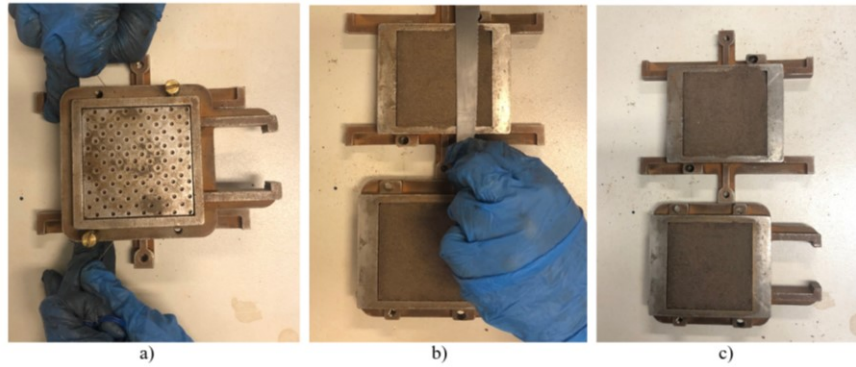


Figura 3.7. a) Polimento realizado com fio de nylon resistente; b) regularização da superfície; c) caixa após polimento.

Em seguida, as caixas foram colocadas em contato, parafusadas e recolocadas no carro guia do equipamento de cisalhamento direto. Todo o ensaio foi realizado novamente, desde a fase de adensamento até o cisalhamento.

O ensaio de permeabilidade foi realizado no rejeito puro, seguindo a NBR 13292 (ABNT, 1995) e nos compósitos seguindo a NBR 14545 (ABNT, 2000).

Para realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e determinação do módulo de resiliência em mistura asfáltica para os compósitos foram utilizadas amostras cilíndricas com as dimensões de 60 mm de altura e 100 mm de diâmetro. O corpo de prova final está representado na Figura 3.8.

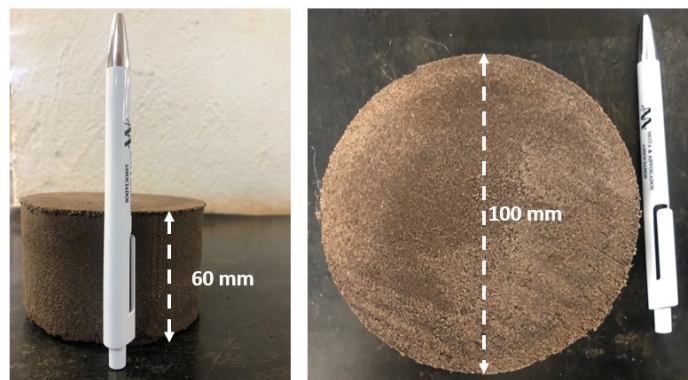


Figura 3.8. Corpo de prova moldado para ensaios adaptados em mistura asfáltica.

O ensaio de dano por umidade induzida, também foi adaptado. Foram utilizadas amostras cilíndricas com as dimensões de 33 mm de altura e com 50 mm de diâmetro. A compactação foi realizada na base de MCT, colocando-se um papel filtro como divisor entre camadas, obtendo-se assim 03 corpos de prova por cilindro (Figura 3.9).

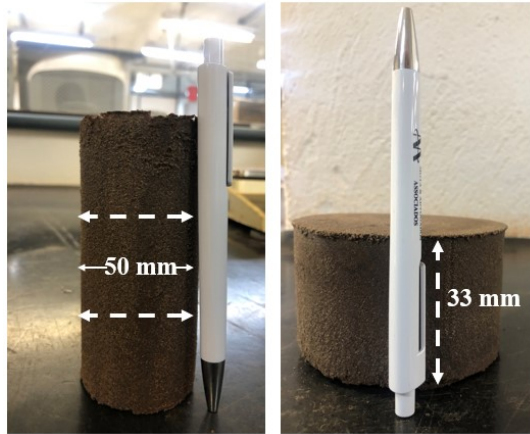


Figura 3.9. Corpo de prova gerado para ensaio de umidade induzida.

O ensaio estilo simulador de tráfego laboratorial, Hamburg Wheel-Track, foi adaptado para viabilizar a avaliação do desgaste permanente da superfície dos compósitos. Para isso, foram confeccionadas amostras retangulares com as dimensões de 300 por 400 mm e com 60 mm de altura. O corpo de prova está representado na Figura 3.10.

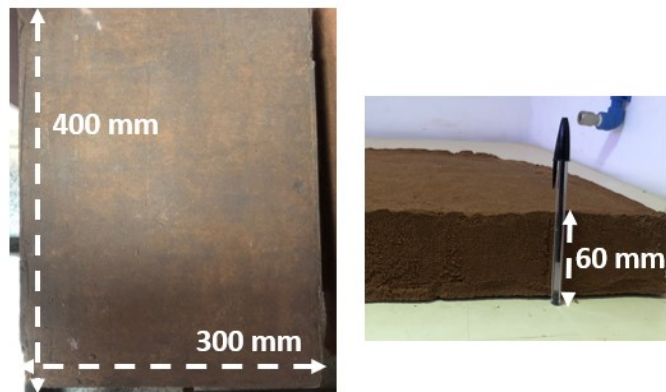


Figura 3.10. Corpo de prova usado para ensaio de simulador de tráfego.

As amostras analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) e Florescência de Raio-X (DRX), possuíam dimensões de 10 mm de altura e 10 mm de diâmetro (Figura 3.11).

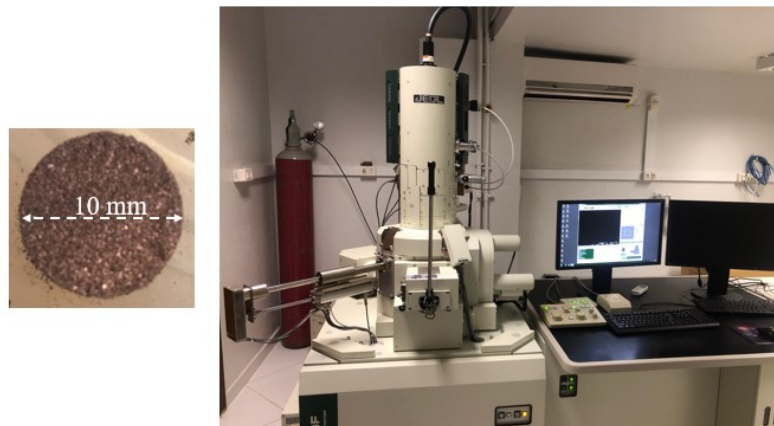


Figura 3.11. Corpo de prova e equipamento utilizado para ensaio de MEV e fluorescência de RaioX.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Nos itens seguintes são descritos os ensaios realizados para a caracterização mecânica, ou seja: compactação, resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, desgaste da superfície em simulador de tráfego laboratorial.

3.2.1.1 COMPACTAÇÃO

A energia utilizada para realização dos ensaios foi energia de Proctor Normal. Os resultados obtidos no ensaio de compactação com a energia normal foram para preparar os corpos de prova de todos os ensaios realizados.

A compactação para os compósitos foi realizada adaptada seguindo as recomendações da norma. Ao invés da adição de água a cada ponto era realizada a adição de solução polimérica. A solução foi preparada na dosagem desejada, em seguida, adicionada em massa em relação ao solo seco. Desta forma, garantiu-se que todo material foi umidificado com a solução polimérica de maneira equivalente.

3.2.1.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

A realização do ensaio foi conduzida de acordo com a norma NBR 12770 (ABNT, 1992). Os corpos de prova possuem 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

O ensaio é realizado com aplicação de uma carga axial e velocidade de 1,27 mm/min. Para obter a curva completa e possibilitar a comparação entre os compósitos, nas diferentes dosagens e tempos de cura o ensaio foi realizado até rompimento do corpo de prova dos compósitos rejeito-polímero ou deformação no caso dos compósitos rejeito-polímero-fibra, devido não haver o rompimento. Padronizou-se as curvas por tempo de ensaio para, dessa maneira, entender o comportamento dos compósitos nas diferentes dosagens de solução polimérica. A Figura 3.12 apresenta o equipamento e um corpo de prova sendo ensaiado.



Figura 3.12. Prensa utilizada para realização do ensaio.

Vale ressaltar que não foi possível a realização do ensaio com o rejeito puro e nem sem cura, por se tratar de um ensaio não confinado.

3.2.1.3. CISALHAMENTO DIRETO

A caracterização mecânica do material estudado foi realizada através de ensaios de cisalhamento direto convencionais com plano cisalhado e superfície polida nas amostras não reforçadas e reforçadas. O equipamento foi fabricado pela marca ELE International Limited

England, pertencente ao Laboratório Geotecnia da Universidade de Brasília. A norma D3080/D3080M-11 (ASTM, 2011a) foi utilizada como referência para os ensaios.

Esse ensaio busca a determinação dos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito, estabelecendo, então, a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb em tensões efetivas.

Tanto na etapa de adensamento quanto na etapa de cisalhamento, os corpos de prova foram mantidos com teor de umidade próximo ao teor de umidade ótima da compactação. Vale ressaltar que o ensaio foi realizado em condição não saturada, considerando os diferentes tempo de cura.

Os corpos de prova foram colocados na caixa de cisalhamento sobre um conjunto que consistia papel filtro, placa porosa, placa ranhurada e em sua parte superior é colocado o mesmo conjunto. Em seguida, a tampa da caixa foi colocada e acima dela, colocou-se o transdutor do tipo LVDT (Linear Variable Diferencial Transformer), com a finalidade de registrar os deslocamentos verticais. A medição da força horizontal foi feita por um anel de carga e o deslocamento horizontal por um LVDT. Todas as leituras dos instrumentos foram registradas por um sistema de aquisição de dados e o software utilizado na execução do ensaio foi o DS7, a Figura 3.13 ilustra o equipamento de cisalhamento.

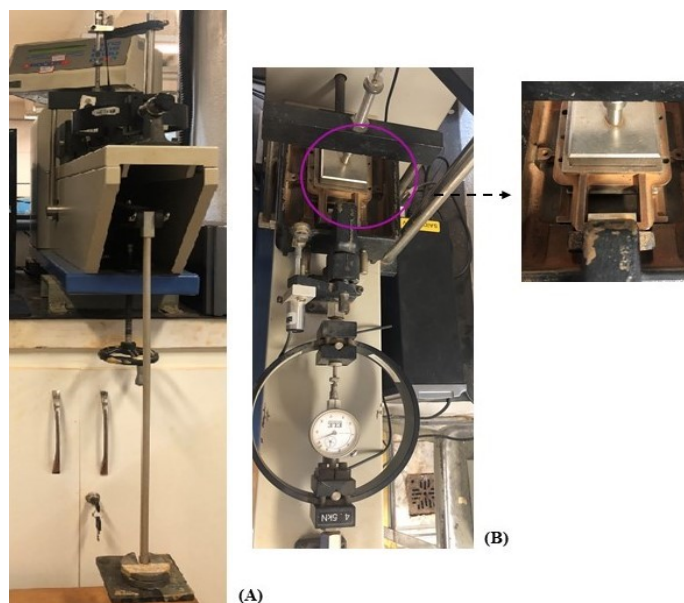


Figura 3.13. a) Equipamento de cisalhamento direto; b) posição dos instrumentos e detalhe do ensaio Corpo de prova utilizado para realização do ensaio de sucção.

As tensões de confinamento aplicadas foram 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. O procedimento de ensaio consistiu em forçar o cisalhamento da amostra em um plano horizontal, registrando-se o deslocamento horizontal, o deslocamento vertical e a carga cisalhante aplicada.

O máximo deslocamento horizontal ensaiado foi de 8 mm, em função das características do equipamento.

Vale ressaltar que as amostras foram adensadas durante o tempo necessário para ocorrência de 100% do consolidação primária, sendo aplicadas tensões normais de 50kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para construção da envoltória de Mohr-Coulomb.

Com base nas curvas de adensamento, foi possível definir a velocidade máxima de cisalhamento dos corpos de prova. O cálculo foi feito conforme a norma D 3080 (ASTM, 2011b), sendo utilizado o método de Taylor (Taylor, 1948) na definição do tempo necessário para ocorrência de 90% do adensamento primário, denominado parâmetro t_{90} . Adotou-se velocidade de cisalhamento igual a 0,5 mm/min.

Vale ressaltar que esse ensaio foi realizado nos compósitos, logo os valores obtidos referente aos parâmetros de resistência tratam-se de um intercepto coesivo e ângulo de atrito efetivo.

3.2.1.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio foi realizado no laboratório do DER (Departamento de Estradas e Rodagem) do Distrito Federal, de acordo com a norma 136/2018 (DNIT, 2018). A velocidade de deformação referente a aplicação da carga vertical de compressão foi de 0,8 mm/s até a ruptura completa do corpo de prova. Na Figura 3.14 é apresentado o equipamento utilizado e o corpo de prova rompido.

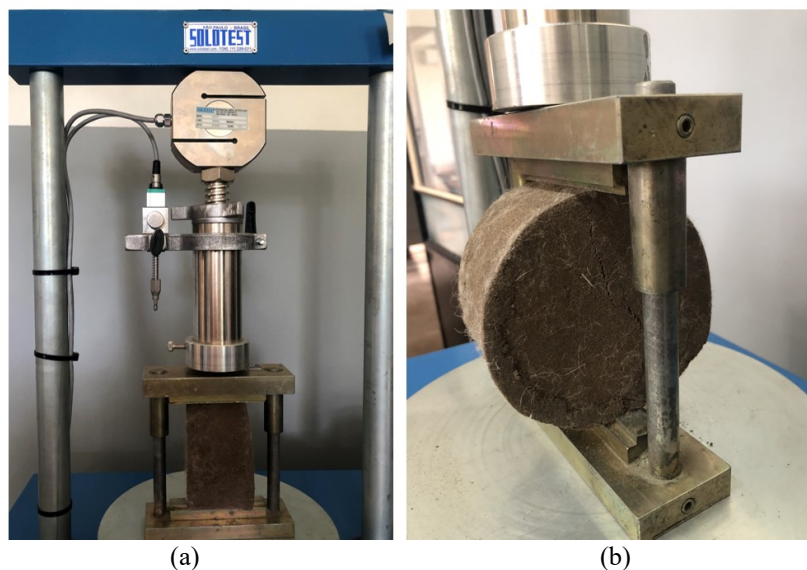


Figura 3.14. (a) Prensa utilizada para realização do ensaio; b) corpo de prova após ruptura.

O cálculo de resistência à tração (σ_R) consiste na razão entre a carga de ruptura (F) e o diâmetro de corpo-de-prova (D) e sua altura (H), de acordo com a expressão:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \times 100 \quad (3.1)$$

Em seguida é feita uma média aritmética e é determinado o valor da resistência à tração por compressão diametral (RT) para os compósitos.

3.2.1.5. TRIAXIAL CÍCLICO DE CARGAS REPETIDAS - MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Segundo Medina e Motta (2015), resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando encerram as tensões geradoras das deformações.

Os ensaios realizados para determinação do módulo resiliência seguiram a norma americana (AASHTO, 1999) nomeada Standart Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soil sand Aggregate Materials, os ensaios foram executados no equipamento triaxial cíclico, da marca ELE International Limited England, pertencente ao Laboratório de Infraestrutura Rodoviária- INFRALAB da Universidade de Brasília (Figura 3.15). O software utilizado na execução do ensaio foi o UTM41, que já se encontra programado com as especificações da norma americana.

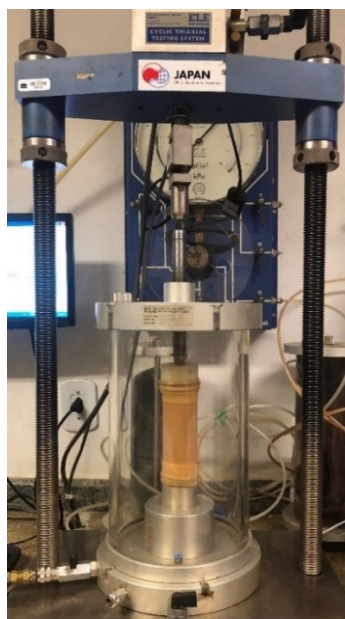


Figura 3.15. Equipamento triaxial cíclico com corpo de prova sendo ensaiado.

O equipamento consiste em uma câmara triaxial com sistema de ar comprimido, que possibilita a aplicação da tensão confinante, pórticos de reação para aplicação da tensão desvio e transdutores do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), para medir os deslocamentos verticais.

Os corpos de prova possuíam dimensões iniciais de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e foram compactados na umidade ótima e densidade aparente seca máxima. Estes corpos de prova foram assentados na base da câmara triaxial sobre um papel filtro e em sua parte superior é colocado um cabeçote (top cap). Após, foi inserida a membrana de borracha no corpo de prova e fixada nas extremidades com o-rings de borracha. Em seguida, instalou-se a câmara triaxial e fixaram-se os dois LVDTs que possibilitam a medição dos deslocamentos verticais do corpo de prova. Logo após, posicionou-se a célula de carga, possibilitando a transferência de carga ao corpo de prova e fez-se um ajuste final nos LVDTs.

O ensaio triaxial cíclico é geralmente dividido em duas fases: condicionamento e de determinação do módulo de resiliência. A primeira consiste em aplicar um par de tensões, confinante e tensão desvio, com intuito de eliminar as deformações plásticas (permanentes) e reduzir o efeito da história de tensões no valor do módulo de resiliência a ser obtido. Nos ensaios triaxiais cíclicos a fase de condicionamento consistiu na aplicação de 500 repetições de carga, com tensão desvio de 103,4 MPa e tensão confinante de igual valor, segundo especifica a norma americana (AASHTO, 1999).

Na fase seguinte, de determinação do módulo de resiliência, aplicou-se uma sequência de 15 pares de tensões (Tabela 3.3), conforme os valores especificados pela norma (AASHTO, 1999), com 100 aplicações de carga por ciclo. Todas as cargas repetidas foram aplicadas numa frequência de 1 Hz, sendo 0,1 segundo de aplicação e 0,9 segundos de intervalo.

Conforme citado anteriormente, os ensaios de módulo de resiliência foram executados com o corpo de prova submetido a cura, para este ensaio o corpo de prova foi submetido a 0 dias de cura, 4 dias de cura, 7 dias de cura, 14 dias de cura e 28 dias de cura.

Tabela 3.3. Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (AASHTO, 1999).

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)
20,7	20,7
	41,4
	62,1
34,5	34,5
	68,9
	103,4
68,9	68,9
	137,9
	206,8
103,4	68,9
	103,4
	206,8
137,9	103,4
	137,9
	275,8

O ensaio com o rejeito puro, foi realizado adicionando o teor de umidade ótima referente ao ensaio de compactação. A moldagem ocorreu diretamente na base do equipamento triaxial dinâmico, através da aplicação de pressão de sucção na membrana, com uso de um molde bipartido.

A modelagem e tratamento dos resultados foram realizados utilizando o software LABFit Curve Fitting – V.7.2.50.

- **Ensaio de determinação do módulo de resiliência – ensaio para misturas asfálticas.**

O ensaio foi adaptado seguindo a norma (DNIT, 2018). Para a obtenção do módulo de resiliência é realizada a aplicação de carga cíclica com frequência de 1 Hz (60 aplicações por minuto) com duração de 0,1 s. Inicialmente aplica-se um pré-condicionamento de 195 aplicações, durante cinco ciclos, as leituras são necessárias para o cálculo do módulo. Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3. O ensaio do corpo de prova adaptado é apresentado na Figura 3.16.

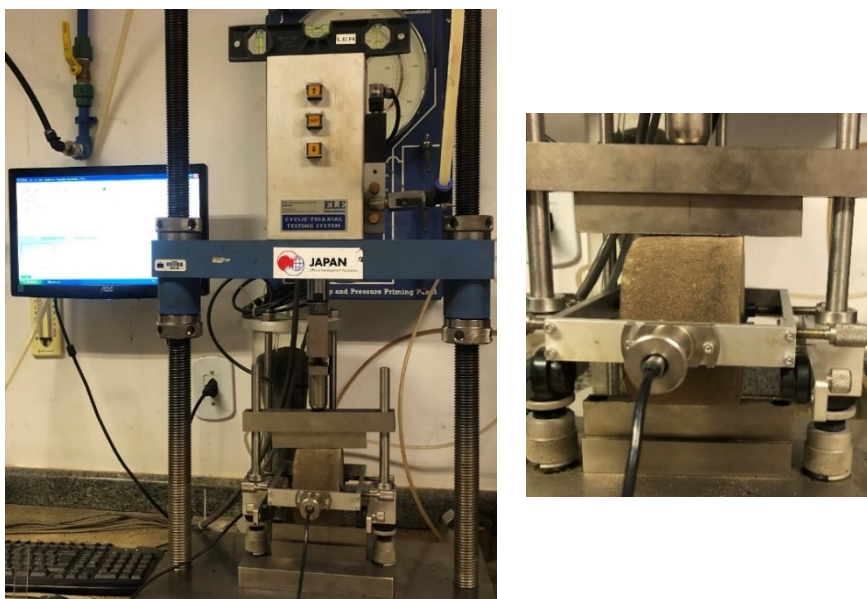


Figura 3.16. Ensaio para determinação do MR para mistura asfáltica com detalhe para o corpo de prova.

Vale ressaltar que o ensaio foi realizado com 30% dos valores de resistência à tração obtidos para cada compósito por meio do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.2.1.6. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

O ensaio foi adaptado baseando-se na norma (DNIT, 2018). O ensaio consistiu primeiramente em deixar os corpos de prova submersos em água por 48 horas a temperatura de 25°C, com a finalidade de saturá-los (Figura 3.17 a). Posteriormente, colocou-se os corpos de prova dentro de sacos plásticos impermeáveis, com água em seu interior e resfriou-se a uma temperatura de -8° C pelo mesmo período (Figura 3.17 b). Após as duas análises iniciais, colocou-se os corpos de prova, em banho maria em água a temperatura de 60° C por 24 horas e em seguida deixou-se por mais 24 horas, porém reduzindo-se a temperatura para 25° C (Figura 3.17 c). Por fim, os corpos de prova foram secados superficialmente (Figura 3.17 d) e depois de 4 horas realizou-se os ensaiados (Figura 3.17).

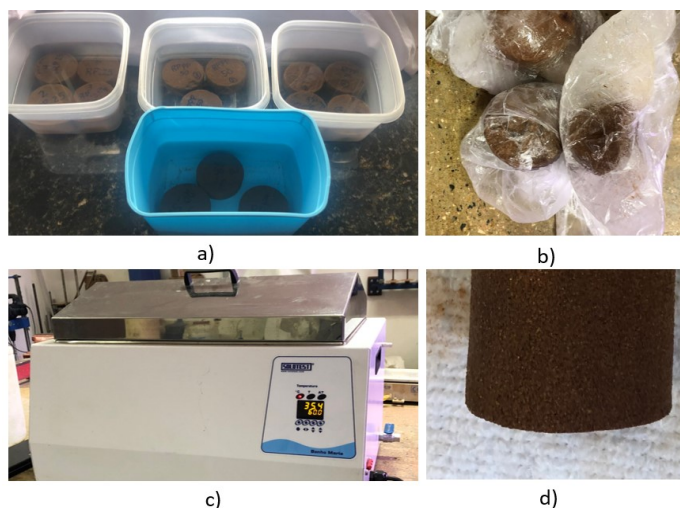


Figura 3.17. Procedimento da realização do ensaio de dano por umidade induzida.

O ensaio foi realizado em dois conjuntos, com 3 corpos de prova, e realizada uma média das resistências com e sem a indução das umidades submetidas.

A realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi no laboratório do DER do Distrito Federal. A velocidade de ensaio foi de 1,28 mm/minuto, para seguir a mesma velocidade do ensaio compressão simples, e se deu até a ruptura completa do corpo de prova. A Figura 3.18 apresenta o equipamento utilizado e a realização do ensaio.

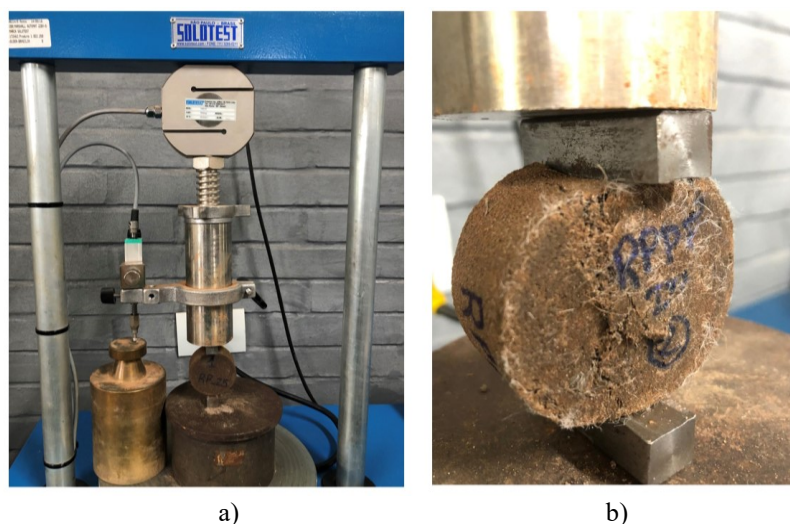


Figura 3.18. a) Prensa utilizada para realização do ensaio; b) Corpo de prova reforçado com fibra rompido após ensaio.

Os corpos de prova possuíam dimensões aproximadas 3,3 cm de altura e 5 cm de diâmetro para que fosse mantido o mesmo padrão de compactação realizados para os ensaios de determinação do MR e de resistência a compressão simples. O cálculo do valor da resistência

à tração por compressão diametral foi obtido utilizando a Equação 3.1 apresentada no item anterior.

A razão à tração retida (RTT) consiste na razão entre o valor médio da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que passaram por condicionamento (RTc) e o valor médio da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que não passaram (RT), de acordo com a expressão:

$$RTT = \frac{RTc}{RT} \times 100 \quad (3.2)$$

3.2.1.7. SIMULADOR DE TRÁFEGO LABORATORIAL - HAMBURG WHEEL-TRACK ADAPTADO

O equipamento DWT - Double Wheel Tracker, desenvolvido pela IPC global, Controls Grup e CVI TECH, apresentado na Figura 3.19, foi utilizado para avaliação do desgaste e deformação da amostra. O ensaio simula o tráfego, sob carga cíclica, avaliando a profundidade da deformação de acordo com as passagens repetidas de uma roda a certa temperatura.

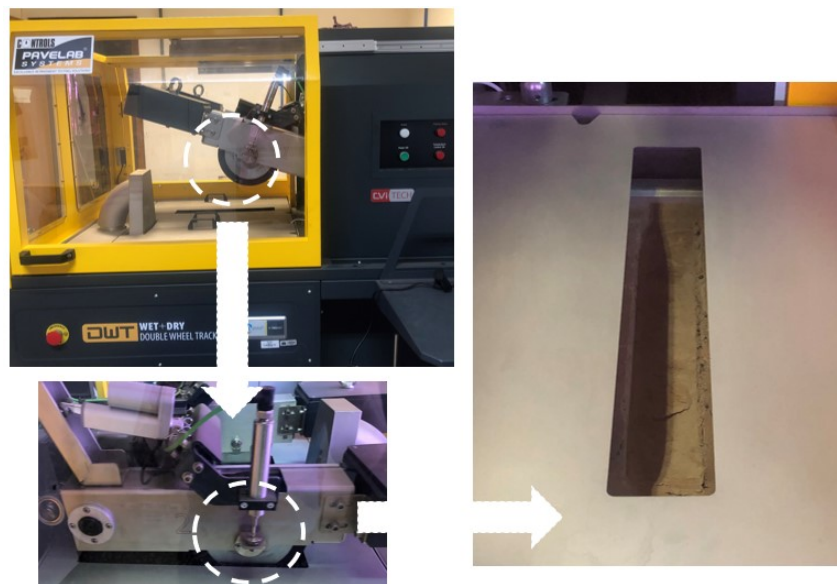


Figura 3.19. DWT - Double Wheel Tracker.

O equipamento disponível no Infralab é o modelo universal o qual compila tanto a norma EN 12697-22 e quando a AASTHO T-324. A realização do ensaio no rejeito puro, não foi possível devido a impossibilidade da moldagem da placa a ser ensaiada.

A Tabela 3.4 são apresentadas as informações das normas e o que foi adotado, de cada norma, para a realização do ensaio.

Tabela 3.4. Critérios das normas e adotados para realização do ensaio.

Critérios	AASTHO T-324	EN 12697-22 B	Adotados
Nº máximo de ciclos (critério de parada)	10.000	10.000	10.000
Nº de ciclos por minuto	26 ciclos/min	26,5 ciclos/min	26 ciclos/min
Tipo de roda e dimensões	Metálica (aço)	Borracha	Borracha
Diâmetro	203 mm	203 mm	203 mm
Largura	47 mm	50 mm	50 mm

Um ciclo corresponde a duas passadas, ou seja, ida e volta da roda. A carga de aplicação, a roda, varia de 700 a 1500 N por se tratar da avaliação da deformação considerando a utilização em estradas vicinais, o valor adotado foi o menor. O trilho de roda é 203 mm e o critério de parada para deformação máxima foi de 25 mm. A temperatura inicial do ensaio foi de 26,0° C e ao longo do ensaio houve aumento da temperatura com aumento das passadas sem interferir nos resultados.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

Nos itens a seguir serão explicados os ensaios realizados no material estudado para a caracterização hidráulica, os quais são: determinação da sucção total pelo método do psicrômetro, determinação do coeficiente de permeabilidade e determinação da absorção de água.

3.2.2.1. SUCCÃO TOTAL

O ensaio de psicrômetro (WP4C), fornece valores de sucção total de 0 a 300 MP conforme a ASTM D6836. Há a determinação das cargas de sucção com base na lei psicométrica, segundo a qual a sucção da água do solo em equilíbrio com o ambiente está relacionada termodinamicamente à umidade relativa do ar (FREDLUND & RAHARDJO, 1993). Na Figura 3.20 mostra-se o equipamento e um corpo de prova utilizado.

Os corpos de prova foram moldados para a energia Proctor Normal, controlando o par de umidade ótima e massa específica seca. As amostras foram colocadas no molde com

dimensões de 10 mm de altura e 20 mm de diâmetro em seguida foram colocadas na cápsula e posteriormente no aparelho WP4C para obtenção da sucção total.



Figura 3.20. Equipamento utilizado para obtenção de valores de sucção total.

As leituras foram realizadas as 9 horas da manhã e 18 horas, para que assim obter maior controle das leituras. As leituras foram realizadas com o rejeito puro e compósitos moldados com valor de umidade ótima e peso específico seco máximo. Vale mencionar que o objetivo do ensaio não era a obtenção da curva característica do material, mas sim o entendimento, ao longo do tempo, do acréscimo da sucção com o avanço da cura do compósito.

3.2.2.2 EXPANSÃO

O ensaio foi realizado seguindo a norma DNIT 172 (DNIT, 2016) no rejeito puro e nos compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra em ambas proporções estudadas.

3.2.2.3. COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

O ensaio para obtenção do coeficiente de permeabilidade foi realizado de acordo com a norma NBR 13292 (ABNT, 1995) que especifica a metodologia para determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante.

A determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável, foi realizada de acordo com a norma NBR 14545 (ABNT, 2000).

Na Figura 3.21 estão representados os corpos de prova e equipamentos para a realização de ambos ensaios.

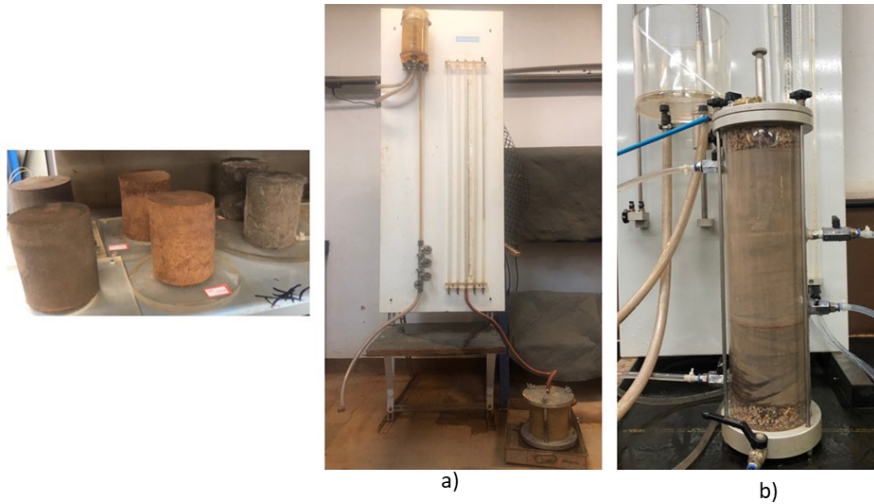


Figura 3.21. Materiais e métodos para a determinação do coeficiente de permeabilidade (a) carga constante e (b) carga variável respectivamente.

3.2.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A determinação da absorção de água dos compósitos foi realizada seguindo a norma NBR 13555 (ABNT, 2012). Após a moldagem os corpos de prova, foram deixados em cura por 28 dias. Posteriormente foram obtidas as dimensões, os pesos e em seguida os corpos de prova foram submersos em água por 24 horas à temperatura ambiente. Após esse tempo retirou-os da imersão, secados superficialmente com um pano úmido e pesados novamente. A Figura 3.22 ilustra a metodologia descrita.



Figura 3.22. Método para determinação da absorção de água dos compósitos.

3.2.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-AMBIENTAL

Nos itens seguintes é discorrido os ensaios realizados para a caracterização químico-ambiental, os quais são: espectrometria de fluorescência de raios X, análise elementar CHN, e análise do lixiviado.

3.2.3.1. ESPECTROMETRIA DE FLORESCÊNCIA DE RAIOS X

O ensaio de espectrometria consiste em determinar a mineralogia do compósito e do polímero por meio de sinais de raios-X. Os elementos individuais presentes a serem ensaiados emitem seus raios-X característicos (fluorescentes) e o espectrômetro (EDS) detecta estes raios-X e, qualitativamente, determina quais elementos estão presentes no material.

A realização do ensaio deu-se na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ). O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva EDX-720 Shimadzu. O equipamento faz uma determinação quantitativa e qualitativa dos elementos presentes na amostra analisada e foi realizado para o polímero puro e para os compósitos em ambas dosagens.

3.2.3.2. ANÁLISE ELEMENTAR CHN

A análise elementar CNH (Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio) foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ). O equipamento utilizado para o a realização do ensaio foi o analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 série II.

Este equipamento determina a pureza de um composto de coordenação. A técnica é baseada na combustão de uma amostra em altas temperaturas (~900°C) na presença de oxigênio. Através da detecção de gases decorrentes da decomposição do composto, o percentual em massa dos elementos C, H e N são obtidos. Este ensaio foi realizado para o polímero puro.

3.2.3.2. ANÁLISE DO LIXIVIADO

A análise do lixiviado foi efetuada na Central Analítica da Universidade Católica de Brasília (UCB) e no laboratório de águas pertencente a mesma universidade. As análises químicas realizadas foram: benzeno, manganês, nitrogênio, ferro e alumínio. A coleta do lixiviado se deu em ambos os compósitos com 28 dias de cura imersos em água destilada por 7 dias. Decorrido esse período foi coletado o lixiviado e encaminhado para a análise (Figura 3.23).

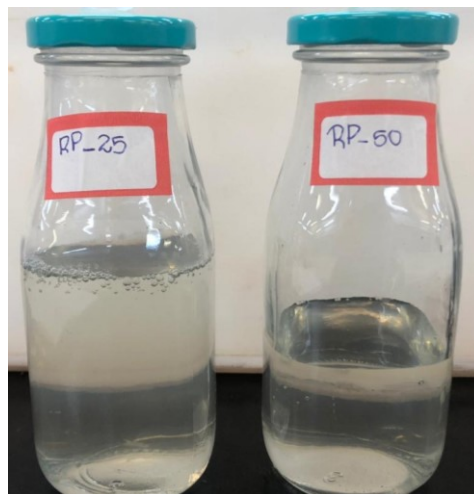


Figura 3.23. Lixiviado coletado.

Analisando o lixiviado dos compósitos como um efluente que será lançado a um corpo hídrico receptor deve-se considerar três resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a norma brasileira da ABNT:

- Resolução CONAMA nº 420 (CONAMA, 2009) – apresentam os critérios e valores orientadores e qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Desta Resolução foi retirado o valor orientador de investigação para água subterrânea.
- Resolução CONAMA nº 430 (CONAMA, 2009) - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes;

- A norma NBR 10004 (ABNT, 2004) – determina a concentração dos limites máximos obtidos no ensaio de lixiviação. O laboratório realizou o ensaio de lixiviação de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004).

3.2.4. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA-ESTRUTURAL

A caracterização mineralógica tem por finalidade a identificação, a caracterização e a quantificação dos minerais presentes nos solos, permitindo a posterior correlação com as demais propriedades geotécnicas observadas. Foi então realizado a caracterização mineralógica no rejeito puro e compósito (rejeito polímero) os quais são: Microscopia Óptica, Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

3.2.4.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A técnica de difratometria de raios-X (DRX), se fundamenta na interação de um feixe monocromático de raios-X com a amostra em diversos ângulos de incidência. A identificação dos minerais é possível pois o espectro de difração de raios-X de uma substância cristalina é único e caracteriza-se pela posição e intensidade dos picos observados no ensaio (Cullity e Stock, 2014).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Difratometria de Raios X no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG - UnB). O equipamento utilizado foi o X-Ray Diffractometer modelo Ultima IV (Figura 3.24) da Rigaku equipado com software específico para tratamento dos dados e identificação dos minerais (Jade 9.0, MDI). Nos ensaios de difratometria de raios-X foram empregadas amostras de rejeito puro, em pó, a preparação das amostras envolveu o quarteamento e homogeneização de volume compatível com o ensaio. As amostras foram destorroadas, passadas na peneira nº 200 e secas em estufa.



Figura 3.24. Difratorômetro de raios-X, sendo indicada amostra de rejeito em pó.

O padrão de difração de pó de uma substância é característico para esta substância e forma uma espécie de impressão digital da mesma. Através deste padrão esta substância pode ser identificada. J. Donald Hanawalt pioneiro nos anos 30 do século XX no desenvolvimento da estrutura de um banco de dados de difração de raios X de pó (Powder Diffraction File - PDF), em 1936, organizou um primeiro banco de dados e classificou cada padrão listando os valores da distância interplanar d e da intensidade I das linhas de difração.

Os resultados são obtidos através de um gráfico, difratograma, onde se tem um eixo do 2θ pelo da intensidade da radiação de raios X. Os detectores registram intensidades que são diretamente proporcionais ao quadrado do fator de estrutura cristalográfico F é uma quantidade complexa (KITTEL, 1953).

3.2.4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

Os microscópios ópticos são instrumentos que fazem uso da refração da luz em lentes para ampliar e enquadrar os elementos em análise, concedendo a observação de estruturas que não são visíveis a olho nu. Nesta pesquisa o uso do microscópio se deu para analisar os grãos do rejeito puro e a forma de agregações após inserção da solução polimérica. Na Figura 3.25 é apresentado o microscópio digital modelo SLQ-M-003 e as imagens do rejeito puro e com solução polimérica, respectivamente, obtidas pelo microscópio óptico.

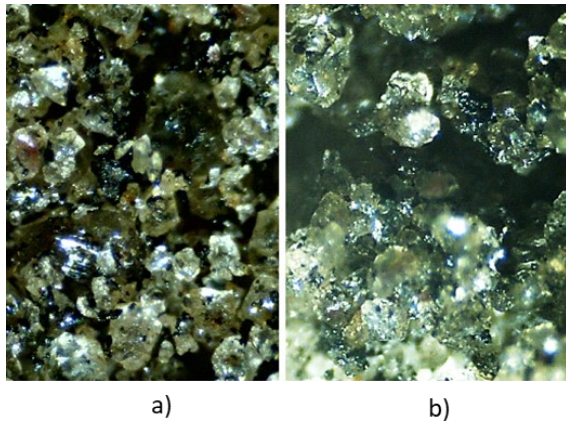


Figura 3.25. Imagens obtidas pelo microscópio óptico (a) rejeito puro e (b) com solução polimérica, aumento de 40x.

3.2.4.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) se tornou um instrumento imprescindível nas mais diversas áreas: geologia, ciência e engenharia dos materiais, etc. O desenvolvimento de novos materiais têm exigido um número de informações detalhadas das características microestruturais para melhor entendimento acerca do comportamento dos materiais.

Os microscópios eletrônicos de varredura (MEV) possuem princípio de funcionamento baseado na emissão de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro e alta energia na superfície da amostra a ser explorada, estando a mesma submetida ao vácuo.

O MEV proporciona informações da morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra, sendo um dos instrumentos mais indicados para análises de características microestruturais de objetos sólidos. Outra vantagem, é a possibilidade de obtenção das características tridimensionais das amostras estudadas (DEDAVID et al. 2007).

Realizou-se ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a caracterização microscópica do rejeito puro e dos compósitos, ambas proporções, para observação do arranjo dos grãos com a inserção das fibras.

O ensaio foi realizado no departamento de Engenharia Mecânica da UnB, no Laboratório de Metalografia/ENM. O equipamento consiste em um Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 7100F com voltagem de aceleração de 30 KV, resolução de 3nm, aumento até 300.000 X com sistema de microanálise de raios-X EDS.

Vale ressaltar que as amostras antes de ensaiadas foram submetidas ao processo de metalização por evaporação de alto vácuo. Este procedimento consiste na deposição de uma cobertura ultrafina de material eletricamente condutivo sobre as amostras, neste caso foi usado o ouro. A Figura 3.26 apresenta os dados e materiais do ensaio de MEV.

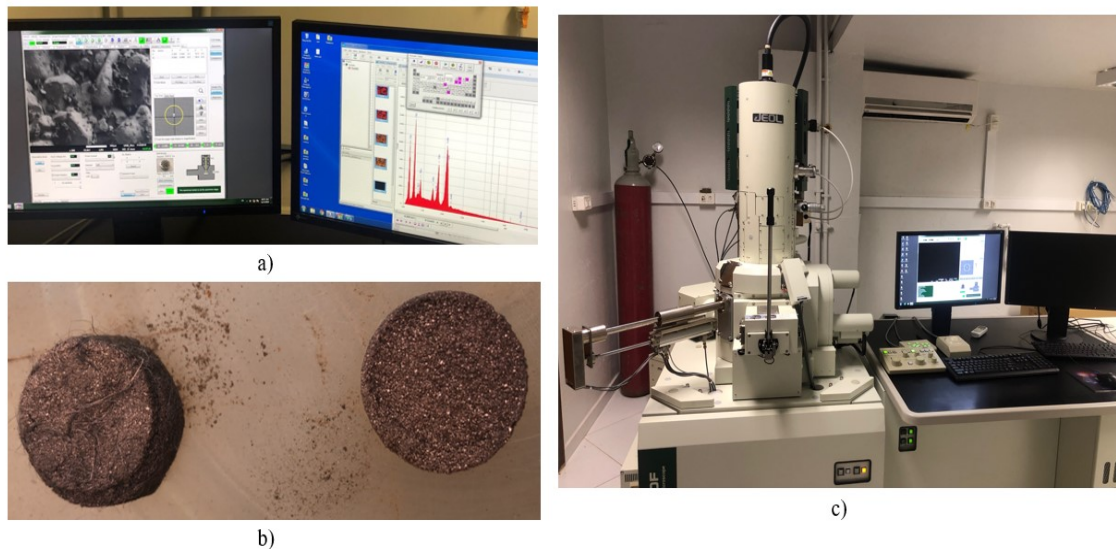


Figura 3.26. Ensaio de microscopia eletrônica de varredura a) dados obtidos durante um ensaio b) compósito rejeito polímero e fibra e compósito rejeito polímero c) equipamento de MEV.

3.2.4.4. ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)

Ao MEV pode ser acoplado o sistema de EDS (*Energy Dispersive System*), técnica analítica empregue para caracterização química de uma amostra possibilitando a determinação de sua composição qualitativa e semi-quantitativa. A técnica consiste em um feixe de elétrons projetado sobre a amostra no MEV, interagindo com os átomos presentes e liberando energia na forma de raios-X, identificando assim, as principais informações sobre a composição da amostra, a separação da radiação contínua é um importante procedimento para a quantificação da composição da amostra em pontos selecionados nas próprias imagens.

A quantidade de energia em cada camada varia de maneira discreta com o número atômico. Os resultados são obtidos em gráficos identificando os principais elementos químicos encontrados. A notação usada para designar as transições são as normalmente usadas na espectrometria de raios-X onde as letras K, L, M, N, em maiúsculas, designam a camada em que ocorreu a ionização, de onde foi retirado o elétron. As letras minúsculas α , β , γ , etc, designam a camada a partir da qual saiu o e^- para preencher o vazio deixado pela ionização.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Na sequência são apresentados os resultados e as respectivas análises dos ensaios empregados para definição das propriedades dos materiais estudados.

4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Sotomayor (2018), para definir a granulometria realizou ensaios de análise granulométrica: peneiramento e sedimentação conforme à NBR 7181 (ABNT, 1984-a).

Na Figura 4.1 é apresentada a curva granulométrica do rejeito de minério de ferro.

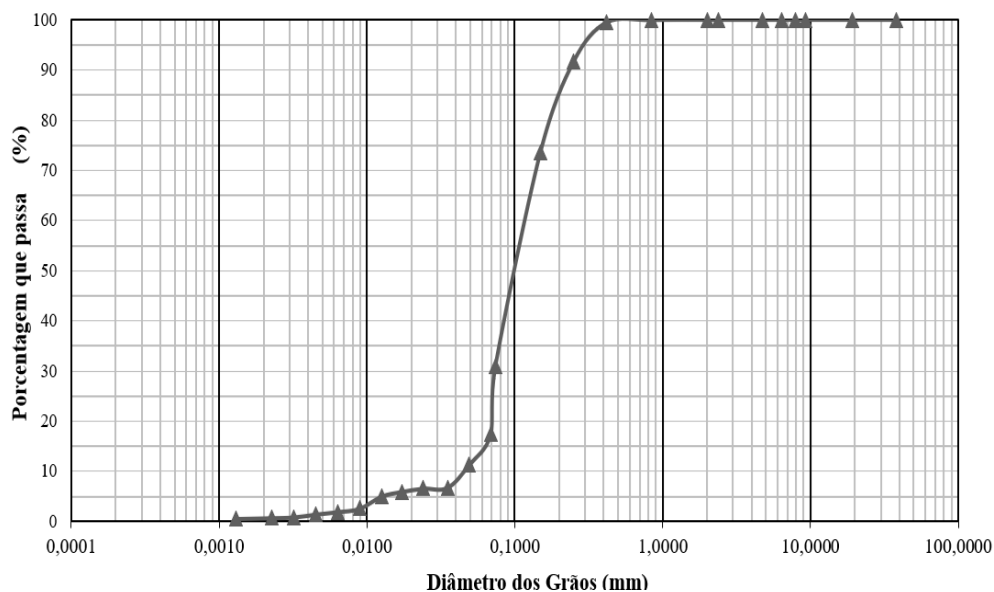


Figura 4.1. Curva granulométrica do rejeito de minério de ferro.

Fonte: Modificado Sotomayor (2018)

Através do Sistema Único de Classificação de Solos (SUCS), o rejeito de minério de ferro, é classificado como dimensões de uma areia siltosa (SM).

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos coeficientes granulométricos relativos ao rejeito de minério de ferro.

Tabela 4.1. Rejeito de minério de ferro

Diâmetro efetivo D10	0,049
Diâmetro médio D50	0,1
Coefficiente de uniformidade (Cu)	1,5
Coefficiente de curvatura (Cc)	0,9

4.1.2. PESO ESPECÍFICO

O peso específico dos rejeitos de mineração são geralmente maiores do que para a maioria dos solos naturais, pois nos rejeitos há uma concentração de óxidos, cuja massa específica é mais alta do que a dos minerais dominantes nos solos naturais, como o quartzo e a caulinita.

As partículas de ferro, apresentam peso específico de aproximadamente de 5,25 g/cm³, enquanto os grãos de quartzo são caracterizados por possuírem um peso específico em torno de 2,65 g/cm³. Logo, os rejeitos de minério de ferro, que são compostos basicamente de partículas de quartzo, hematita e outros minerais, apresentam uma faixa de variação da densidade dos grãos entre estes dois extremos (Pereira, 2005).

4.1.3. DENSIDADE RELATIVA DOS GRÃOS

Na Figura 4.2 apresentam-se alguns resultados da densidade relativa dos grãos de rejeitos mineração de ferro, existentes na literatura, pode-se observar coerência com o valor de 2,89 obtido por Sotomayor (2018), com os valores encontrados na literatura. Este valor foi adotado para os ensaios nesta pesquisa.



Figura 4.2. Densidade relativa dos grãos de rejeito (Gs).

Fonte: Sotomayor (2018)

4.1.4 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os ensaios de limite de liquidez e plasticidade, foi realizado por Sotomayor (2018), seguindo as normas NBR 6459 (ABNT, 1984-b) e a NBR 7180 (ABNT, 1984-c), respectivamente. Foi constatado que o rejeito de minério de ferro não apresentou plasticidade.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.2.1 COMPACTAÇÃO

Conforme já relatado, o ensaio de compactação foi realizado para todos os materiais na energia de Proctor Normal. Na Figura 4.3 estão apresentadas as curvas de compactação do rejeito e dos compósitos rejeito-polímero (RP).

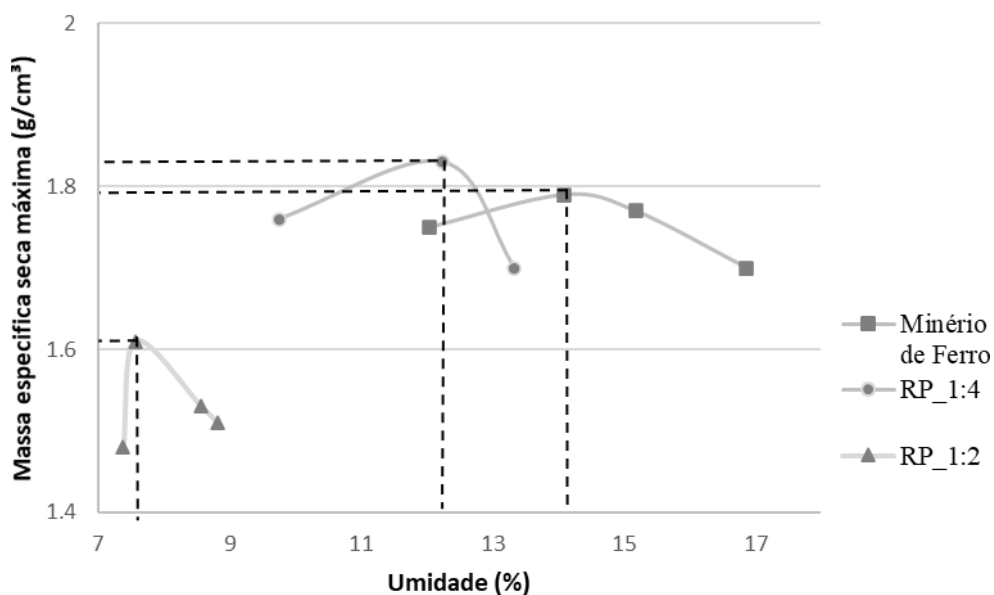


Figura 4.3. Curvas de compactação Proctor Normal para o rejeito de minério de ferro e os compósitos solo-polímero (RP)

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores do peso específico seco máximo e a umidade ótima dos materiais estudados.

Tabela 4.2. Resultados do Proctor Normal

	Massa específica seca máxima (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
Rejeito de Minério de ferro	1,79	14,08
Rejeito-Polímero 1:4	1,83	12,23
Rejeito-Polímero 1:2	1,61	7,57

Pode-se observar uma mudança do comportamento das curvas de acordo com a inserção da solução polimérica.

A curva com 1:4 de solução polimérica, tem um comportamento suavizado e aberta quando comparado com as curvas com 1:2 de solução. Ao adicionar a solução observa-se uma redução da umidade e aumento da massa específica seca, justificado pela ocupação da solução nos vazios existentes gerando uma maior umectação dos grãos e união destes.

Para a curva com adição do polímero com 1:2 de solução polimérica, ressalta-se mudança do formato desta, assemelhando-se com as de solo argiloso, e uma redução da massa específica e umidade ótima. O comportamento do compósito rejeito-polímero com solução polimérica de 1:2 mostrou-se altamente sensível à variações na compactação com a variação do teor de umidade.

Devido ao aumento da solução polimérica e sua massa específica ser menor, o compósito apresentou menor massa específica, por ter menor quantidade de rejeito que de polímero.

A variação do teor de umidade no momento da compactação, quando aumentou a dosagem de solução polimérica, mudou a consistência do material levando a um aspecto mais pastoso, dificultando a compactação.

Problemas associados à trabalhabilidade não são esperados após o aumento da umidade durante a compactação, porém trata-se de um novo material que, após adicionar a solução, possui aspecto mais pastoso, promovendo a umectação das partículas.

Contudo, o que se torna interessante analisar é a alteração do formato das curvas de compactação com o acréscimo de solução polimérica. Em um primeiro momento, verifica-se essa redução dos vazios pela ocupação da solução polimérica e em um segundo momento, com o aumento do teor de polímero na solução, há alteração da curva assemelhando seu comportamento a de um solo argiloso, o que é justificável pelo comportamento mais pastoso do material à medida que adicionava-se a solução.

4.2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de resistência à compressão não confinada (RCC) obtidos com a realização dos ensaios em todos compósitos rejeito-polímero com ambas dosagens de solução polimérica e os respectivos dias de cura.

Tabela 4.3. Resultados de RCC para compósitos rejeito-polímero em diferentes tempos de cura

Valores referentes ao pico			
Materiais	Força (N)	RCC (kPa)	RCC (MPa)
RP_1:4_7d	1268	567,19	0,57
RP_1:4_14d	1917	948,66	0,95
RP_1:4_28d	2143	1083,60	1,08
RP_1:2_7d	1661	808,01	0,81
RP_1:2_14d	3313	1617,18	1,62
RP_1:2_28d	3480	1724,35	1,72

RP: Rejeito polímero; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura respectivamente.

Analisando o valor de RCC do compósito para a amostra com 1:4 de solução polimérica pode-se observar um aumento próximo à 400 kPa entre 7 e 14 dias de cura. No 28º dia de cura, não foi tão significativo o incremento de resistência.

Para a amostra com 1:2 de solução polimérica observa-se um aumento superior à 800 kPa de incremento de resistência quando comparado o 7 e 14 dias de cura. O 28ª dia de cura não apresentou incremento de resistência significativo.

Comparando-se as porcentagens de solução polimérica há o dobro de aumento de incremento de resistência no 14º dia quando utilizado a solução polimérica de 1:2. Percebe-se em ambas soluções que a partir do 14º dia não há um aumento significativo de resistência.

Verifica-se o distanciamento das curvas, de ambas soluções poliméricas, de 7 e 14 dias mostrando bem a resistência do material, o que não verifica-se em ambas as curvas de 28 dias. Nota-se por meio do comportamento das curvas que o material apresenta uma boa resistência, suportando bem a aplicação da força.

Pode-se verificar na Figura 4.4 o comportamento das curvas referentes aos compósitos rejeito-polímero para ambas dosagens de soluções poliméricas estudadas.

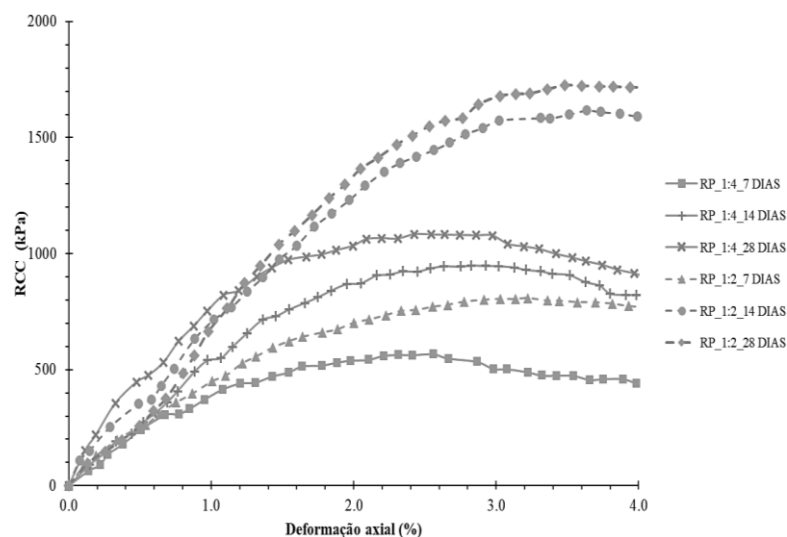


Figura 4.4. Curvas RCC x Def. Axial referentes aos compósitos rejeito-polímero de acordo com tempo de cura.

Analisando a porcentagem de solução polimérica notamos que a solução de 1:2 apresentou uma resistência bem maior que a de 1:4 e que o tempo de cura para ambas dosagens apresentaram melhoria na resistência do compósito, sendo maior alteração com 14 dias de cura.

Liu (2018), em sua pesquisa utilizando dosagens diferentes de polímero em solo arenoso verificou que a resistência de pico das amostras, aumentaram com a concentração de polímero. O autor obteve valores de 245 -360 kPa em amostras sem cura e variando suas densidades. Estes valores estão em concordância aos obtidos na presente pesquisa.

Na Tabela 4.4 são representados os valor de resistência à compressão não confinada (RCC) para todos compósitos com inclusão de fibra e os respectivos dias de cura.

Tabela 4.4. Resultados de RCC para compósitos rejeito-polímero-fibra em diferentes tempos de cura

Valores referentes ao pico			
Materiais	Força (N)	RCC (kPa)	RCC (MPa)
RP_1:4_7d_PP	1681	805,92	0,81
RP_1:4_14d_PP	2281	1085,69	1,09
RP_1:4_28d_PP	2448	1177,02	1,18
RP_1:2_7d_PP	3352	1571,64	1,57
RP_1:2_14d_PP	3824	1837,26	1,84
RP_1:2_28d_PP	4433	2087,06	2,09

Onde: RP: Rejeito polímero; 1:4 e 1:1: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura respectivamente; PP: Fibra de Polipropileno.

Analisando o valor de RCC dos compósitos para as amostra com ambas dosagens de solução polimérica e com inserção de fibras observa-se um aumento em torno de 300 kPa entre

7 e 14 dias de cura. No 28º dia de cura, para a solução polimérica de 1:2 houve o mesmo incremento de resistência. o que não ocorreu para a solução de 1:4.

Observa-se que para o compósito rejeito-polímero-fibra com solução de 1:2 e 28 dias de cura conseguiu-se atingir a resistência a compressão simples $\geq 2,1$ MPa, recomendada pela norma da NBR 12253(ABNT, 1992).

Silva (2020) realizou o ensaio de compressão não confinada em compósito solo-polímero, com 1:4 de solução polimérica e os mesmos tempos de cura. Comparando-se os resultados, nota-se que os compósitos de solo, ensaiados pela autora, possuíram geraram valores em média de 1,2 MPa e os de rejeito em média de 1,0 MPa para 14 e 28 dias de cura, não havendo tanta discrepância entre os valores para este tipo de porcentagem de solução polimérica. Analisando-se a solução com 1:2 de solução polimérica e os mesmos tempos de cura, comparando-se os resultados nota-se que os compósitos de solo ensaiados pela autora, os valores de resistência a compressão simples eram em média de 3MPa, sendo assim bem mais resistentes que os compósitos utilizando o de rejeito. A maior resistência a compressão encontrada com o compósito de rejeito foi para compósito rejeito-polímero-fibra com 1:2 de solução e ainda assim, foi inferior ao obtido no compósito de solo com mesma solução polimérica. Tal fato, pode ser explicado pela aderência da solução polimérica ao material, provavelmente devido a angulosidade e tamanho das partículas do rejeito, gerando assim uma menor resistência quando comparado ao solo.

Liu (2019), constatou que aplicando teor de 4 % de polímero, 0,5 % e 0,6% de fibra em um solo arenoso, a fragilidade do compósito continuou em torno de -0,2. A inserção de 1% de polímero e a mesma porcentagem de fibra conferiu ao compósito uma fragilidade em torno de 0,2. As análises obtidas pelo autor assemelha-se à quantidade de teor analisado e a resistência melhorada com a inserção das fibras e polímero no presente estudo.

Pode-se verificar na Figura 4.5 o comportamento das curvas referentes aos compósitos com inserção de fibras para ambas dosagens de soluções poliméricas estudadas.

Verifica-se claramente, através do comportamento das curvas, que a inserção de fibra atua como reforço no material, pois não há uma queda das curvas o que demonstra a solicitação das fibras. Logo, a inserção da fibra melhorou a resistência do compósito pois não houve uma queda das curvas indicando seu rompimento.

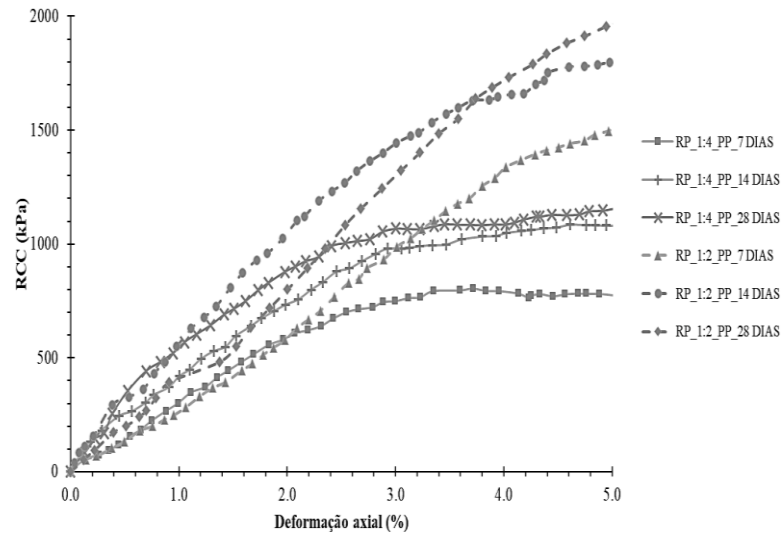


Figura 4.5. Curvas RCC x Def. Axial referentes aos compósitos rejeito-polímero-fibra de acordo com tempo de cura.

Nota-se pelas curvas obtidas que a fibra atuou melhor na solução polimérica de 1:2, pois não houve uma estabilização da curva, ela tendeu a aumentar, indicando que não houve rompimento do material na faixa de deformação estudada e assim, uma atuação maior como reforço.

Constata-se pelas curvas que os compósitos sem fibra inicialmente apresenta uma maior resistência, pois possuem menor deformação com aplicação da carga. Nota-se que a curva de 28 dias localiza-se mais próxima ao eixo vertical caracterizando menor deformação.

Na Figura 4.6 é apresentado o comportamento das curvas referentes ao tempo de cura em dias dos compósitos com inserção de fibras para ambas dosagens de soluções poliméricas estudadas.

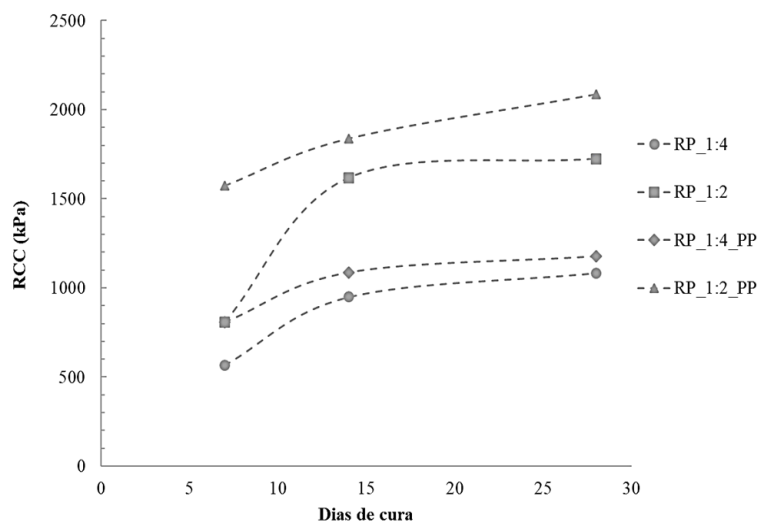


Figura 4.6. Curvas RCC x Dias de cura referentes aos compósitos.

Para ambas dosagens de solução polimérica, as curvas com 7 e 14 dias de cura apresentaram um maior incremento de resistência. As curvas de 28 dias mesmo apresentando maior resistência, não foi muito superior ao período de cura de 14 dias.

Comparando-se as curvas com maior tempo de cura e maior resistência de todos os compósitos estudados, nota-se que o compósito apresenta uma resistência superior quando há inserção de fibras.

O comportamento das curvas dos compósitos com fibra, mostram claramente que a fibra atua como reforço, pois há uma maior deformação porém não ocorre uma queda de sua resistência.

Analisando as curvas segundo a proporção da solução polimérica, constata-se que 1:2 de polímero apresenta uma resistência significativamente superior a solução com 1:4 de polímero.

Na Figura 4.7 são apresentados os corpos de prova após o ensaio de compressão simples referentes aos compósitos de 28 dias de cura com e sem fibras.

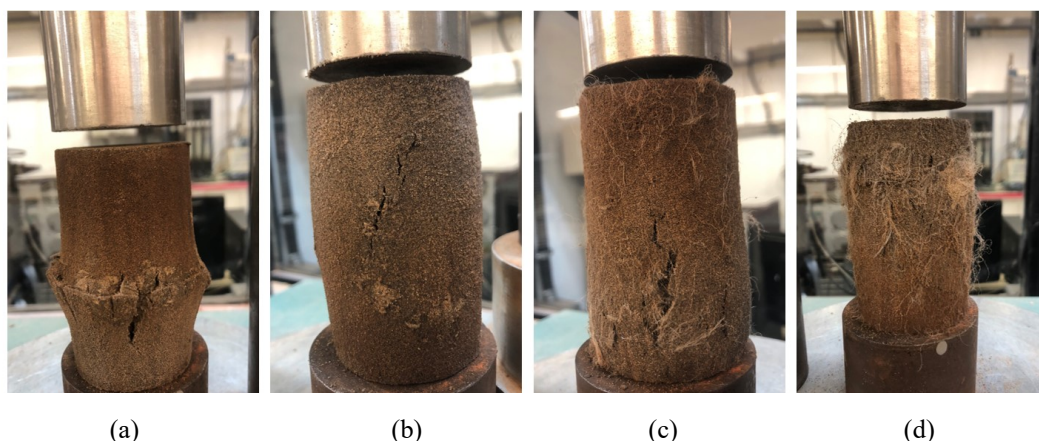


Figura 4.7. Corpos de prova com 28 dias de cura (a) com 1:4 de solução polimérica (b) com 1:2 de solução polimérica (c) com 1:4 de solução polimérica e fibras (d) com 1:2 de solução polimérica e fibras.

Observa-se que o compósito resíduo-polímero com 1:4 de solução possui uma ruptura mais acentuada horizontalmente, no compósito com 1:2 de solução constata-se uma fissura porém sem chegar até a parte superior do corpo de prova o que justifica a forma contínua da curva referente a este compósito. Nos compósitos resíduo-polímero-fibra observa-se uma fissura, porém a fibra atua reforçando e impedindo o prolongamento da mesma, não havendo rompimento do corpo de prova e assim, não gerando uma queda da curva de ambos os compósitos com inserção de fibras.

É possível observar, analisando as imagens, um comportamento semelhante nas fissuras com a mesma porcentagem de solução polimérica. A Figura a e c, sem fibras e com fibras, respectivamente, com 1:4 de solução apresenta uma fissura mais aberta quando comparada à imagem b e d, com 1:2 de solução. Este comportamento caracteriza que o aumento da porcentagem ocasiona uma maior umectação dos grãos, dificultando o rompimento do material gerando assim uma maior resistência.

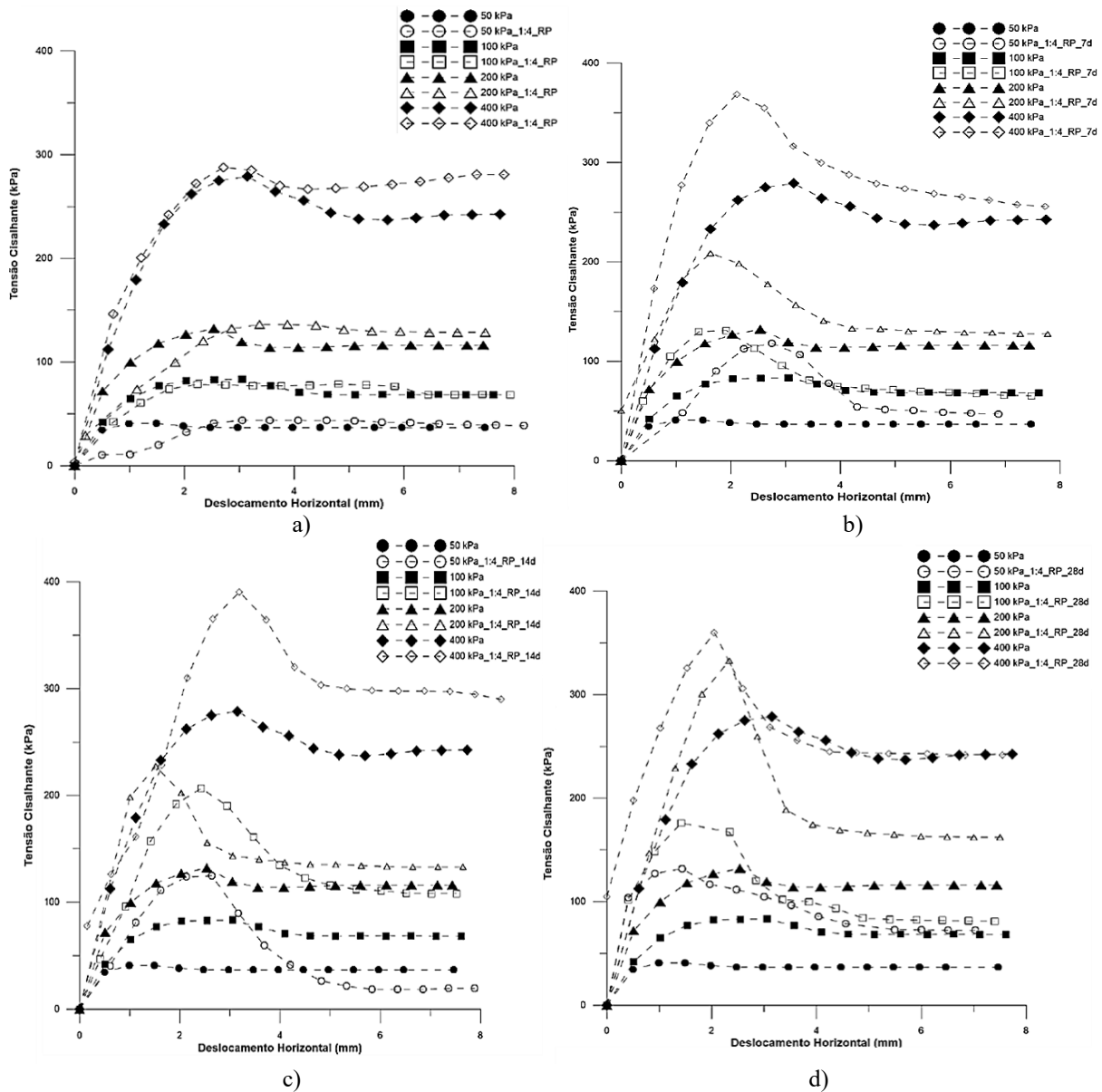
Devido ao rejeito estudado possuir características de um material arenoso, não foi possível a execução do ensaio sem melhoramento

4.2.3. CISALHAMENTO DIRETO

Realizou-se ensaios de cisalhamento para descrever o comportamento dos rejeitos de mineração melhorados com polímero e reforçados com fibras. Os ensaios foram realizados para proporções de 1:4 e 1:2 de solução polimérica. Após a realização do ensaio convencional, foi realizado o ensaio de superfície polida.

Na Figura 4.8 são apresentados os gráficos referentes às curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal do rejeito e dos compósitos rejeito-polímero (RP) com 1:4 de solução, de acordo com o tempo de cura das amostras, nas tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

Observa-se que após a inserção do polímero houve um ganho na resistência ao cisalhamento do rejeito de minério de ferro, para todas misturas e tensões de confinamento submetidas, ressaltando que para as amostras com zero dias de cura, não houve uma queda acentuada no pós-pico, tendendo a uma estabilização da curva. Nas amostras submetidas aos diferentes tempos de cura, verificou-se um aumento de resistência ao cisalhamento para todos os compósitos, observando-se um pico mais acentuado para as amostras com maior tempo de cura e para maior tensão de confinamento.



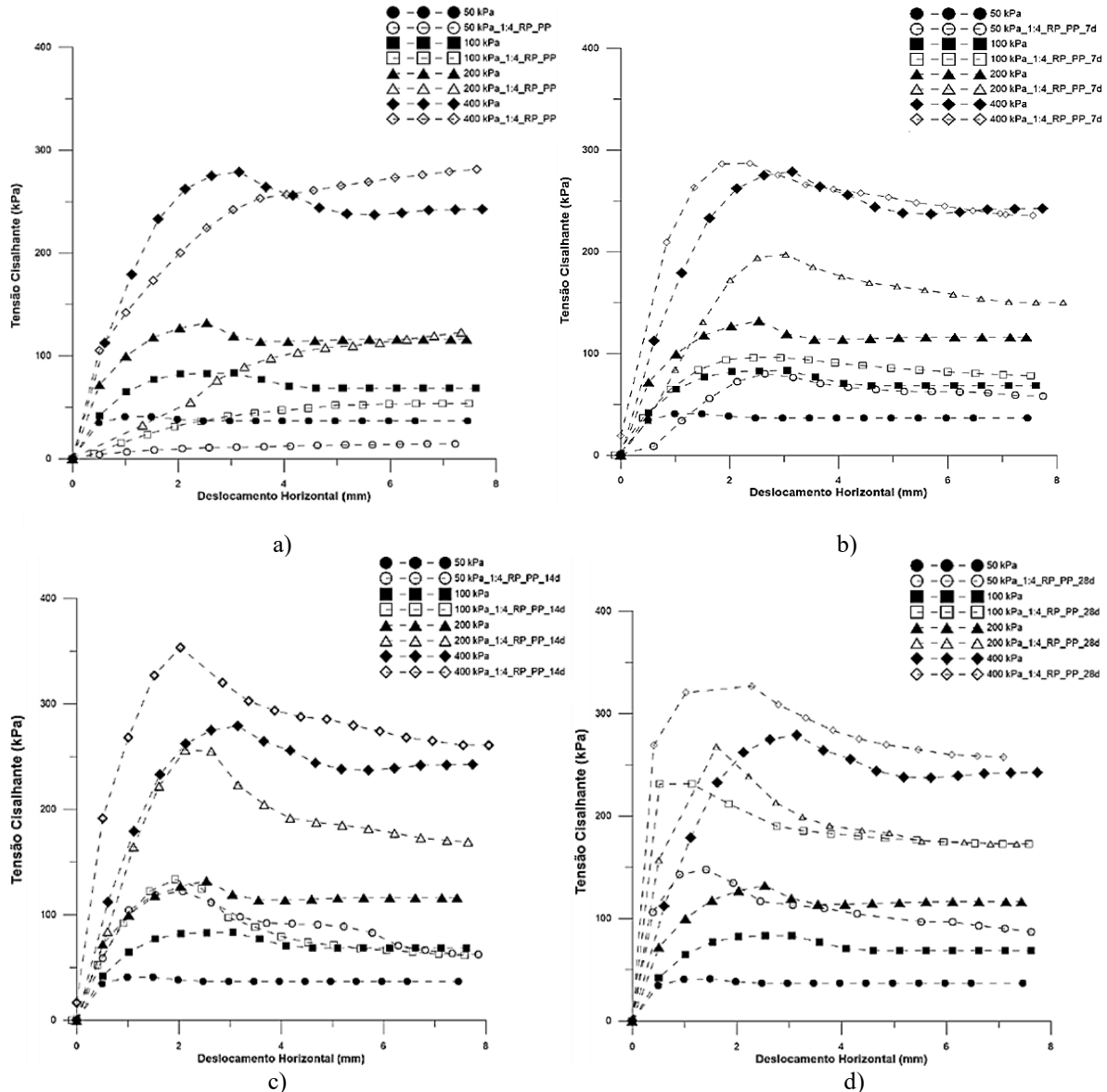
R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; 1:4: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente.

Figura 4.8 Gráficos de cisalhamento direto em rejeito de minério de ferro puro e compostos rejeito-polímero (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Na pesquisa realizada em compostos solo-polímero por Silva (2020), verifica-se uma semelhança entre os comportamentos das curvas, havendo um pico e uma estabilização na fase residual.

Na Figura 4.9 pode-se observar os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento horizontal dos compostos com 1:4 de solução reforçados com fibras de polipropileno, de acordo com o tempo de cura das amostras. Ressalta-se que a inserção de fibras nos compostos rejeito-polímero objetivava uma possível melhora na matriz do composto rejeito-polímero.

Observa-se que após inserção do polímero e fibras, houve um aumento da resistência do rejeito de minério de ferro para todas misturas e tensões submetidas, quando comparada ao rejeito puro. É possível analisar que os picos de resistência estão mais suavizados e que não houve uma queda brusca de resistência pós-pico, tendendo esses valores a estabilizarem.



R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4: proporção da solução; 7d, 14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente

Figura 4.9. Gráficos de cisalhamento direto em rejeito de minério de ferro puro e compostos rejeito-polímero-fibra (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

As envoltórias de resistência obtidas, nas tensões de pico e residual, respectivamente, durante o ensaio de cisalhamento direto são apresentadas na Figura 4.10. Vale ressaltar que as tensões residuais são referentes ao deslocamento horizontal de 7 mm.

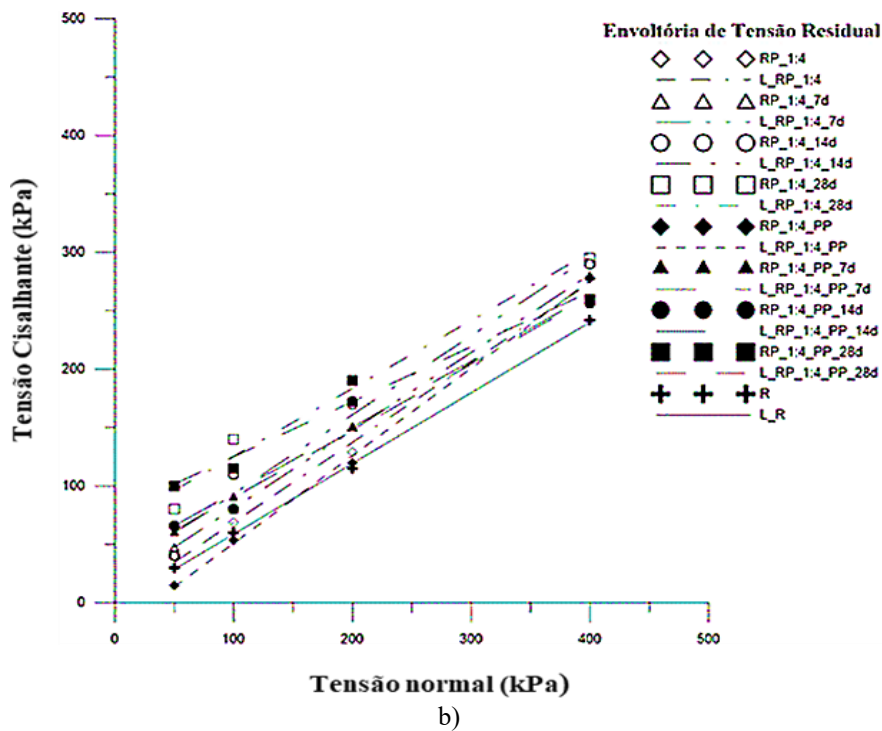
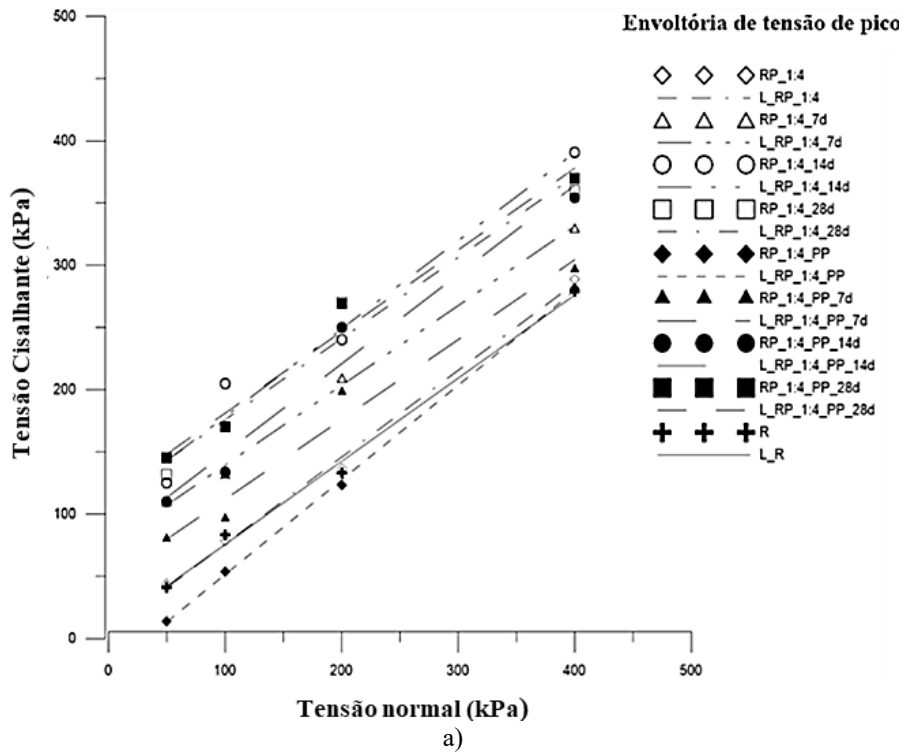


Figura 4.10. Envoltórias de resistência para rejeito e compósitos rejeito-polímero (a) tensão de pico e (b) tensão residual.

Observa-se na envoltória correspondente à tensão de pico que houve um aumento em ambos parâmetros de resistência dos compósitos, de acordo com o tempo de cura. Nota-se que não houve acentuada alteração no comportamento das envoltórias para o mesmo tempo de cura, independente da inserção da fibra.

Vale ressaltar que os compósitos com fibra para menores tempo de cura, houve uma redução do intercepto coesivo e ângulo de atrito quando comparada aos compósitos sem fibra.

No compósito sem efeito de cura praticamente não se observa alteração, o que já era esperado, pois ao adicionar polímero a amostra se encontrava mais úmida, reduzindo assim sua resistência.

No gráfico referente à tensão residual, observa-se que os compósitos para o mesmo tempo de cura e menores tensões de confinamento apresentaram as envoltórias com comportamento semelhante, porém notou-se que para maior tensão de confinamento os compósitos rejeito-polímero com maior tempo de cura apresentaram um maior ângulo de atrito comparados aos compósitos com inserção de fibra, mesmo este possuindo maior intercepto coesivo.

Analisando o comportamento das envoltórias observa-se que a inserção das fibras não alterou significativamente os parâmetros de resistência dos compósitos, pois estes com inserção da solução polimérica e com o tempo de cura já apresentaram uma melhora no intercepto coesivo e ângulo de atrito.

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros de resistência obtidos na tensão de pico e residual, por meio do ensaio de cisalhamento direto convencional, nos rejeitos de minério de ferro com e sem a inserção de polímero e de fibras. Vale ressaltar que as tensões cisalhantes consideradas para construção das envoltórias de resistência na fase residual, foram determinadas para deslocamento horizontal de 7 mm.

Tabela 4.5. Valores dos parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro (R) e compósitos rejeito-polímero (RP) e rejeito-polímero-fibra (PP) nas tensões de pico e residual.

	Tensão de Pico		Tensão Residual	
	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
R	33,8	8,75	31,0	0
RP_1:4	34,9	6,1	34,3	0,7
RP_1:4_7d	32,0	75,1	33,7	14,2
RP_1:4_14d	34,9	108,3	34,1	25,7
RP_1:4_28d	36,0	113,9	35,8	67,2
RP_1:4_PP	37,3	0,0	36,0	0,0
RP_1:4_7d_PP	31,5	50,6	29	33,0
RP_1:4_14d_PP	34,8	86,9	29,4	37,7
RP_1:4_28d_PP	36,5	130,0	25,2	78,1

Para a tensão de pico, no compósito rejeito-polímero, observa-se um aumento no valor do ângulo de atrito efetivo e da coesão aparente, principalmente para maiores tempos de cura.

Nota-se que a coesão aparente aumentou de forma considerável com o tempo de cura, o que já era esperado quando se adicionou polímero, pois este atua aglutinando os grãos.

Na tensão residual para o compósito rejeito-polímero, houve um aumento de ambos parâmetros de resistência com o aumento do tempo de cura.

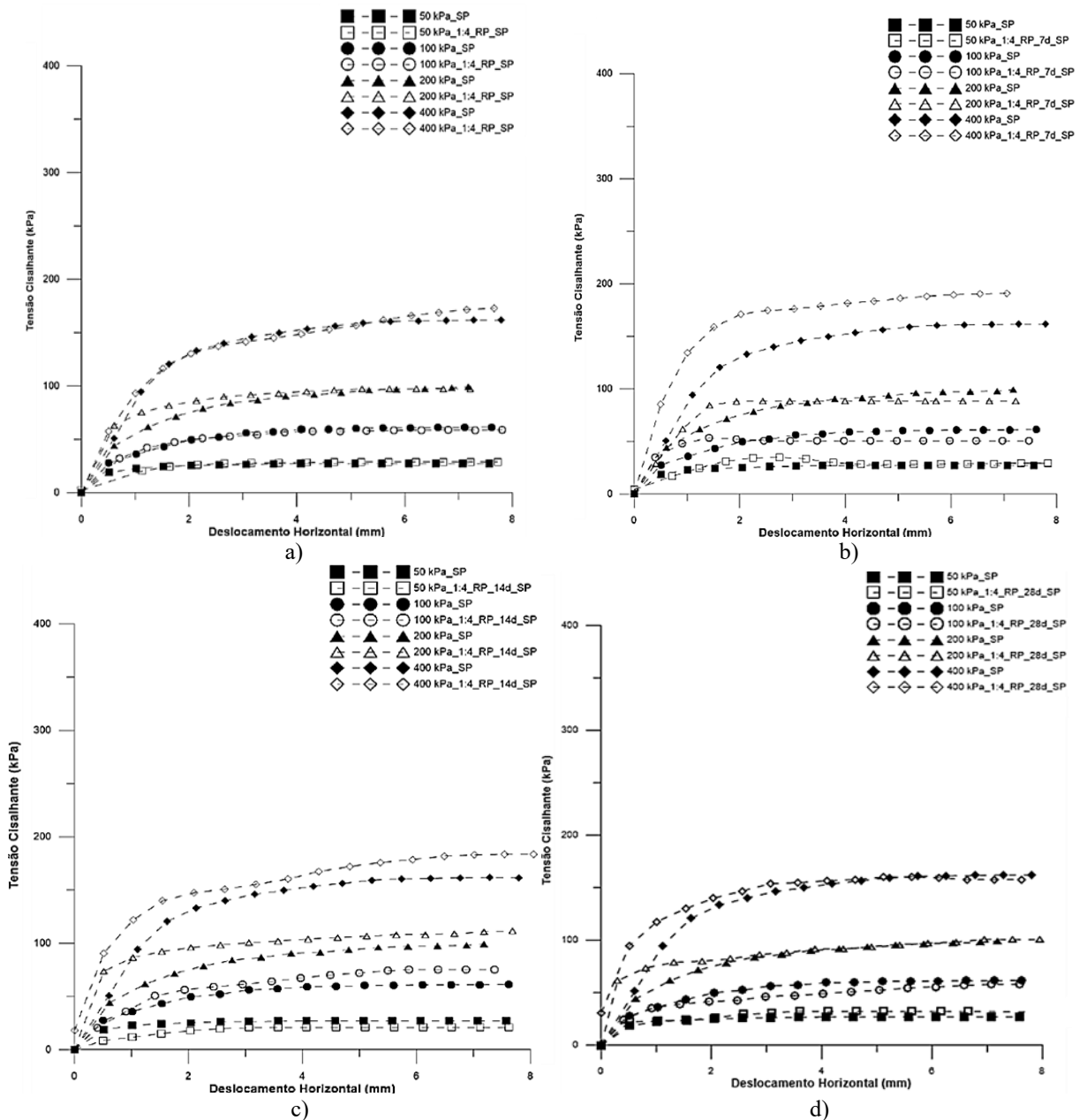
Os compósito rejeito-polímero-fibra apresentou melhora nos parâmetros em ambas tensões, indicando que a fibra foi solicitada atuando como reforço no rejeito, apresentando melhor valor dos parâmetros para o maior tempo de cura.

Analisando-se os parâmetros de resistência conclui-se que a inserção da solução polimérica é vantajosa e apresenta melhoria com o tempo de cura. A inserção de fibras não apresentou melhoria significativa quando comparada com a inserção somente de solução polimérica.

Os parâmetros de resistência, ângulo de atrito e intercepto coesivo respectivamente, obtido por Silva (2020) utilizando compósito solo-polímero, incrementam de 31,9° para 32,9° e de 4,05 kPa até 169,67 kPa com 30 dias de cura, os valores assemelham-se aos encontrados na presente pesquisa, indicando assim a atuação semelhante do polímero quando adicionado ao solo e rejeito de minério de ferro, devido ambos apresentarem comportamento de solo arenoso.

Os ensaios realizados em plano cisalhado com superfície polida, foram realizados após o ensaio convencional, para descrever o comportamento residual do rejeito puro e dos compósitos. Na Figura 4.11 são apresentados os resultados realizados em plano cisalhado com solução polimérica de 1:4.

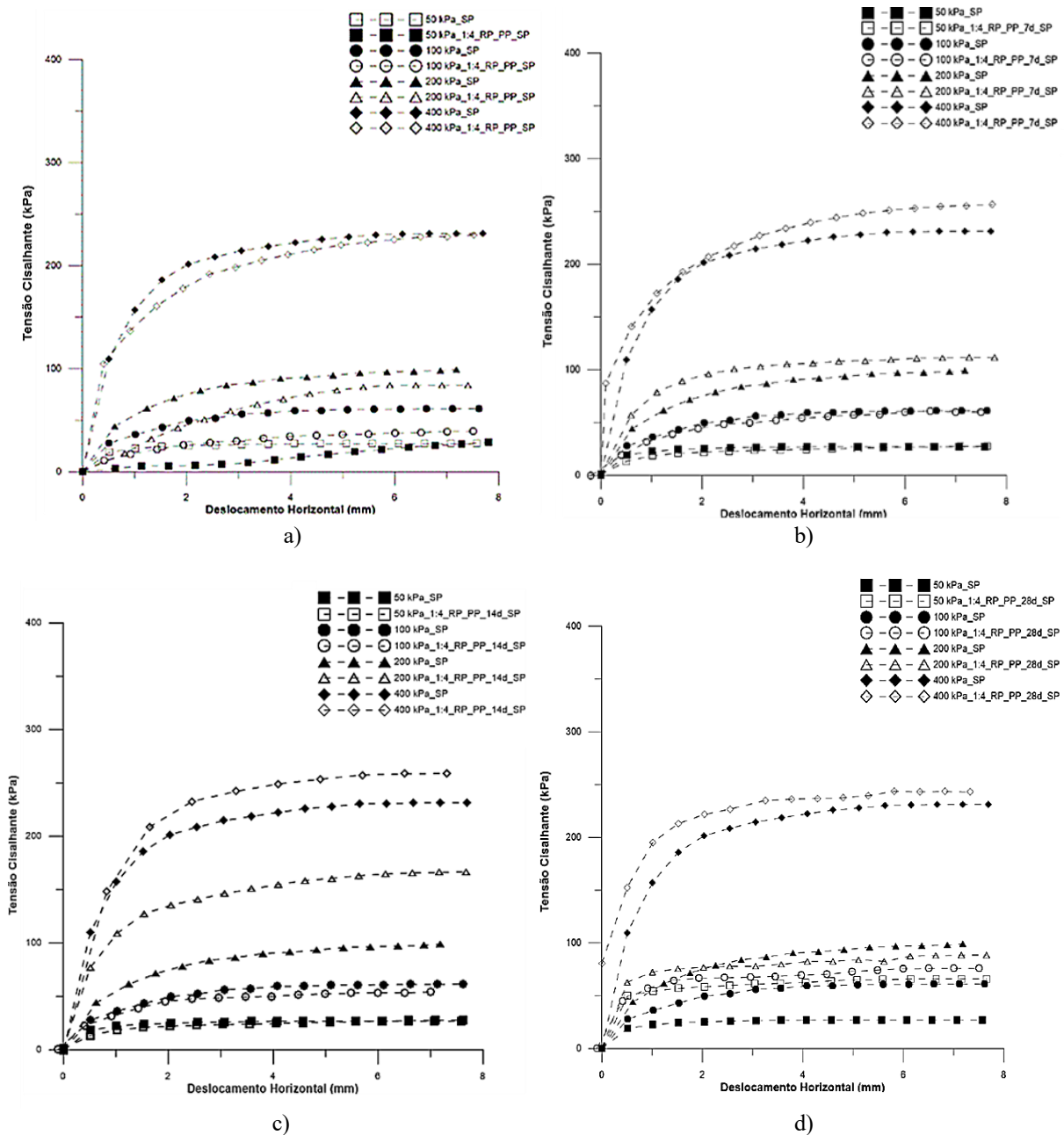
Nos ensaios realizados com superfície polida observa-se que não houve pico nas curvas, pois as amostras já haviam sido cisalhadas. Nota-se uma maior resistência nos compósitos submetidos a maiores tensões cisalhantes, porém não houve uma alteração significativa na resistência com o tempo de cura. Ou seja, após o cisalhamento não há uma redução de sua resistência e a alteração no compósito só ocorreu na ruptura inicial, indicando que não há uma maior instabilidade nas amostras ensaiadas com superfície polida.



R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; 1:4: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: Superfície Polida.

Figura 4.11. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Após a realização do ensaio de cisalhamento convencional em fibras de polipropileno foi realizado o ensaio em superfície polida nas mesmas amostras, os resultados referentes ao ensaio são apresentados na Figura 4.12.

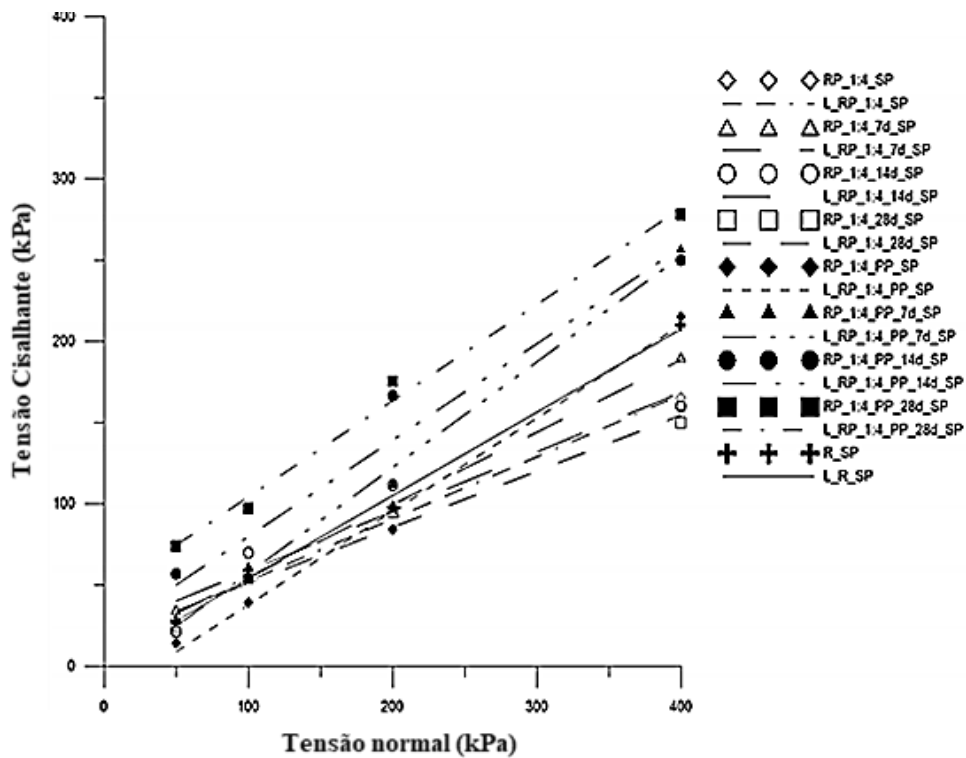


R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4: proporção da solução; 7d, 14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida

Figura 4.12. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibras (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Os ensaios realizados com superfície polida não notou-se um pico nas curvas pois as amostras já haviam sido cisalhadas, em todas curvas não houve um aumento no fase residual ou da tensão cisalhante. Para os compósitos com fibras, principalmente a altas tensões de confinamento e submetidos à cura, houve um aumento da resistência, o que provavelmente ocorre por sollicitação da fibra e sua resistência à tração.

As envoltórias de resistência obtidas nos ensaios de cisalhamento direto em amostras com superfície polida são apresentadas na Figura 4.13. Vale ressaltar, como já dito anteriormente, que as amostras já haviam sido cisalhadas, logo não houve discrepância nos valores dos parâmetros de resistência para tensões de pico e residual.



R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4: proporção da solução; 7d, 14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida.

Figura 4.13. Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto com superfície polida, para rejeito de minério de ferro e compósito rejeito-polímero.

Nos compósitos com superfície polida quando adicionou-se o polímero e polímero-fibra não houve mudança significativa com relação aos resultados das amostras ensaiadas sem cura. Por outro lado quando submetidas a cura observa-se um aumento considerável do ângulo de atrito para os compósitos rejeito-polímero-fibra principalmente quando submetidos a maior tensão de confinamento.

Observa-se que os compósitos rejeito-polímero-fibra com maior tempo de cura apresentaram maior valor de intercepto coesivo e ângulo de atrito, indicando que a fibra atua na resistência do compósito mesmo após o cisalhamento, mostrando-se assim, viável sua aplicação.

A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto em superfície polida, nos rejeitos de minério de ferro com e sem inserção de polímero. As tensões cisalhantes consideradas para construção das envoltórias de resistência na fase residual, foram determinadas para deslocamento horizontal igual de 7 mm.

Tabela 4.6. Valores dos parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósito rejeito-polímero após ensaio de cisalhamento direto com superfície polida.

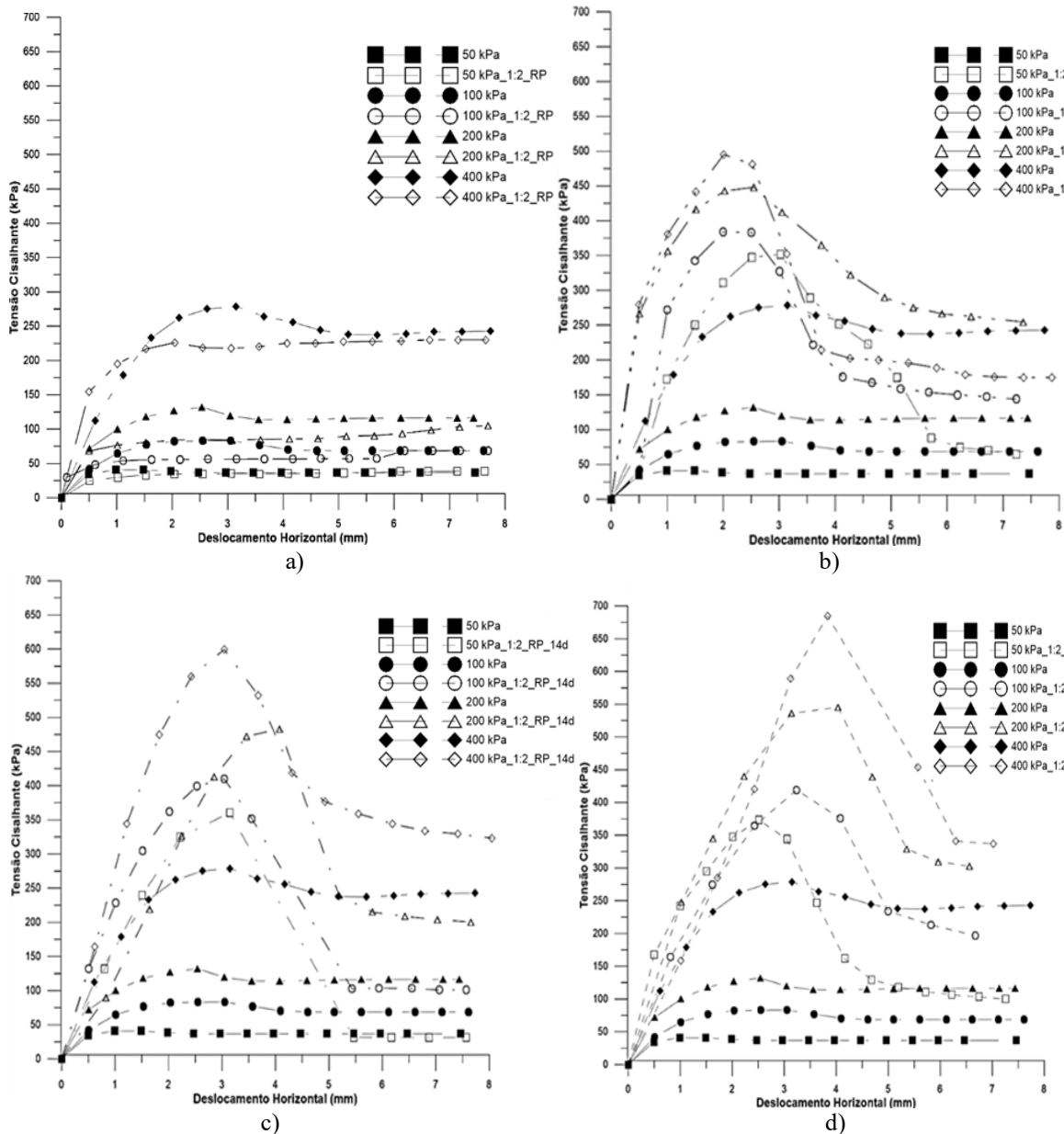
	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
R_SP	27,0	0,0
RP_1:4_SP	20,0	14,0
RP_1:4_7d_SP	23,0	13,0
RP_1:4_14d_SP	20,0	21,2
RP_1:4_28d_SP	19,0	16,0
RP_1:4_PP_SP	31,7	0,0
RP_1:4_7d_PP_SP	33,1	0,0
RP_1:4_14d_PP_SP	28,9	24,7
RP_1:4_28d_PP_SP	30,1	39,7

Nas amostras com superfície polida, houve redução do ângulo de atrito efetivo, pois as amostras se encontravam cisalhadas, porém a coesão aparente aumentou demonstrando assim, que os grãos ainda permaneceram com certa aderência.

Pode-se observar por meio dos valores referentes aos parâmetros de resistência que mesmo após cisalhamento, ainda se confirma a viabilidade da aplicação de solução polimérica

Na Figura 4.14 são apresentados os gráficos referentes ao comportamento da tensão cisalhante e deslocamento horizontal dos compósitos com 1:2 de solução de acordo com o tempo de cura das amostras.

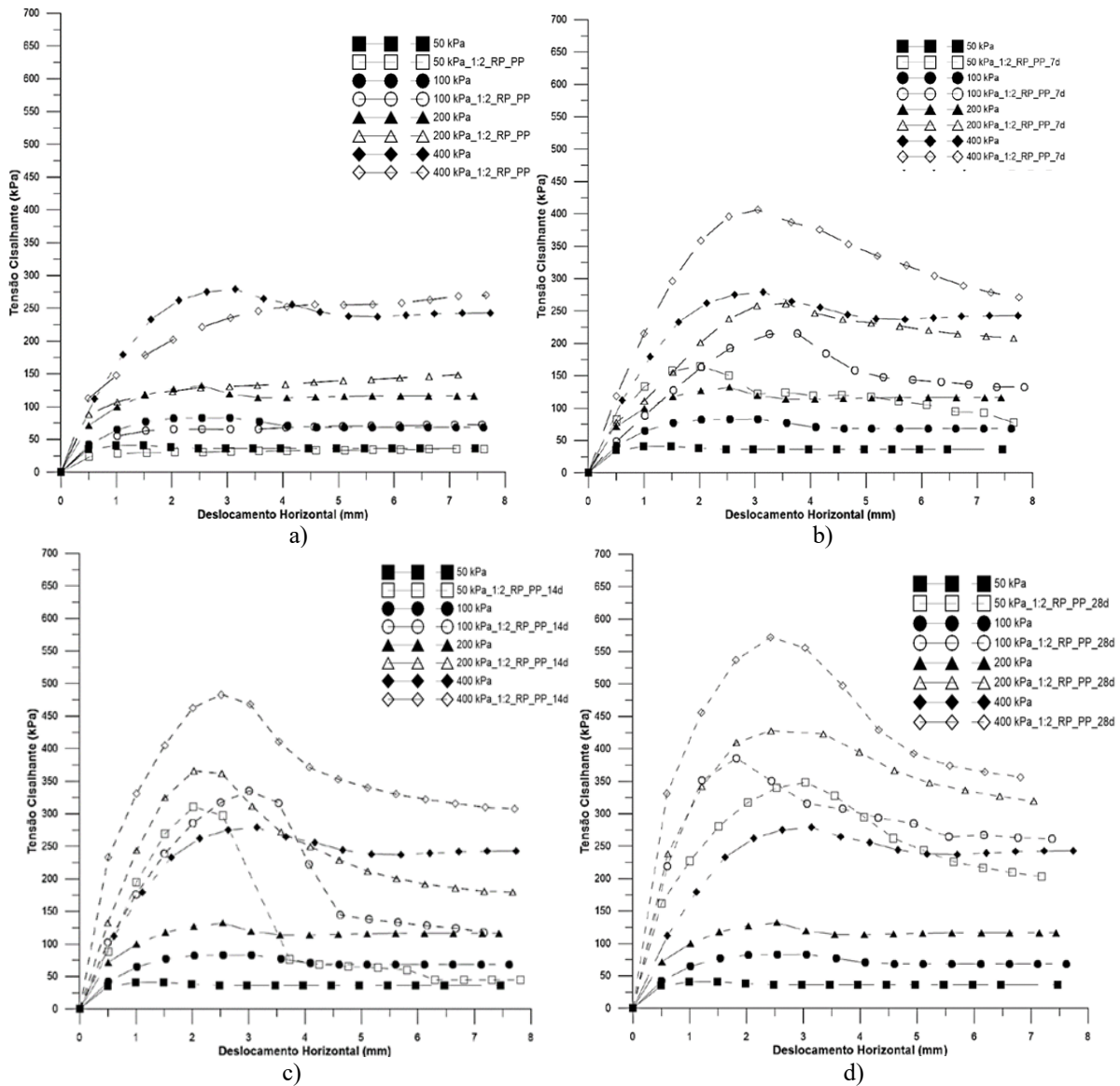
Pode-se observar que após inserção do polímero houve um ganho bem acentuado na resistência ao cisalhamento do rejeito de minério de ferro, para todas misturas e tensões de confinamento submetidas, ressaltando que o aumento da resistência é maior a medida que aumenta o tempo de cura. Ressalta-se que para as amostras com 0 dias de cura, não houve uma melhora, tal fato deve-se as amostras apresentarem bem úmidas. Nas amostras submetidas aos diferentes tempos de cura, verificou-se um aumento de resistência ao cisalhamento para todos os compósitos, observando-se um pico mais acentuado, para as amostras com maior tempo de cura e para maior tensão de confinamento. Vale ressaltar que mesmo havendo um pós-pico acentuado, a resistência é bem maior que quando não houve inserção de polímero.



RP: Rejeito-polímero; 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente.

Figura 4.14. Gráficos de cisalhamento direto de rejeito de minério de ferro puro e compostos (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Na Figura 4.15 observa-se os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento horizontal dos compostos com 1:2 de solução reforçados com fibras de polipropileno de acordo com o tempo de cura das amostras.

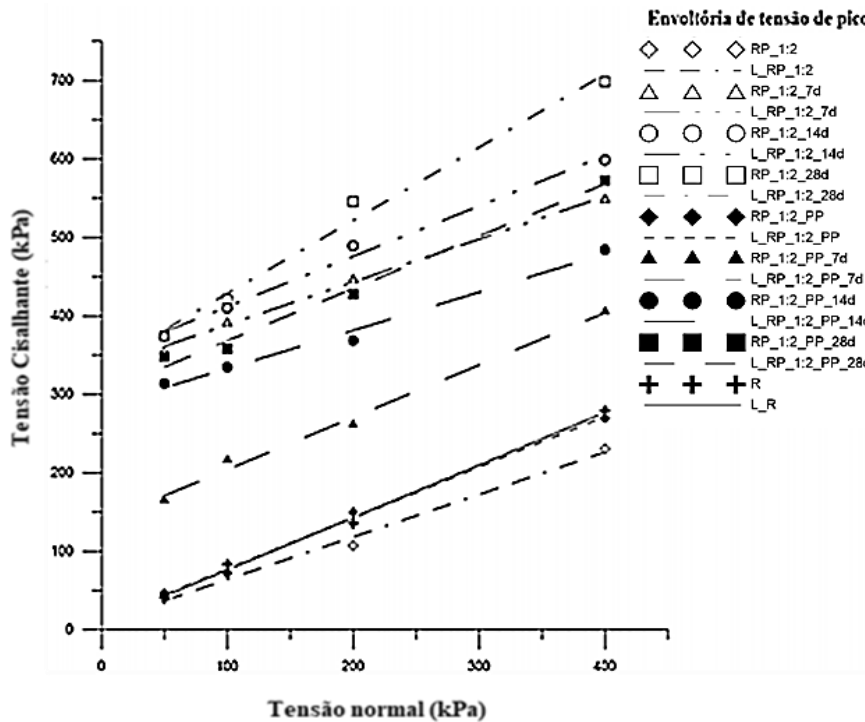


RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura.

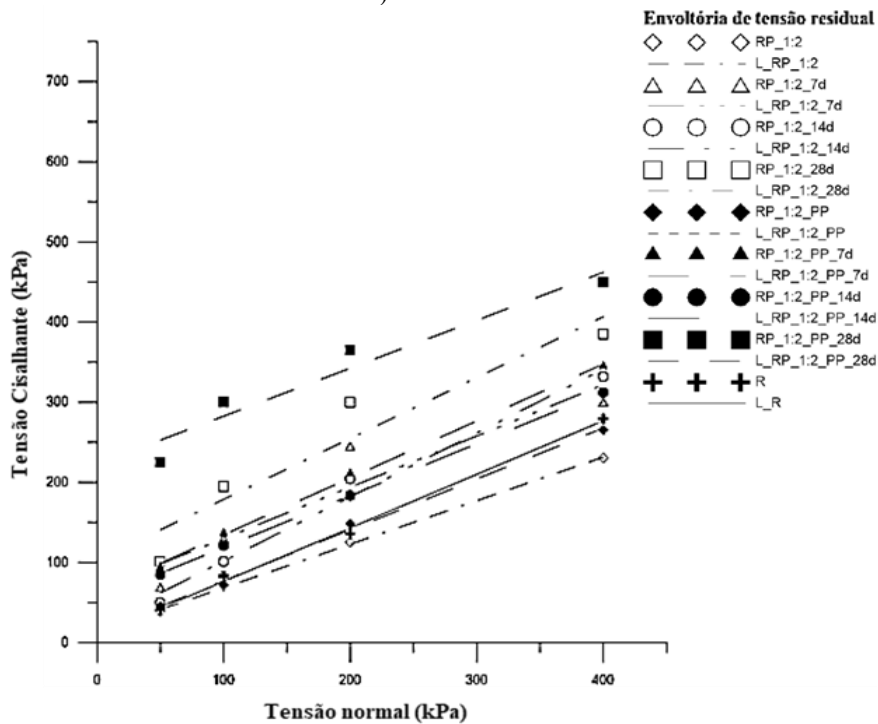
Figura 4.15. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibras (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Pode-se notar que após inserção do polímero e fibras houve aumento da resistência do rejeito de minério de ferro para todas misturas e tensões submetidas. Foi possível analisar que para amostras sem tempo de cura, as curvas apresentaram comportamento crescente. Nas amostras submetidas a cura, verificou-se um pico e pós pico mais acentuado para maiores tensões de confinamento, assim como, para maior tempo de cura. Todos compósitos apresentaram uma boa resistência e uma redução da queda pós pico, exceto para 14 dias de cura a menores tensões, nota-se uma estabilização na fase residual, provavelmente por as fibras estarem sendo solicitadas.

As envoltórias de tensão cisalhante vs. tensão normal utilizadas para calcular os parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto convencionais realizados nos compósitos referentes aos valores da tensão de pico e residual, são mostradas Figura 4.16. Vale ressaltar que as tensões residuais são referentes ao deslocamento horizontal de 7 mm.



a)



b)

Figura 4.16. Envoltórias de resistência para rejeito e compósito rejeito-polímero com solução polimérica 1:2 (a) tensão de pico e (b) tensão residual.

Observa-se analisando a envoltória de tensão de pico que houve um aumento na resistência dos compósitos de acordo com o tempo de cura, porém nota-se que a inserção de fibra apresentou menores valores de parâmetros de resistência quando comparado aos compósitos somente com inserção de polímero. A envoltória correspondente ao compósito rejeito-polímero com maior tempo de cura apresentou um elevado ângulo de atrito quando comparado aos outros compósitos e intercepto coesivo com valor próximo ao mesmo compósito com tempo de cura aproximado, mostrando assim a viabilidade da inserção da solução polimérica e do tempo de cura.

Assim como ocorreu nos compósitos com menor dosagem de solução polimérica, 1:4 de solução, os compósitos com 1:2 de solução e sem cura, não observou-se alteração em sua resistência.

No gráfico de tensão residual, observa-se que compósitos com inserção de fibras apresentaram maiores valores dos parâmetros de resistência, quando comparado aos compósitos com inserção somente de polímero. Esse comportamento das retas indicam que as fibras atuam como reforço e confirma o comportamento das curvas do ensaio de cisalhamento em que apresentaram uma tendência a estabilização na fase residual. Observa-se claramente também na envoltória de tensão residual, a melhora da resistência dos compósitos com o maior tempo de cura.

A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros de resistência obtidos na tensão de pico e residual, por meio do ensaio de cisalhamento direto convencional, nos rejeitos de minério de ferro com e sem inserção de polímero.

Tabela 4.7. Valores dos parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro nas tensões de pico e residual.

	Tensão de Pico		Tensão Residual	
	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
R	33,8	8,75	31,0	0
RP_1:2	28,4	10,0	28,5	14,0
RP_1:2_7d	21,7	349,4	21,9	99,7
RP_1:2_14d	32,7	347,8	40,2	7,0
RP_1:2_28d	43,0	335,6	37,2	102,9
RP_1:2_PP	32,9	13,1	32,4	13,7
RP_1:2_7d_PP	33,7	137,6	30,0	77,3
RP_1:2_14d_PP	25,9	284,3	32,9	54,1
RP_1:2_28d_PP	33,7	301,8	24,3	240,2

Para a tensão de pico observa-se um aumento no valor do ângulo de atrito efetivo e da coesão aparente, principalmente para maiores tempos de cura. Nota-se que a coesão aparente aumentou de forma considerável com o tempo de cura, o que já era esperado quando se adicionou polímero.

Na tensão residual houve um aumento principalmente da coesão aparente, o ângulo de atrito efetivo só apresentou melhora para maior tempo de cura. Conclui-se que a inserção do polímero foi positiva para as amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento convencional.

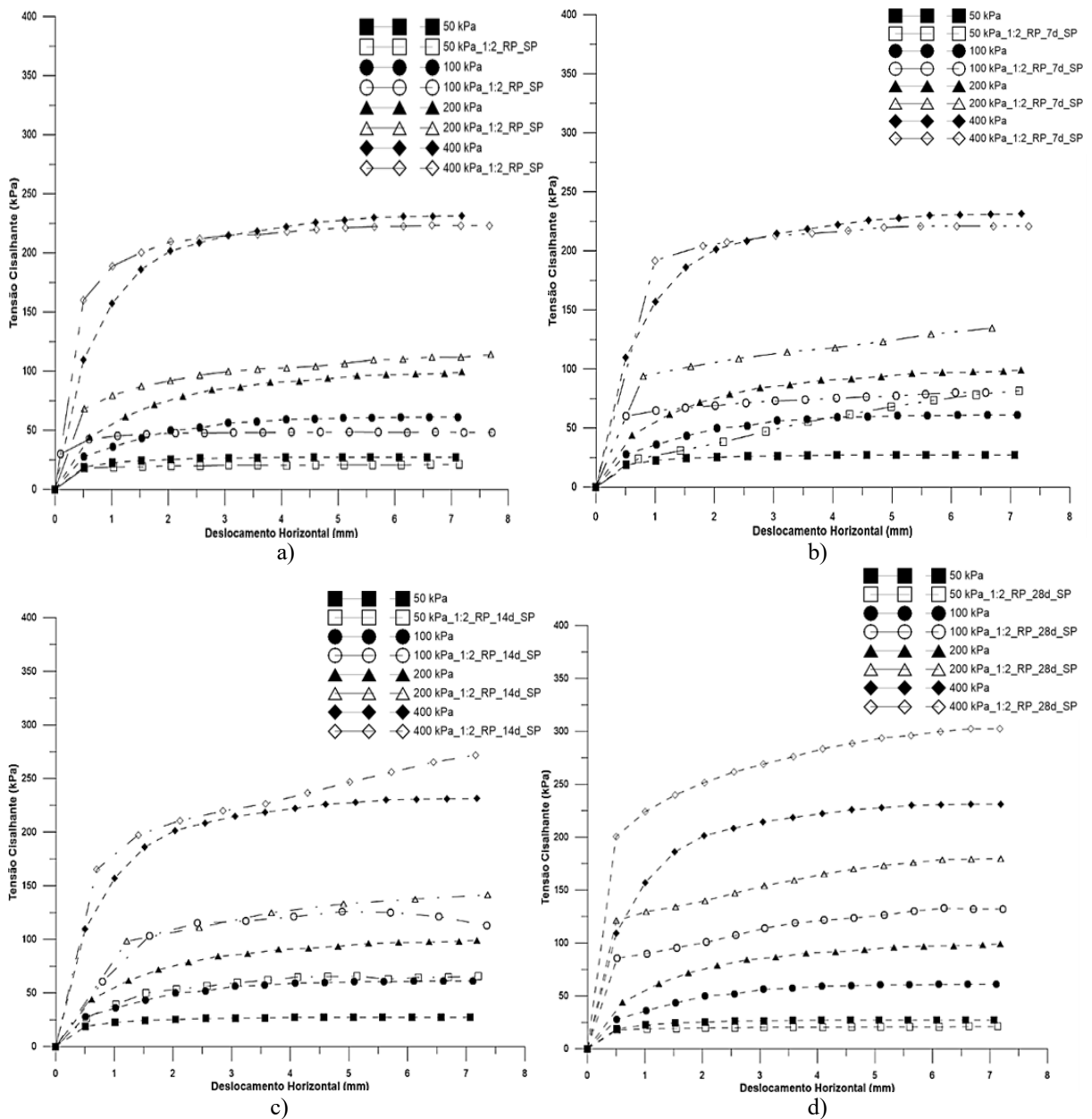
Os ensaios realizados com inserção de fibras, para ambas tensões só apresentaram melhora para a coesão aparente, os valores do ângulo de atrito efetivo para todos tempos de cura apresentaram na mesma faixa de valores. Analisando-se ambas as tensões verifica-se que as fibras são solicitadas e não há um pós pico muito acentuado, tendendo uma aproximação dos valores obtidos.

Analisando-se os parâmetros de resistência conclui-se que a inserção da solução polimérica é vantajosa e apresenta melhoria com o tempo de cura. A inserção de fibras não apresentou melhoria significativa quando comparada com a inserção somente de solução polimérica.

Verificando-se os parâmetros de resistência obtidos por Silva (2020), intercepto coesivo de 526,72 kPa e ângulo de atrito 61,4°, nota-se que o compósito solo-polímero com 30 dias de cura e a mesma proporção de solução polimérica, apresentou valores superiores ao compósito rejeito-polímero nas mesmas condições, indicando melhor atuação dessa proporção de polímero no solo. Vale ressaltar que o compósito rejeito-polímero apresentou bons valores de parâmetros de resistência.

Os ensaios realizados em plano cisalhado com superfície polida, foram realizados após o ensaio convencional. Na Figura 4.17 são apresentados os resultados realizados em plano cisalhado com solução polimérica de 1:2.

Nos ensaios realizados com superfície polida observa-se que não houve pico nas curvas, pois as amostras já haviam sido cisalhadas. Nota-se que após um suposto cisalhamento, provavelmente por haver alguma parte da amostra que ainda havia uma resistência, isso ocorreu principalmente para maior tempo de cura, há uma tendência a estabilidade da curva, não apresentando uma queda, tal fato ocorre por não haver um cisalhamento de fato.

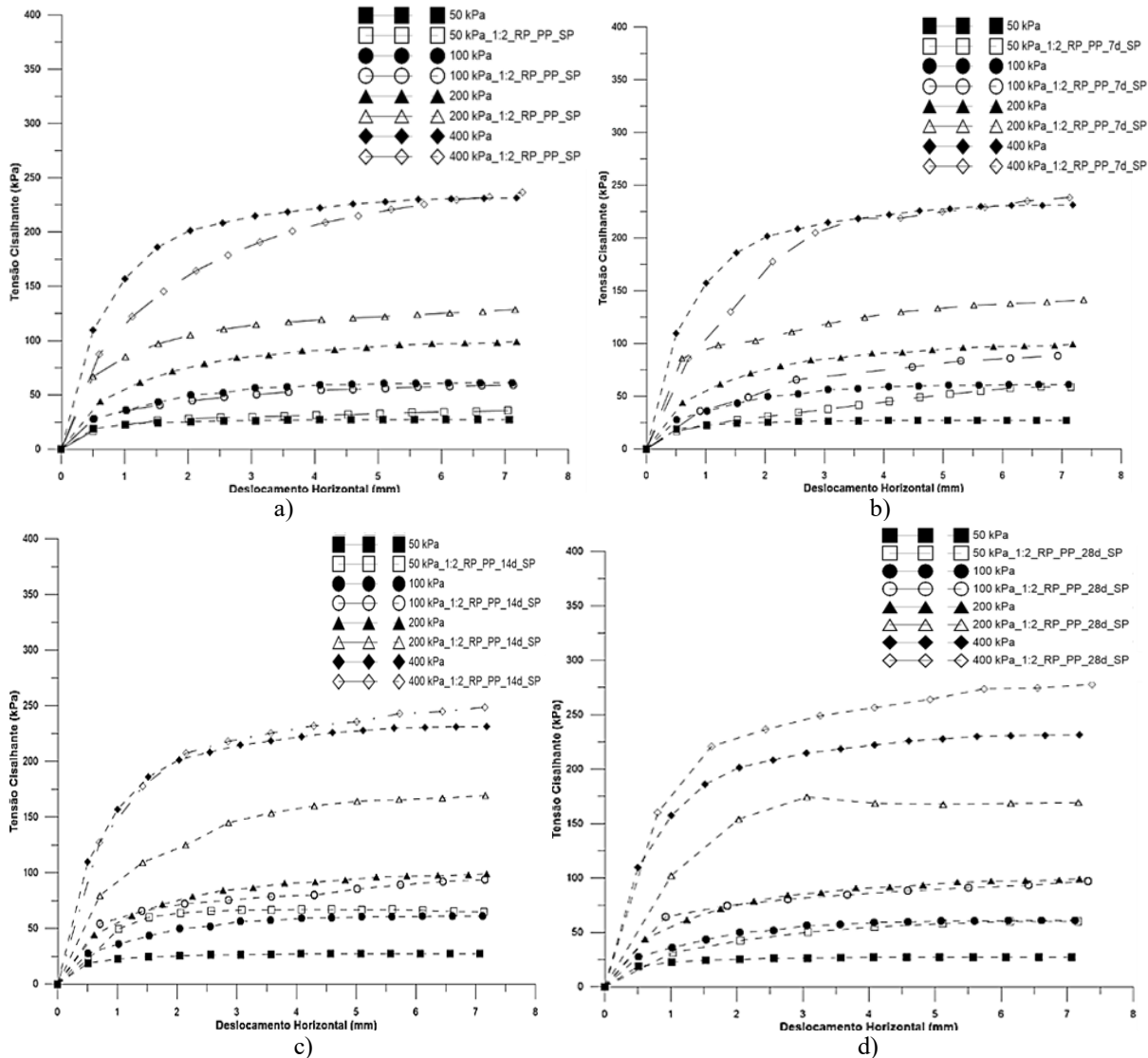


RP: Rejeito-polímero; 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida.

Figura 4.17. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibras (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Analisando a resistência nos compósitos com o tempo de cura, nota-se que as amostras com maior tempo de cura apresentaram uma maior resistência, principalmente para maiores tensões de confinamento. Ou seja, após o cisalhamento não há uma redução de sua resistência e a alteração no compósito só ocorreu na ruptura inicial, indicando que não há uma maior instabilidade nas amostras ensaiadas com superfície polida.

Após a realização do ensaio de cisalhamento convencional em fibras de polipropileno foi realizado o ensaio em superfície polida nas mesmas amostras, os resultados referentes aos ensaios são apresentados na Figura 4.18.



RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida.

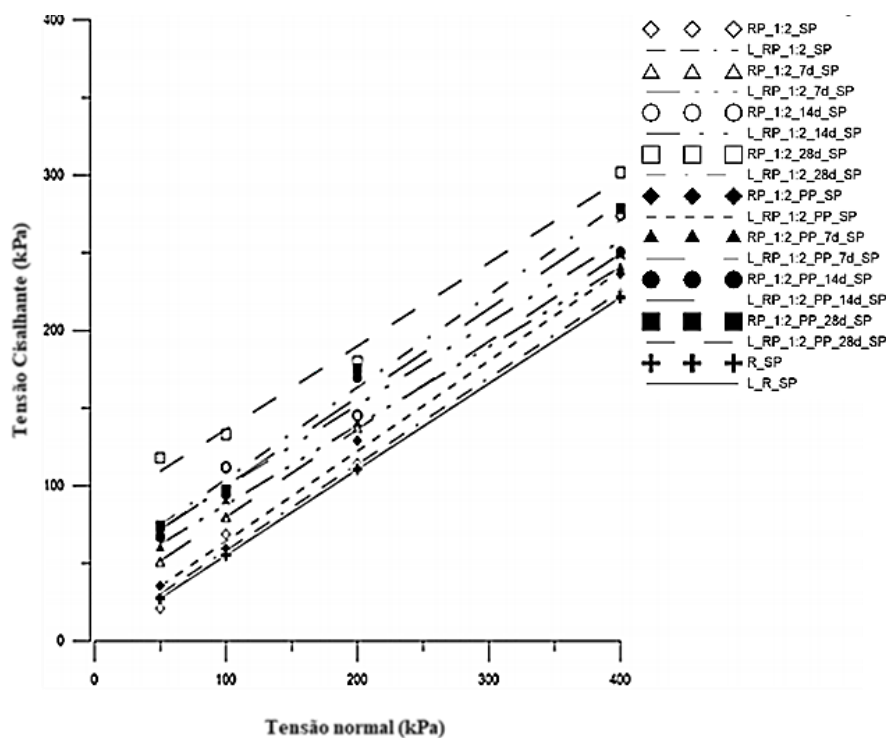
Figura 4.18. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida de rejeito de minério de ferro puro e compósitos com inserção de fibra (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 14 dias e (d) 28 dias.

Nos ensaios realizados com superfície polida nos compósitos rejeito-polímero-fibras, pode-se observar que não houve pico nas curvas pois as amostras já haviam sido cisalhadas. Notou-se um pequeno aumento de resistência nos compósitos com inserção de fibra e polímero, principalmente com o tempo de cura.

Comparando o comportamento das curvas obtidas para os compósitos com fibras e as curvas de compósitos sem fibras, as curvas com fibras não apresentaram um pico,

caracterizando um suposto cisalhamento, elas tenderam ao crescimento da tensão cisalhante, apresentando uma resistência e depois estabilização, o que provavelmente ocorre por a fibra ser solicitada mesmo após cisalhamento ela atua como reforço entrelaçando os grãos gerando uma resistência.

As envoltórias de resistência utilizadas para calcular os parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto em amostras com superfície polida são apresentadas na Figura 4.19. Vale ressaltar, como já dito anteriormente, as amostras já haviam sido cisalhadas, logo não houve discrepância nos valores para alteração significativa de resistência para tensões de pico e residual, sendo então apresentado somente um gráfico.



R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida.

Figura 4.19. Envoltórias do ensaio de cisalhamento direto com rejeito de minério de ferro.

Nos compósitos com superfície polida quando adicionou-se o polímero e polímero-fibra, não houve mudança significativa das amostras ensaiadas sem cura. Quando submetidas a cura observamos um aumento do intercepto coesivo e do ângulo de atrito dos compósitos e que os valores desses parâmetros melhoram com o aumento do tempo de cura.

O compósito rejeito-polímero com maior tempo de cura apresentou melhor parâmetro de resistência. Estes compósitos apresentaram maiores valores de ângulo de atrito para maior tensão de confinamento, demonstrando assim, a viabilidade da inserção da solução polimérica.

Na Tabela 4.8 são apresentados os parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto em superfície polida, nos rejeitos de minério de ferro e nos compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra.

Tabela 4.8. Tabela com os parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósitos.

	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
R_SP	27,0	0,0
RP_1:2_SP	29,1	2,6
RP_1:2_7d_SP	29,5	23,4
RP_1:2_14d_SP	29,7	42,9
RP_1:2_28d_SP	28,2	82,7
RP_1:2_PP_SP	30,2	6,2
RP_1:2_7d_PP_SP	27,0	37,0
RP_1:2_14d_PP_SP	27,8	46,4
RP_1:2_28d_PP_SP	30,7	45,0

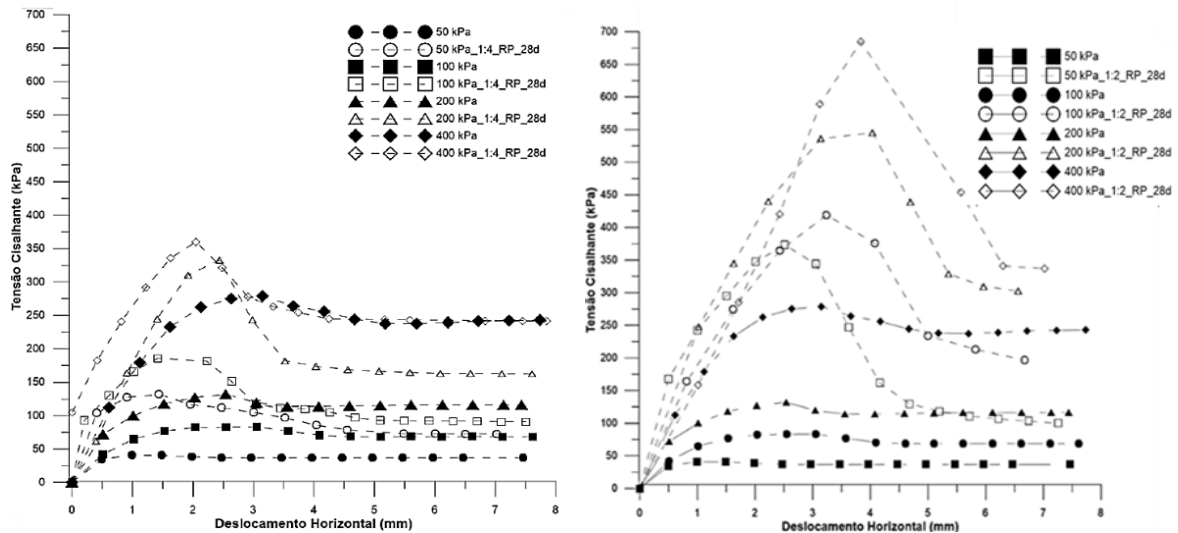
R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:2: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida.

Ambos compósitos no ensaio em superfície polida, não apresentaram uma alteração significativa no valor do ângulo de atrito efetivo, pois as amostras se encontravam cisalhadas, porém a coesão aparente aumentou, principalmente com maior tempo de cura. Logo, mesmo já ocorrendo o cisalhamento, os grãos ainda permaneceram com certa aderência, então, observa-se melhoria em dos parâmetros de resistência.

Analisando a inserção de fibras nos compósitos ensaiados em superfície polida, nota-se que não houve uma melhoria significativa dos valores obtidos referentes aos parâmetros de resistência analisados.

Tendo em vista a viabilidade da inserção da solução polimérica quanto à resistência e ao aumento da resistência com o tempo de cura, a Figura 4.20 apresenta o curva referente ao tempo de cura de 28 dias para ambas soluções poliméricas.

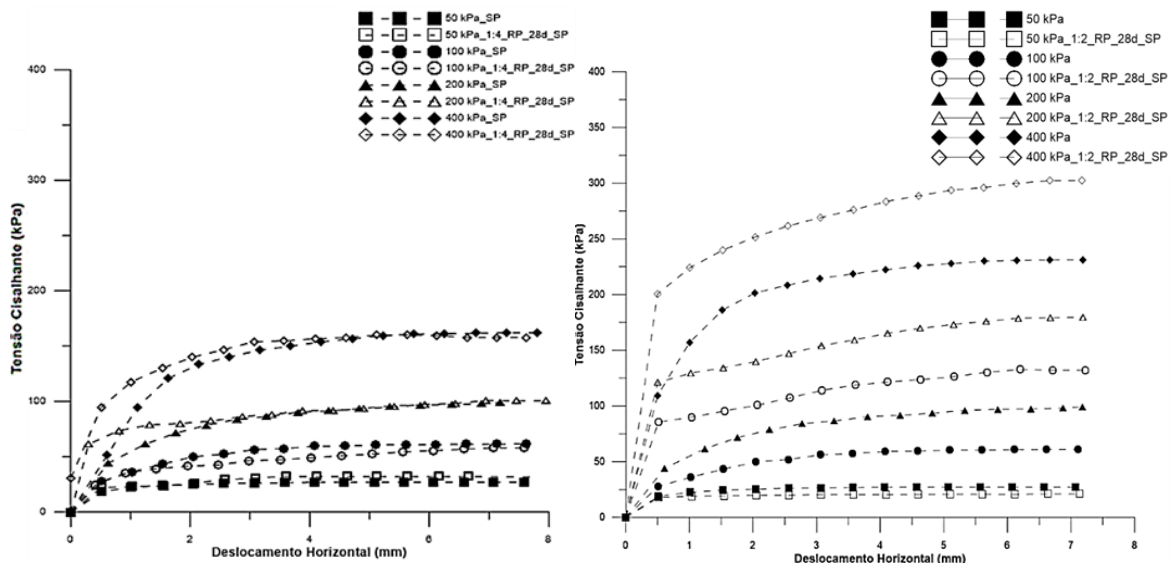
Comparando-se as soluções poliméricas nota-se claramente que a solução polimérica de 1:2, proporcionou uma maior resistência ao cisalhamento das amostras de rejeito com 28 dias de cura. O pico na menor tensão de confinamento para a solução de 1:4 foi de aproximadamente 140 kPa, enquanto que adicionando o dobro de solução, 1:2, a resistência para a mesma tensão de confinamento foi de aproximadamente 350 kPa. Logo, nota-se a melhora considerável da resistências das amostras com 1:2 de solução, quando comparada a amostras com 1:4 de solução polimérica.



RP: Rejeito-polímero; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura.

Figura 4.20. Gráficos de cisalhamento direto com rejeito de minério de ferro para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.

Diante da viabilidade da inserção da solução polimérica mesmo havendo o cisalhamento, a Figura 4.21 apresenta o curva com tempo de cura de 28 dias para ambas soluções poliméricas em superfície polida.



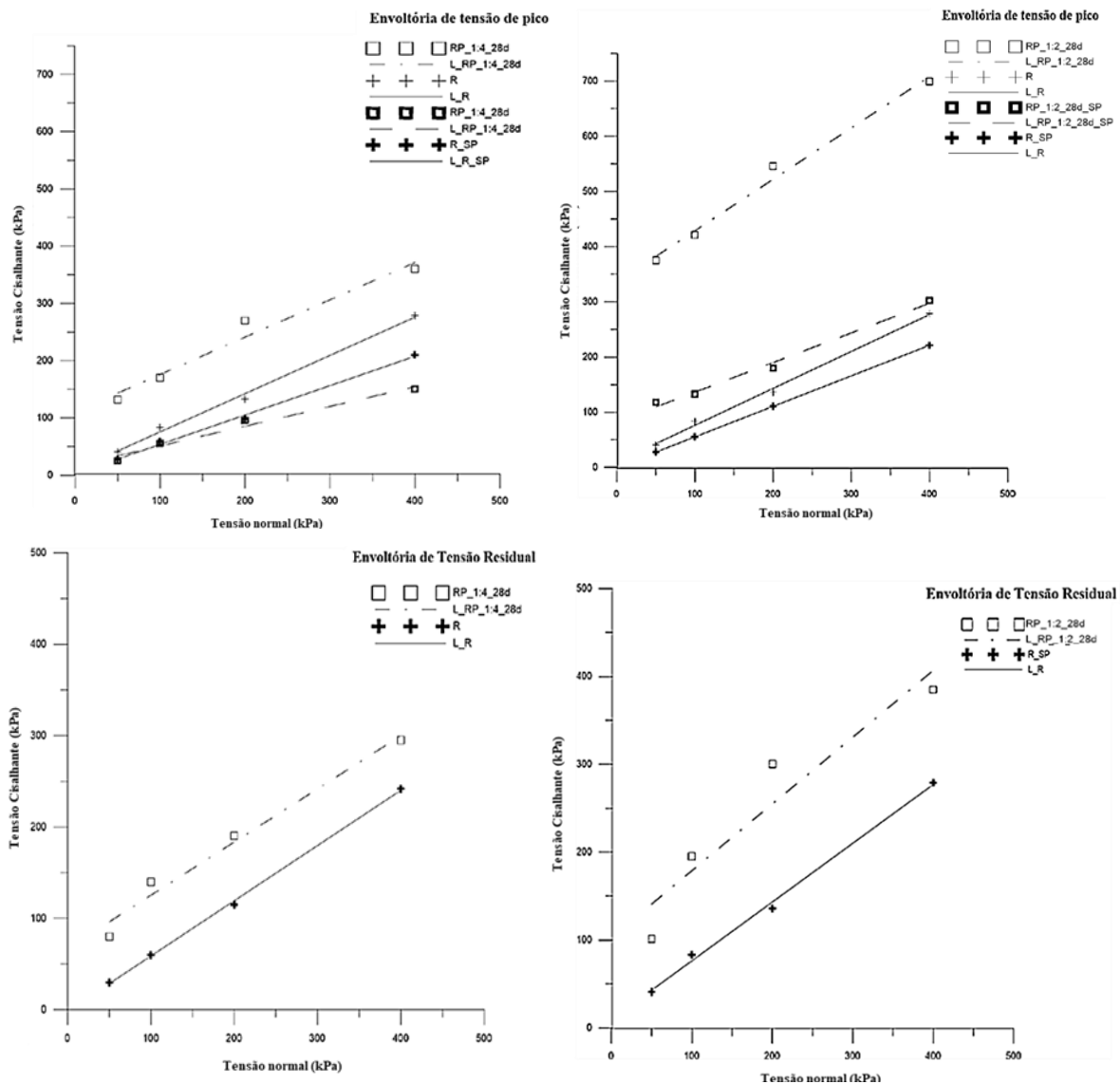
RP: Rejeito-polímero; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura, SP: superfície polida.

Figura 4.21. Gráficos de cisalhamento direto em superfície polida no rejeito de minério de ferro para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.

Nota-se claramente que a solução polimérica de 1:2 proporcionou uma maior resistência ao cisalhamento das amostras de rejeito com 28 dias de cura. Pode-se notar que as amostras com 1:2 de solução polimérica apresentaram uma resistência bem superior as amostras puras e

as amostras adicionadas solução polimérica de 1:4. A resistência aumenta com o aumento da tensão de confinamento. O comportamento das curvas são semelhantes, pois ambas amostras, com 1:4 e 1:2 de solução, já haviam sido cisalhadas.

As envoltórias de resistência utilizadas para calcular os parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto com ambas proporções de solução polimérica com 28 dias de cura são apresentadas na Figura 4.22.



R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura e SP: superfície polida.

Figura 4.22. Envoltórias do ensaio de cisalhamento direto com rejeito de minério de ferro e compósitos rejeito-polímero.

Analisando-se as envoltórias referente a tensão de pico, observa-se que houve um aumento bem maior do intercepto coesivo e ângulo de atrito no compósito com solução polimérica de 1:2. Nota-se este aumento principalmente na mudança dos valores dos parâmetros

de resistência para compósito ensaiado em superfície polida, demonstrando assim uma maior resistência com a solução polimérica de 1:2, após o cisalhamento do material.

No gráfico referente a envoltória de tensão residual o compósito com solução de 1:2, conforme o esperado, apresentou melhores valores dos parâmetros de resistência demonstrando assim não haver uma queda acentuada do pós pico.

Na Tabela 4.9 são apresentados os parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto no rejeito puro, R, com adição de água referente a solução de 25% e 50%, onde relaciona-se 1:4 e 1:2 em relação ao volume, respectivamente, e compósitos rejeito-polímero, RP, para ambas soluções poliméricas com tempo de cura de 28 dias para ensaio convencional e de superfície polida, SP. Ressalta-se que os valores referentes ao ensaio de superfície polida só serão apresentados os parâmetros de resistência obtidos na tensão de pico, pois não há diferença significativa nos valores obtidos dos parâmetros de resistência.

Tabela 4.9. Tabela com os parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósitos

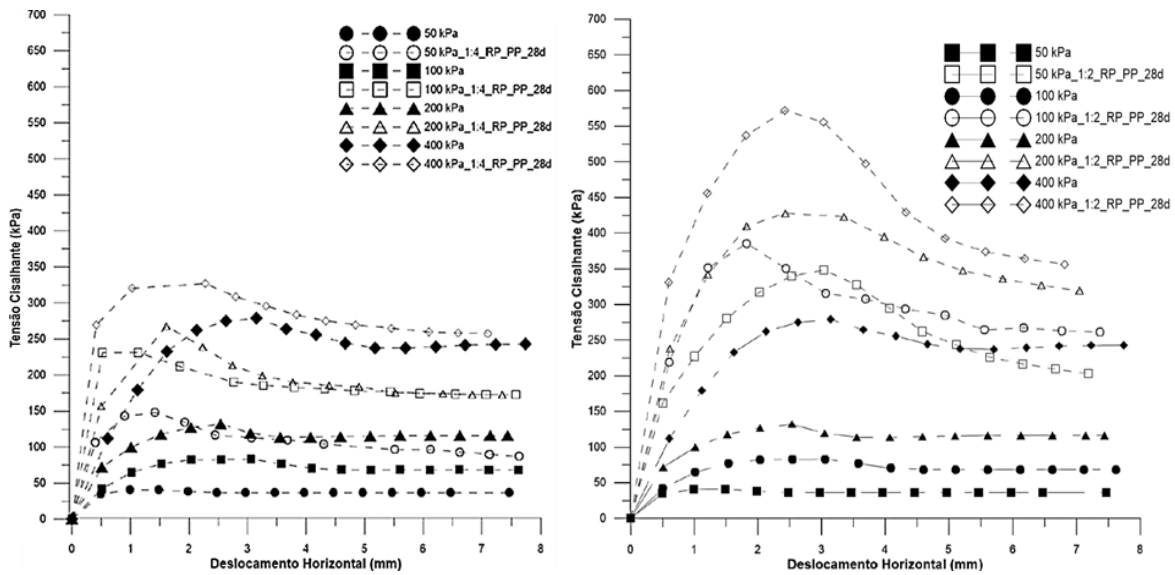
	Tensão de Pico		Tensão Residual	
	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
R	33,8	8,75	31,0	0,0
RP_1:4_28d	36,0	113,9	35,8	67,2
RP_1:2_28d	43,0	335,6	37,2	102,9
R_SP	27,0	0,0		
RP_1:4_28d_SP	19,0	16,0		
RP_1:2_28d_SP	28,2	82,7		

R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura, respectivamente e SP: superfície polida.

A Figura 4.23 apresenta a curva com o tempo de cura de 28 dias para ambas soluções poliméricas do compósito rejeito-polímero-fibra.

Comparando-se ambos os gráficos das soluções poliméricas com 28 dias de cura, nota-se que a solução polimérica de 1:2 proporciona uma maior resistência ao rejeito do que a de 1:4. Ressalta-se que mesmo havendo um pós pico maior para os compósitos com 1:2 de solução, a estabilização da curva ocorreu ainda para maiores tensões de cisalhamento do que os compósitos com 1:4 de solução, apresentando assim uma maior resistência mesmo no comportamento residual. No compósito com 1:4 de solução a menor tensão de confinamento, 50 kPa, obteve um pico de resistência de aproximadamente 150 kPa enquanto o compósito com 1:2 de solução teve uma resistência de 350 kPa. Nota-se a melhora considerável da resistências

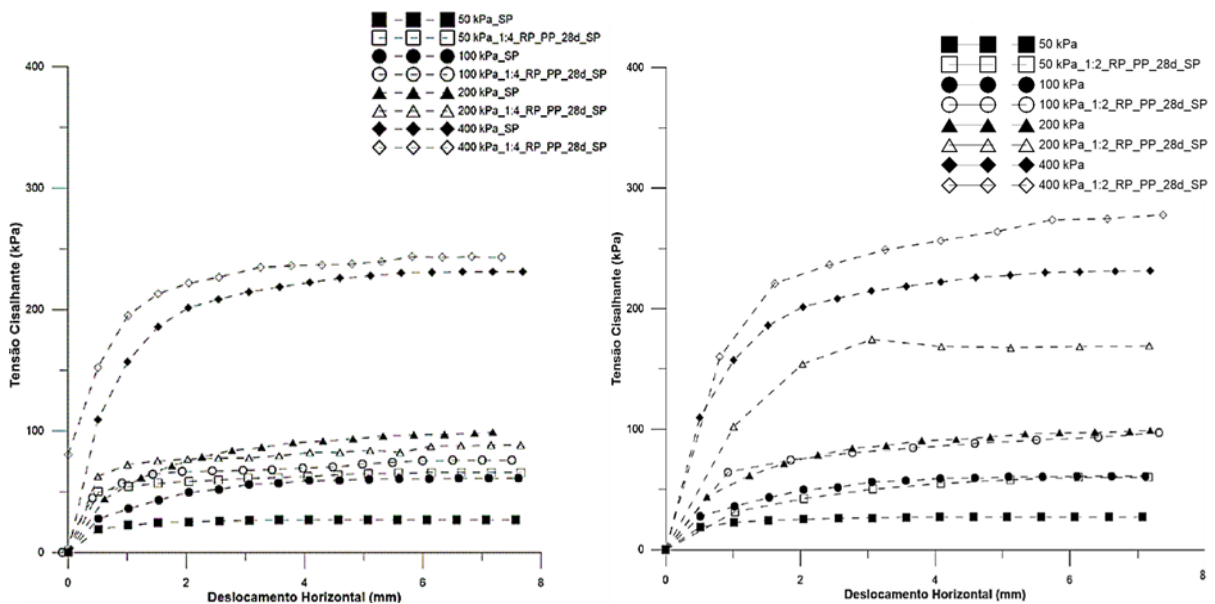
das amostras com 1:2 de solução, para todas as tensões submetidas, quando comparada a amostras com 1:4 de solução polimérica.



RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura, respectivamente.

Figura 4.23. Gráficos de cisalhamento direto no rejeito de minério de ferro para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.

A Figura 4.24 apresenta a curva com o tempo de cura de 28 dias para ambas soluções poliméricas do compósito rejeito-polímero-fibra em superfície polida.



RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura e SP: superfície polida.

Figura 4.24. Gráficos de cisalhamento direto no rejeito de minério de ferro com inserção de fibra em superfície polida para solução polimérica de 1:4 e 1:2, respectivamente.

Nota-se que a solução polimérica de 1:2, proporcionou no geral, uma maior resistência ao cisalhamento das amostras de rejeito com 28 dias de cura. Observa-se ainda que a resistência apresentou-se maior para maiores tensões de confinamento. O comportamento das curvas são semelhantes, pois ambos compósitos, com 1:4 e 1:2 de solução polimérica, já haviam sido cisalhados.

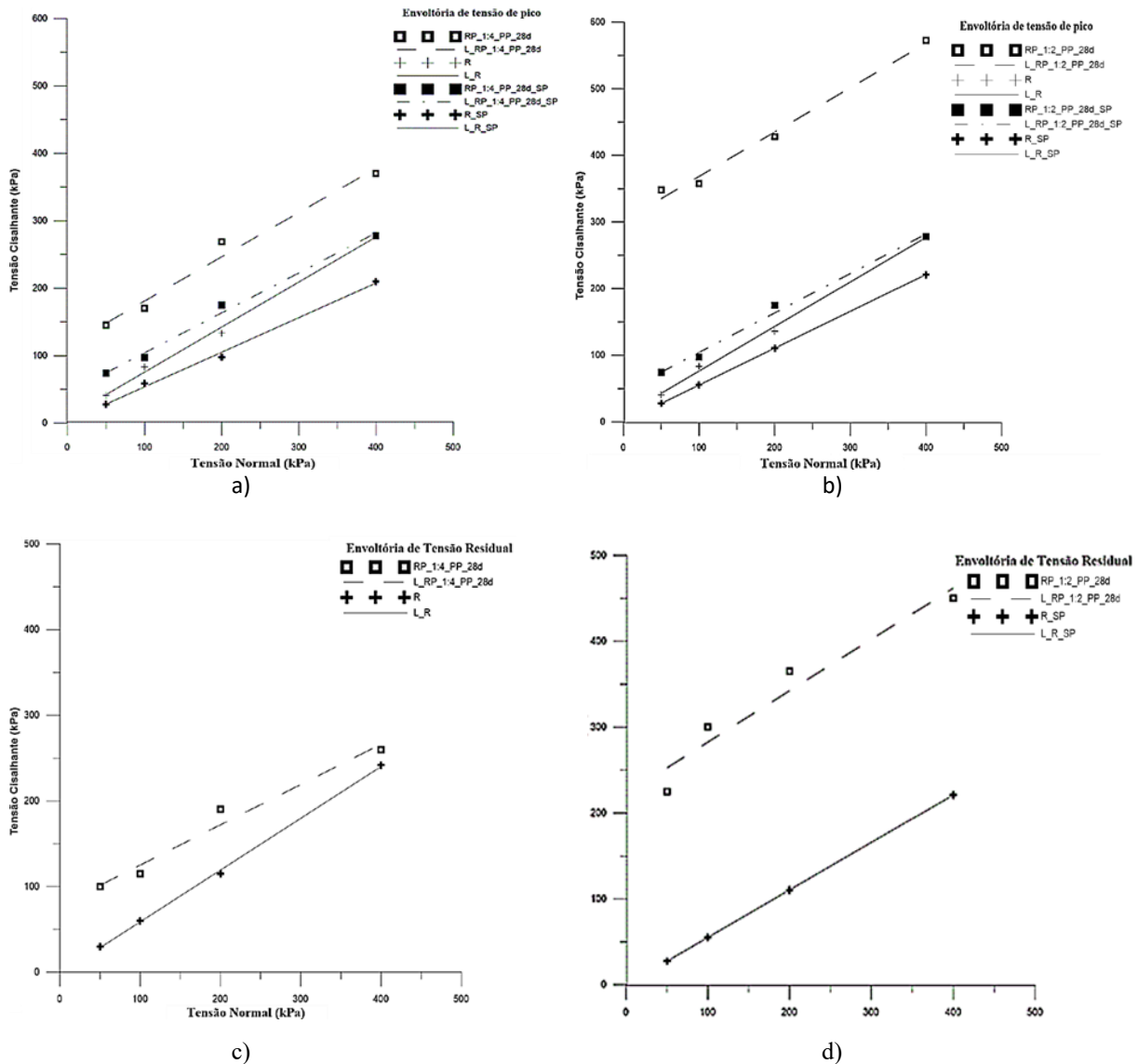
As envoltórias de resistência utilizadas para calcular os parâmetros de resistência dos compósitos com inserção de fibras submetidos ao ensaio de cisalhamento direto com ambas proporções de solução polimérica e 28 dias de cura são apresentadas na Figura 4.25.

Analisando as envoltórias correspondente a tensão de pico observa-se que a solução polimérica de 1:2 apresentou valores correspondentes aos parâmetros de resistência bem superiores ao compósito com 1:4 de solução polimérica, mostrando que a inserção da fibra no compósito com maior solução foi mais solicitada, atuando assim como reforço.

Verificando as envoltórias de tensão de pico para os compósitos com superfície polida observa-se que não apresentaram mudanças significativas em seu comportamento, porém ambos dosagens dos compósitos apresentaram melhora quando comparados com rejeito puro até mesmo com o rejeito puro ser ter ocorrido o cisalhamento, demonstrando assim a atuação do polímero-fibra.

Na envoltória de tensão residual houve um aumento considerável de ambos parâmetros de resistência para a solução polimérica com 1:2 e uma melhora significativa quando comparado com o rejeito puro.

É possível observar que ambas soluções atuam melhorando significativamente o rejeito, porém o aumento do valor da coesão aparente e do ângulo de atrito efetivo quando inserido no compósito rejeito-polímero-fibra a solução polimérica com 1:2 proporciona melhores resultados quando analisado os parâmetros de resistência.



R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura e SP: superfície polida.

Figura 4.25 Envolvórias do rejeito de minério de ferro com inserção de fibra em superfície polida a) solução de 1:4 %, b) solução 1:2, c) solução de 1:4 e d) solução 1:2.

Na Tabela 4.10 são apresentados os parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto no rejeito puro, R, com adição de água referente a solução de 25% e 50%, onde relaciona-se 1:4 e 1:2 em relação ao volume, respectivamente, e compósitos rejeito-polímero-fibra para ambas soluções poliméricas com tempo de cura de 28 dias para ensaio convencional e de superfície polida. Ressalta-se que os valores referentes ao ensaio de superfície polida só serão apresentados os parâmetros de resistência obtidos na tensão de pico, pois não há diferença significativa nos valores obtidos dos parâmetros.

Tabela 4.10. Tabela com os parâmetros de resistência referentes ao rejeito de minério de ferro e compósitos

	Tensão de Pico		Tensão Residual	
	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
R	33,8	9,4	27,0	3,0
RP_1:4_28d_PP	36,5	130,0	23,7	34,5
RP_1:2_28d_PP	33,7	301,8	24,3	240,2
R_SP	28,9	2,4		
RP_1:4_28d_PP_SP	27,3	21,6		
RP_1:2_28d_PP_SP	30,7	45,0		

R: Rejeito; RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura e SP: superfície polida.

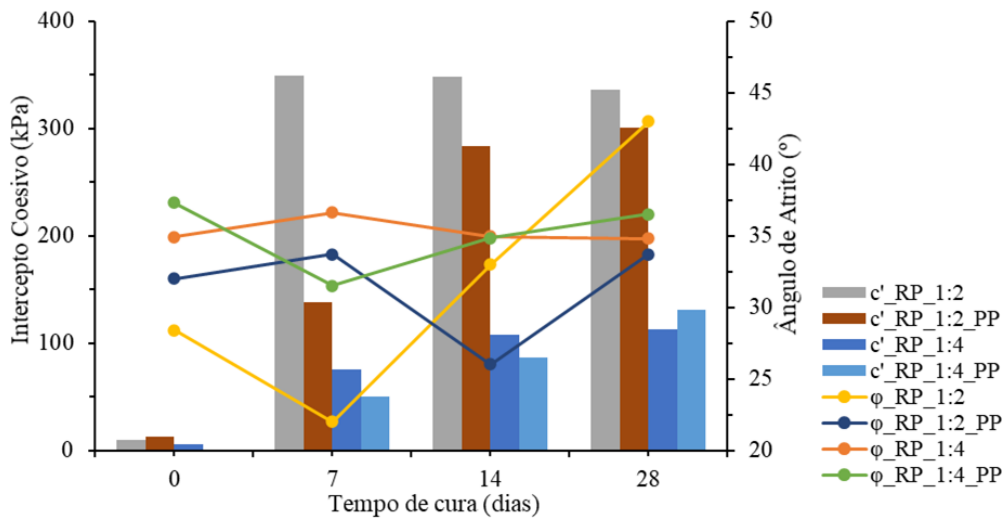
Por meio dos valores obtidos para a tensão de pico, pode-se observar que no compósito rejeito-polímero-fibra o valor do intercepto coesivo para solução polimérica de 1:2 correspondeu ao dobro do valor obtido com a solução de 1:4, indicando maior resistência. O ângulo de atrito não apresentou uma mudança de valor significativa entre as proporções das soluções. Constata-se assim a viabilidade da inserção da solução de 1:2, pois apresenta uma melhora significativa quanto a resistência do material estudado.

Para os compósitos com superfície polida observa-se a melhora dos valores correspondentes a ambos os parâmetros de resistência no compósito rejeito-polímero-fibra com solução polimérica de 1:2 logo, mesmo já ocorrendo o cisalhamento essa solução apresenta uma resistência superior quando comparada a solução de 1:4.

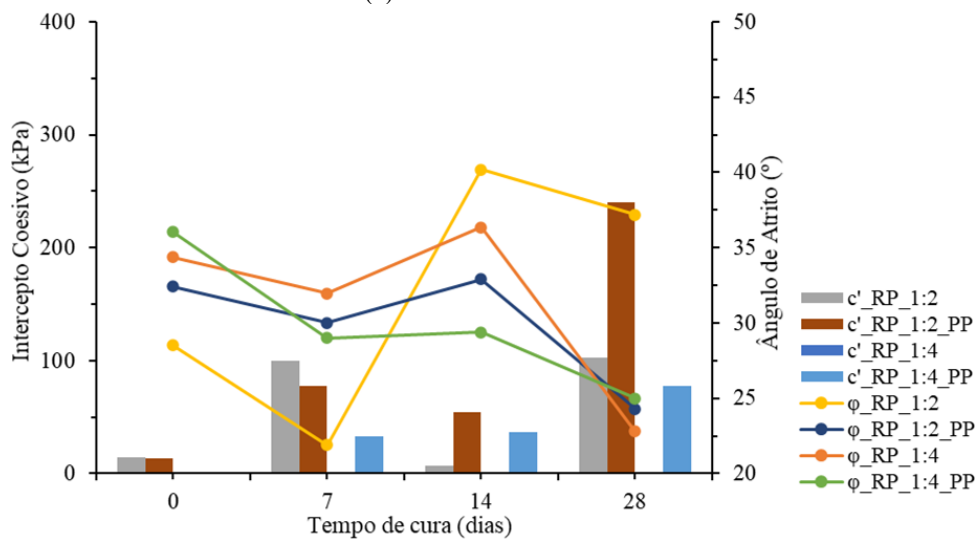
Analisando os valores dos parâmetros de resistência obtidos para a tensão residual a solução polimérica de 1:2, como já esperado, apresentou melhores resultados mostrando que a inserção do polímero-fibra, nesta solução, atuou com maior eficácia evitando uma redução significativa do intercepto coesivo.

Pode-se constatar que todos os compósitos apresentaram uma melhora da resistência com a inserção de polímero-fibra no rejeito, porém a solução polimérica de 1:2 indica maior viabilidade de aplicação pois apresentou melhores valores dos parâmetro de resistência.

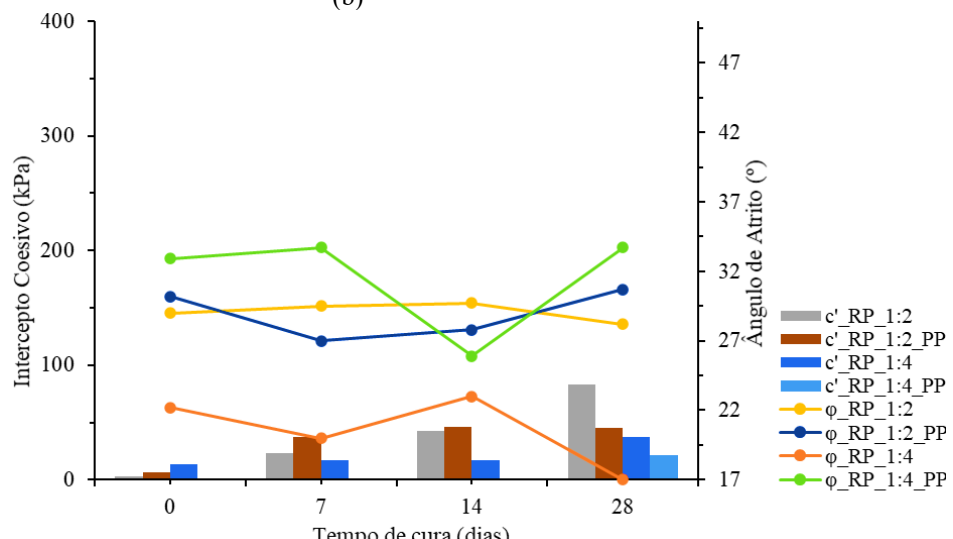
Na Figura 4.26 é apresentada a relação entre intercepto coesivo, c' , e ângulo de atrito, ϕ' , dos respectivos compósitos em relação ao tempo de cura.



(a)



(b)



(c)

RP: Rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4 e 1:2: proporção da solução; 28d: 28 dias de cura e SP: superfície polida.

Figura 4.26. Relação ângulo de atrito e intercepto coesivo por tempo de cura para os compósitos com parâmetros obtidos para (a) tensão de pico (b) tensão residual e (c) tensão de pico para ensaio em superfície polida.

Percebe-se que o intercepto coesivo, para a tensão de pico, aumenta de acordo com tempo de cura, exceto para o compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução que manteve-se praticamente constante após 7 dias de cura.

Analisando o intercepto coesivo para os compósitos com inserção de fibra, nota-se que a fibra mesmo aumentando o valor do intercepto coesivo, se comparado aos compósitos com a mesma dosagem de solução polimérica a inserção de fibra apresentou valores inferiores, tal fato pode ocorrer devido a fibra mesmo atuando na união dos grãos há um menisco, entre a fibra e o grão, podendo gerar a redução da resistência de comparado somente com a função do polímero. Vale ressaltar que o compósito rejeito-polímero-fibra ocorreu um aumento superior nos incrementos referentes ao o intercepto coesivo com o tempo de cura, quando comparado ao compósito rejeito-polímero nas mesmas dosagens poliméricas.

Observa-se que os valores do ângulo de atrito obtidos por meio da tensão de pico e residual não apresentaram um aumento considerável, tal fato pode ter ocorrido devido a solução deixar o material com alto teor de umidade, reduzindo a aderência entre o polímero e o rejeito. A solução de 1:2 por ser em maior quantidade inicialmente gerou um decréscimo do valor, porém com o tempo de cura e enrijecimento do material, forneceu ao compósito um valor elevado de ângulo de atrito.

Constata-se que o compósito rejeito-polímero com solução 1:2 apresenta valores mais elevados de intercepto coesivo e ângulo de atrito, principalmente para o tempo de cura de 28 dias, apresentando assim uma resistência superior a solução com menor dosagem polimérica.

Verifica-se que não há um crescimento do intercepto coesivo para a tensão residual com o tempo de cura. Analisando os compósitos com fibra, é possível constatar que a fibra atuou como reforço havendo um maior intercepto coesivo para esses compósitos.

Quanto a proporção das soluções, a solução de 1:2 de polímero favorece uma maior resistência aos compósitos se comparados a solução de 1:4, o que já esperava-se pois ocorreu este comportamento quando analisado os gráficos referentes a tensão de pico e as curvas de cisalhamento.

Liu *et al.* (2018) e Sousa (2020), realizaram estudos com compósito solo-polímero, ambos constatam que polímero teve uma influência significativa no desenvolvimento da coesão e que aumentam com o aumento das concentrações de polímeros, devido o polímero atuar como aglutinante de partículas. Liu et al (2018), constatou que os ângulos de atrito interno dos compósitos tiveram pouca mudança com o aumento da concentração de polímero, ficando na faixa de 22 a 33°, permanecendo na faixa de valores encontrados com a presente pesquisa.

Nos ensaios realizados para os compósitos em superfície polida, analisando-se os valores de intercepto coesivo, houve um aumento de acordo com tempo de cura, tal fato percebe-se principalmente para o compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução, pois o aumento foi de aproximadamente duas vezes. Os valores de intercepto coesivo dos compósitos com inserção de fibra apresentaram acréscimo com tempo de cura, porém com valores inferiores aos compósitos sem fibra.

Analisando-se as dosagens de solução polimérica no compósito rejeito-polímero, percebe-se que a maior dosagem apresenta melhores valores de ambos os parâmetros de resistência. A inserção de fibra não alterou significativamente o ângulo de atrito, como já esperado, pois a fibra reduz o atrito dos grãos atuando mais como reforço entrelaçando os grãos. Constata-se que a inserção polimérica atua como influência de reforço na fase residual.

4.2.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio foi adaptado para o material estudado, devido a proposta de utilizar o compósito em estradas não pavimentadas para baixo volume de tráfego. Na Tabela 4.11 estão reunidos os valores da resistência à tração (RT) por compressão diametral dos compósitos.

Tabela 4.11. Resultados do valor da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos.

Compósito	RT (MPa)
RP_1:4	0,11
RP_1:2	0,44
RP_1:4_PP	0,21
RP_1:2_PP	0,60

Os compósitos rejeito-polímero com 1:2 de solução polimérica, apresentaram uma resistência a tração maior que os compósitos com menor teor de polímero, chegando a ser quatro vezes maior, constatando-se uma melhora significativa quando dobrou-se a porcentagem de solução polimérica.

Analisando os compósitos com inserção de fibras, ao dobrar a quantidade de polímero na amostra, o valor de RT foi três vezes maior, apresentando assim a melhora do valor obtido quando inserido essa solução.

Quando comparado aos compósitos com o mesmo teor de solução e sem inserção de fibras, o valor continua maior, porém sem aumento significativo. Constata-se que a fibra é

solicitada e atua como reforço, melhorando assim a resistência do material. Para a finalidade na pavimentação, a fibra não apresenta uma melhora significativa após a inserção do polímero.

Comparando-se os valores obtidos com os de materiais existentes na literatura tem-se o valor de RT para: Areia Asfalto Usinada à Quente (AAUQ) de 0,52 MPa, asfalto borracha na condição úmida é de 0,50 MPa (Bernucci, *et al.* 2010). Dias (2004), utilizando 1:4 de cal em misturas cinza-cal com 28 dias de cura, obteve o valor de 0,33 MPa e com 9% de cal com o mesmo tempo de cura, o valor foi 0,13 MPa.

Conclui-se que ambos os compósito com 1:2 de solução polimérica estão na faixa de valores aceitáveis, porém vale ressaltar, que a melhora foi mais significativa para o compósito rejeito-polímero sem fibra.

4.2.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

São apresentados os resultados obtidos com a realização do ensaio de módulo de resiliência para solo, realizado para o rejeito puro e compósitos para ambas proporções, assim como, os valores obtidos pelo ensaio de misturas asfálticas, que também foi adaptado para a realização do ensaio nos compósitos.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA – INDICADO PARA SOLOS

O módulo de resiliência (MR), corresponde à máxima energia, por unidade de volume, que um material é submetido sem sofrer deformações plásticas. Medina e Mota (2015) determinam que a deformação plástica de um sistema com poros não saturados ocasiona um escorregamento no contato dos grãos e acomodações irreversíveis de pequenas partículas nos poros das maiores.

Para o cálculo do módulo de resiliência necessita-se apenas da parcela de deformação elástica do material ou deformação resiliente. Sabe-se que com o envelhecimento do material há a geração do aumento da parcela plástica da deformação, reduzindo o módulo de resiliência com o aumento dos dias de cura que é regido pela parcela elástica.

A Tabela 4.12 apresenta a média dos valores de MR obtidos por meio do ensaio realizado para os pares de tensões ensaiados no rejeito puro e nos compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra, com ambos teores de solução.

Tabela 4.12. Média dos valores de MR

Material	Média do MR (MPa)
R	174
RP_1:4_7d	136
RP_1:4_14d	170
RP_1:4_28d	244
RP_1:4_7d_PP	67
RP_1:4_14d_PP	109
RP_1:4_28d_PP	150
RP_1:2_7d	242
RP_1:2_14d	364
RP_1:2_28d	449
RP_1:2_7d_PP	405
RP_1:2_14d_PP	475
RP_1:2_28d_PP	536

R: Rejeito; RP: rejeito-polímero; PP: fibras de polipropileno; 1:4: proporção da solução; 7d,14d e 28d: 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente.

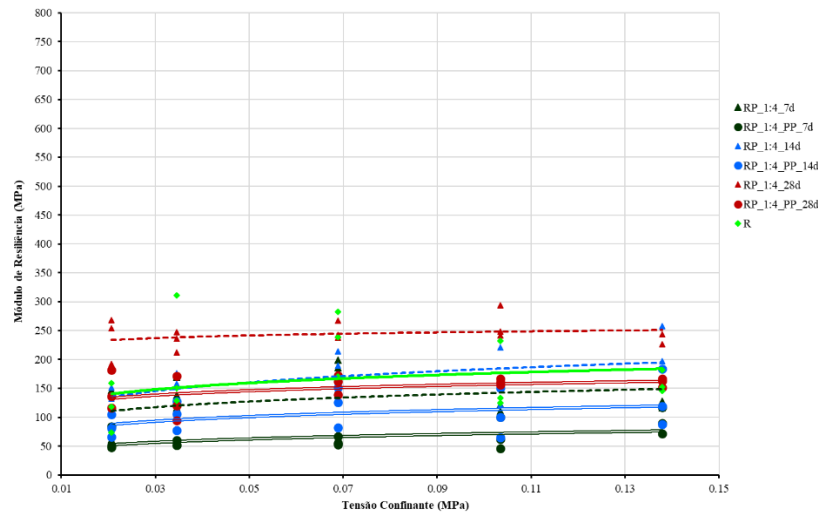
Nota-se que a inserção da solução de 1:4 , só aumentou o valor médio de MR com o tempo de cura de 28 dias e que a inserção de fibras não foi vantajosa em nenhum tempo de cura. Para a solução de 1:2 , a inserção do polímero apresentou um valor médio de MR crescente com o tempo de cura e a inserção de fibras juntamente com a solução, apresentou um considerável aumento no valor médio de MR.

Comparando-se o aumento da proporção da solução polimérica, há um ganho significativo no valor médio de MR, aproximadamente o dobro, vale ressaltar que o valor aumenta com o tempo de cura. Analisando-se após a inserção de fibras, há um aumento de quase cinco vezes no valor médio de MR.

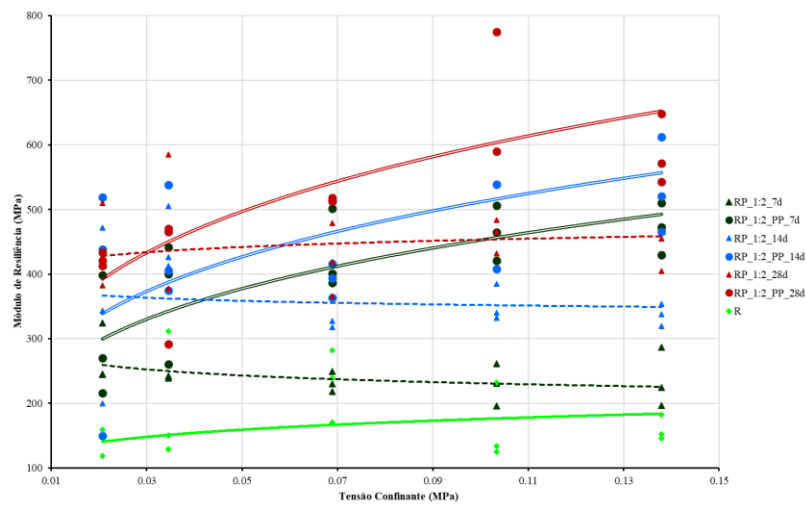
Analisando-se os valores médios de MR, observa-se que houve um aumento quando inserido a solução de 1:2 e este valor apresentou uma melhora com o tempo de cura, apresentado assim a viabilidade de sua aplicação. Após a inserção de fibras, ocorreu um aumento do valor médio para os compósitos com solução de 1:2, indicando que a fibra é solicitada e atua como reforço. Por outro lado, não houve um aumento tão significativo se comparado a não inserção da mesma.

Vale ressaltar que segundo Pacheco (2011), os solos finos possuem valores de módulo de resiliência variando entre 50 MPa a 110 MPa. Logo, todos os valores encontrados, estão nesta faixa ou acima.

Na Figura 4.27 são apresentados os gráficos em função da tensão confinante, referentes a realização do ensaio de módulo de resiliência no rejeito puro, R, no compósito rejeito-polímero, RP, e compósito rejeito-polímero-fibras, PP, com ambos teores de solução e nos diferentes dias de cura 7, 14 e 28 dias.



a)



b)

Figura 4.27. Relação Módulo de Resiliência x tensão confinante a) solução polimérica com 1:4 e b) solução polimérica com 1:2.

Os compósitos no geral, não apresentaram um bom ajuste com a utilização desse modelo. Percebe-se que os compósitos que apresentaram um seguimento das curvas demonstram um enrijecimento do material com o tempo de cura. O maior valor médio de MR, foi relacionado ao compósito com solução de 1:2, pois todas as curvas estão acima do rejeito puro, o que indica boa resistência a deformações plásticas.

Nota-se que as curvas dos compósitos com inserção de fibra, apresentaram um comportamento crescente mostrando que a fibra ajuda apresentando um comportamento de deformação elástica e à medida que aumentou o tempo de cura, houve uma melhor adequação dos compósitos ao modelo.

Era esperado um melhor ajuste para os compósitos, acredita-se que por existir uma alteração do comportamento do material, aumento da cimentação entre os grãos, tanto que para dosagens com maior proporção de polímero obteve-se maiores valores de MR. Deve-se ressaltar que os modelos foram baseados para solos puros, arenosos, argilosos e não para um com as características do material estudado nesta pesquisa. Dessa forma, outros modelos foram avaliados para verificar qual o mais adequado para o caso estudado.

Na Figura 4.28 apresenta-se o ajuste dos resultados do módulo de resiliência com a tensão desvio para o rejeito puro, R, compósito rejeito-polímero, RP, e compósito rejeito-polímero-fibras de polipropileno, PP, com ambos teores de solução e nos diferentes dias de cura (7, 14 e 28 dias).

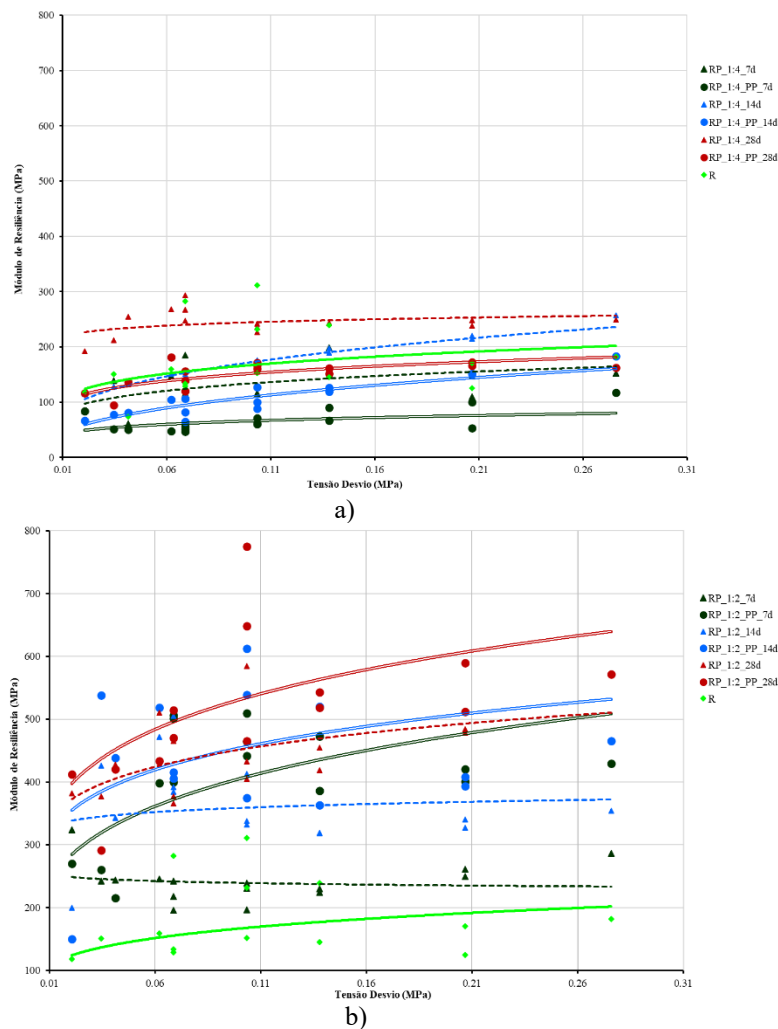


Figura 4.28. Relação Módulo de Resiliência x tensão desvio (a) solução polimérica com 1:4 e (b) solução polimérica com 1:2.

Observa-se que o comportamento do compósito melhora com o tempo de cura independente se submetido a tensões estáticas (cisalhamento direto e compressão simples) ou tensões cíclicas (módulo resiliente).

Para os compósitos estudados os modelos MR x tensão confinante (σ_3) apresentaram ajuste com aparente tendência, no entanto, observa-se que o modelo MR x tensão desvio (σ_d) apresentaram melhores concordâncias.

As constantes de regressão para os modelos mencionados, tensão confinante (σ_3) e desvio (σ_d), são apresentadas na Tabela 4.13 assim como o coeficiente de determinação (R^2) de cada ajuste ao modelo.

Tabela 4.13. Constantes de regressão para tensão confinante e tensão desvio

Material	Modelo σ_3			Modelo σ_d		
	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²
R	243,87	0,14	0,08	114,19	0,19	0,16
RP_1:4_7d	202,71	0,15	0,14	213,3	0,2	0,22
RP_1:4_14d	285,55	0,19	0,36	351,86	0,31	0,9
RP_1:4_28d	269,34	0,04	0,07	272,76	0,04	0,12
RP_1:4_PP_7d	112,11	0,19	0,23	101,84	0,19	0,21
RP_1:4_PP_14d	164,77	0,16	0,14	263,25	0,38	0,76
RP_1:4_PP_28d	200,03	0,1	0,18	228,49	0,18	0,49
RP_1:2_7d	195,04	0,07	0,17	226,48	0,02	0,02
RP_1:2_14d	331,43	0,026	0	390,15	0,04	0,01
RP_1:2_28d	492,83	0,036	0,03	597,09	0,12	0,35
RP_1:2_PP_7d	827,15	0,26	0,53	679,15	0,22	0,37
RP_1:2_PP_14d	935,63	0,26	0,23	649,84	0,15	0,08
RP_1:2_PP_28d	1109,3	0,26	0,53	809,86	0,18	0,24

Por meio da análise constata-se que o modelo de tensão desvio apresentou melhores valores de coeficiente de determinação, indicando que o material estudado depende, principalmente, da tensão desvio. Nota-se que o aumento da solução polimérica, para o mesmo tempo de cura, não aumentou os valores do coeficiente de determinação.

Diante do comportamento similar para ambos modelos analisados, buscou-se o ajuste dos dados também pelo modelo composto.

No caso do modelo composto a representação do módulo de resiliência é dada por uma superfície contida no espaço tridimensional (σ_3 , σ_d , MR), visto que estes modelos são dependentes da tensão confinante e da tensão desvio. Assim, por meio de superfícies é possível prever o módulo de resiliência para diversas combinações de tensão confinante e desvio desejadas.

Na Figura 4.29 é mostrado o modelo composto para o ajuste dos resultados considerando o MR, σ_d e σ_3 para o rejeito puro.

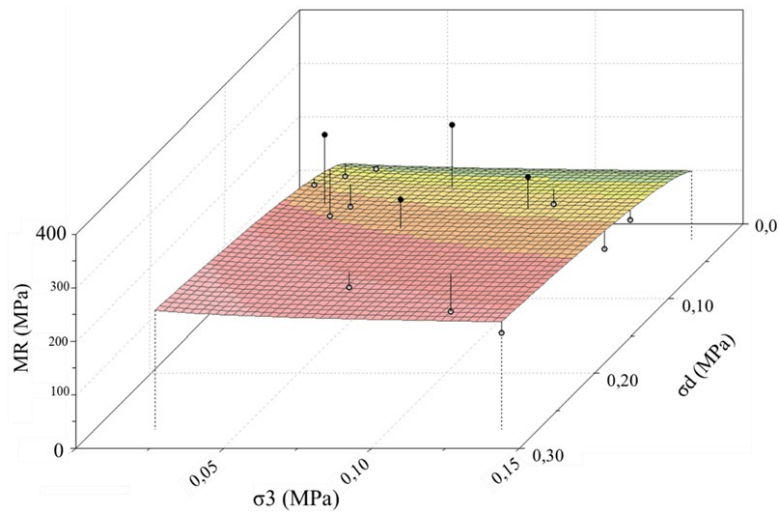
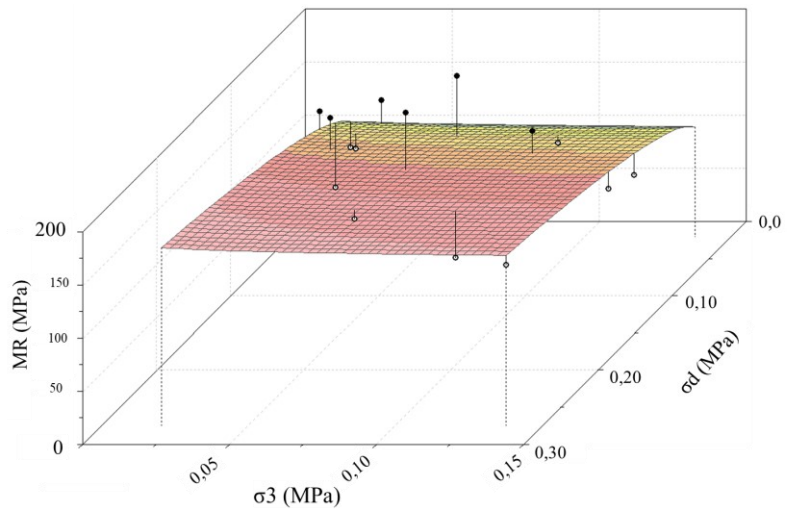


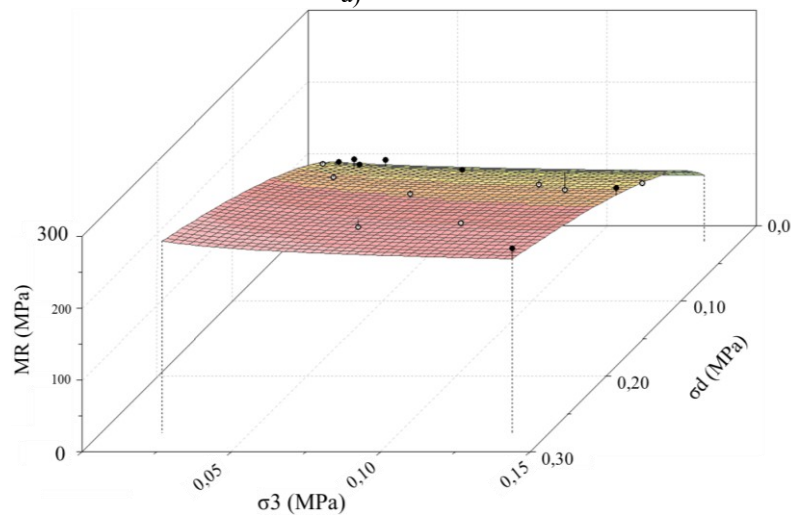
Figura 4.29. Modelo composto do rejeito puro.

Pela Figura 4.29 observa-se que o rejeito puro é dependente tanto da tensão confinante quanto da tensão desvio, no entanto, para tensões menores há uma dependência mais acentuada da tensão desvio.

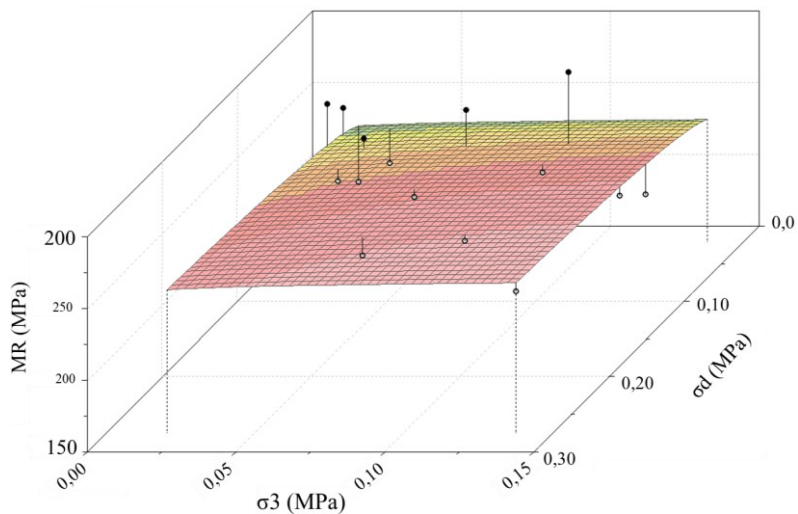
A Figura 4.30 apresenta o gráfico 3D do modelo composto para os compósitos rejeito-polímero com solução polimérica de 1:4 para os diferentes tempos de cura, 7, 14 e 28 dias respectivamente.



a)



b)



c)

Figura 4.30. Modelo Composto para os compósitos rejeto-polímero (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.

Já a Figura 4.31 apresenta o gráfico 3D do modelo composto para os compósitos rejeto-polímero-fibra com solução polimérica de 1:4 para os diferentes tempos de cura, 7, 14 e 28

dias respectivamente. A análise destes gráficos mostra que o rejeito melhorado com polímero tem seu MR dependente tanto da tensão desviadora quanto da tensão confinante, apresentando menor influência da tensão desvio com maior tempo de cura.

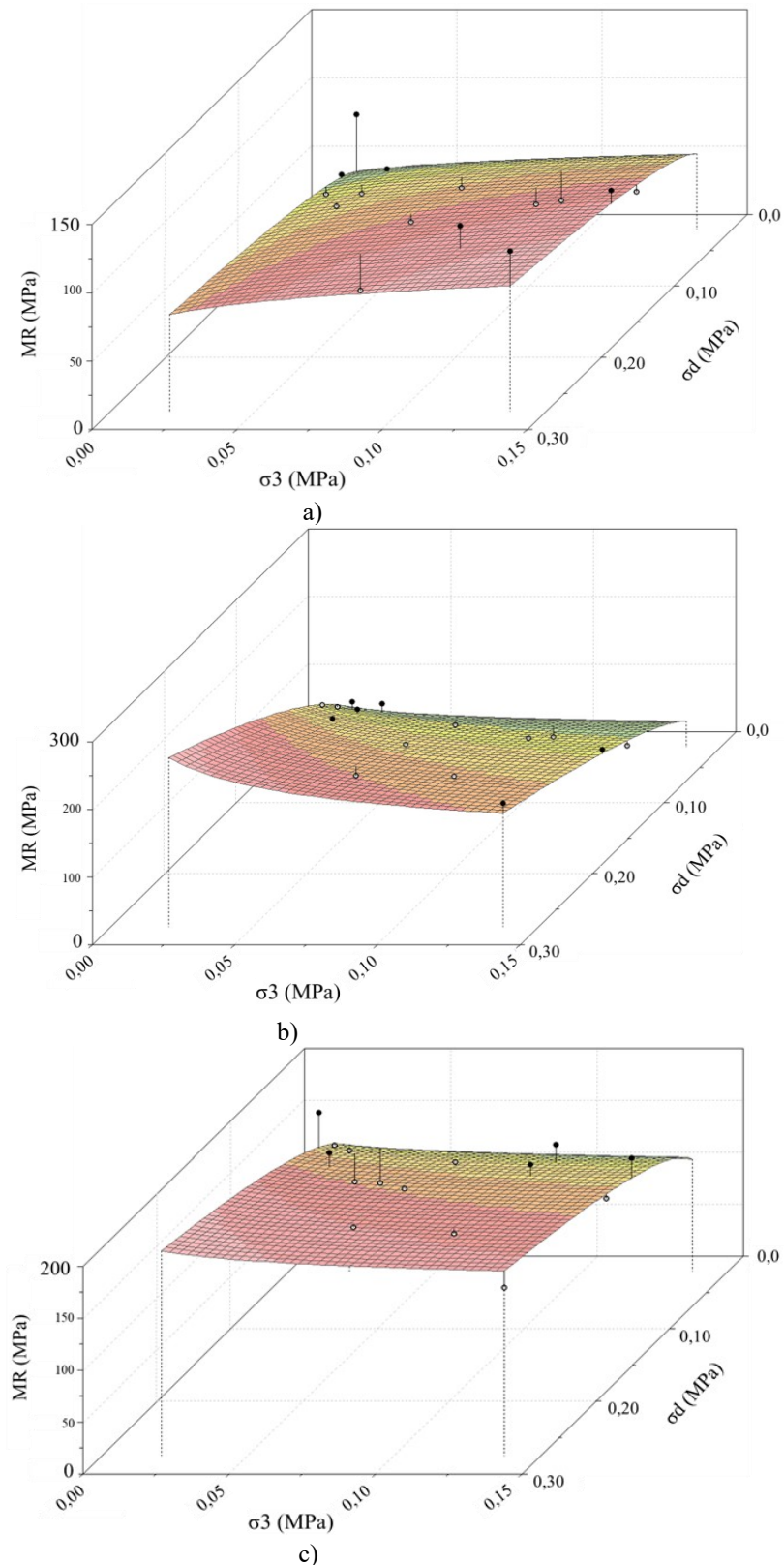


Figura 4.31. Modelo Composto para os compostos rejeito-polímero-fibra (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.

Analisando o compósito rejeito-polímero-fibra, apresentam o comportamento semelhante aos do compósito sem fibra, porém constata-se uma influência bem maior com o tempo de cura de 14 dias, porém com 28 dias essa influência quase não foi observada.

A Figura 4.32 apresenta o gráfico 3D do modelo composto para os compósitos rejeito-polímero com solução polimérica de 1:2 para os diferentes tempos de cura, 7, 14 e 28 dias respectivamente.

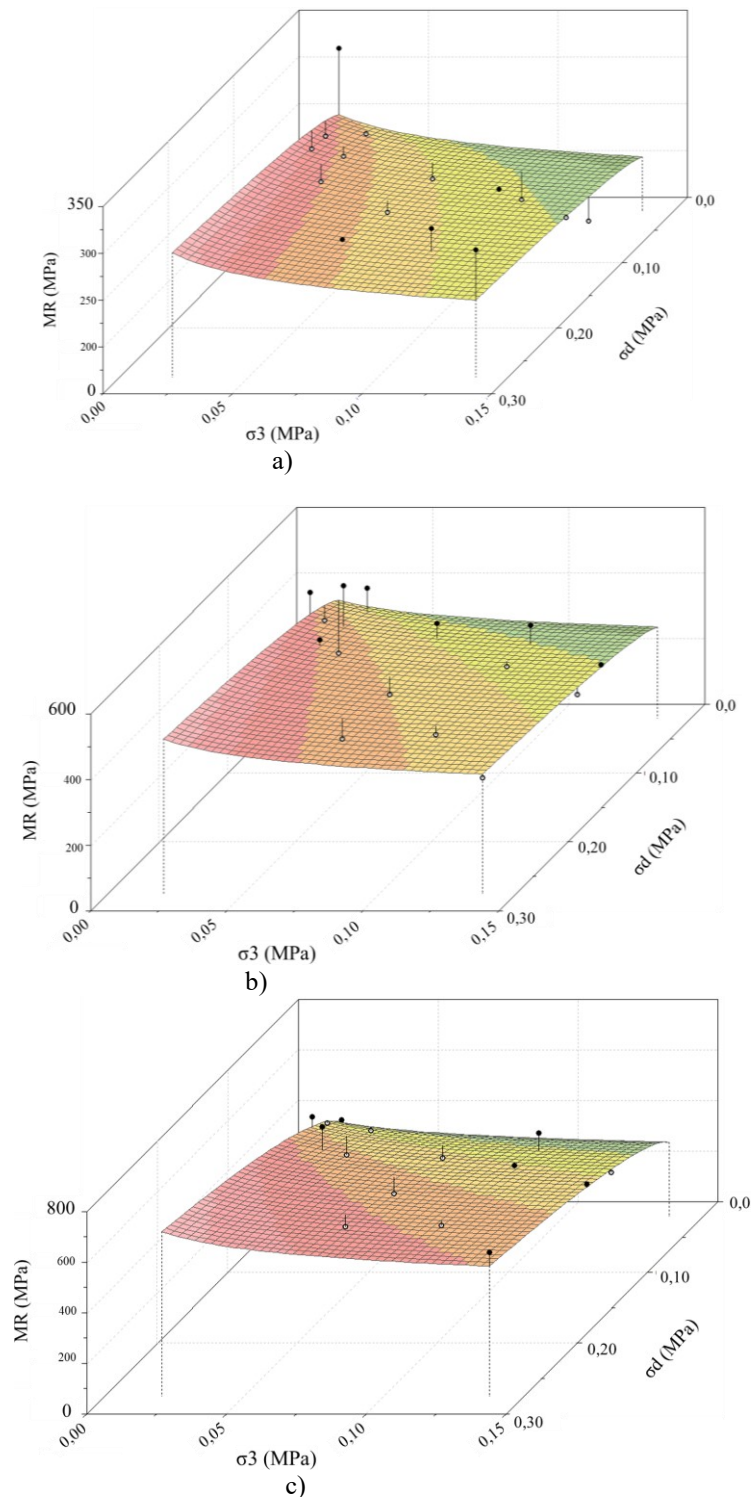


Figura 4.32. Modelo Composto para os compósitos rejeito-polímero (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.

A Figura 4.33 apresenta o gráfico 3D do modelo composto para os compósitos rejeito-polímero-fibra com solução polimérica de 1:2 para os diferentes tempos de cura, 7, 14 e 28 dias respectivamente.

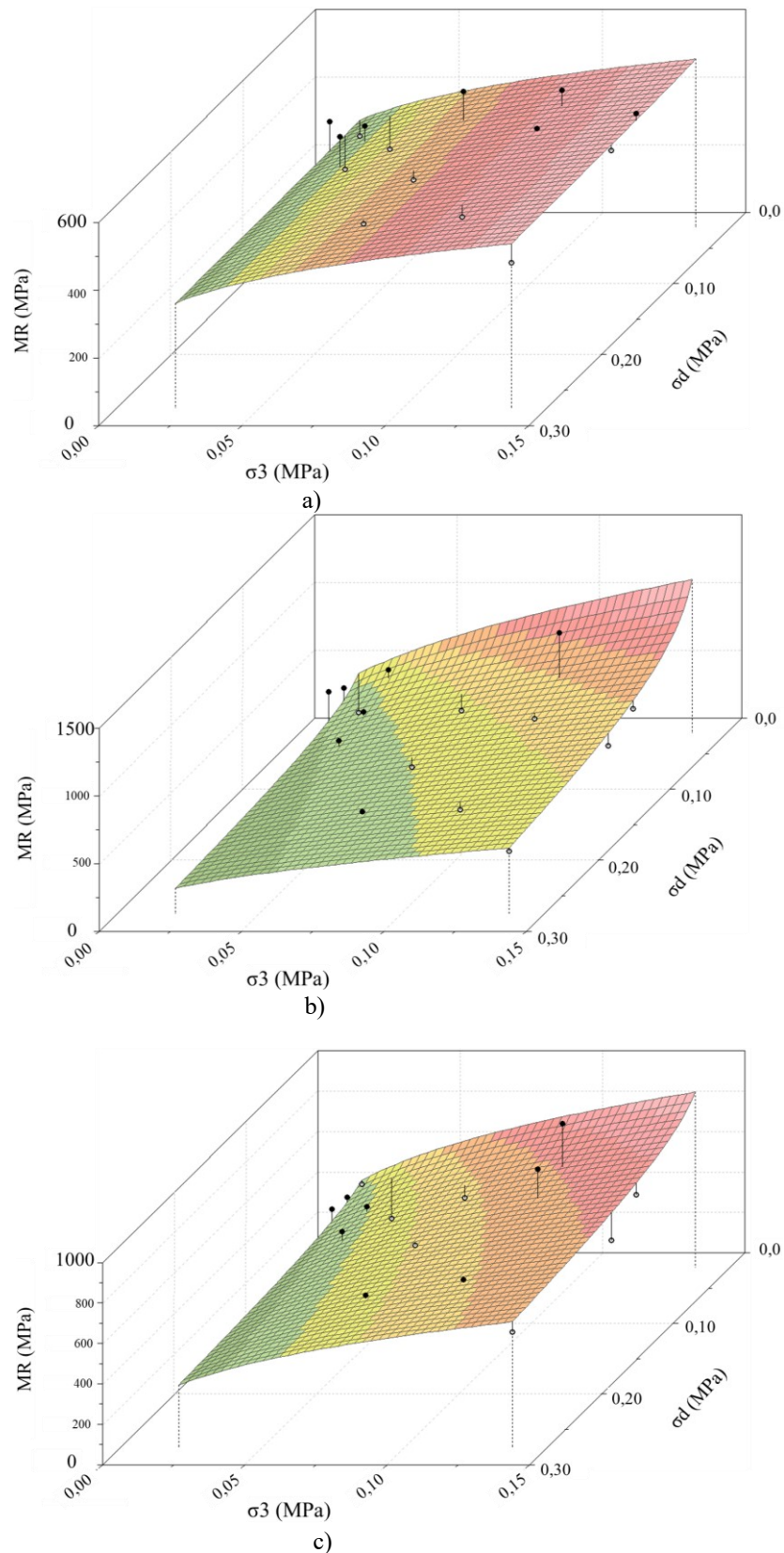


Figura 4.33. Modelo Composto para os compósitos rejeito-polímero-fibra (a) 7 dias; (b) 14 dias e (c) 28 dias.

A análise destes valores demonstra que o rejeito melhorado com polímero tem seu MR dependente tanto da tensão desviadora quanto da tensão confinante, apresentando maior influência da tensão desvio com maior tempo de cura.

Analisando os compósitos rejeito-polímero-fibra, com o aumento da tensão apresentam uma mudança evidente de comportamento, ocorrendo inicialmente uma maior influência da tensão confinante e com o aumento da tensão observa-se a influência da tensão desvio.

Verificando-se o tempo de cura, não apresentou mudança quanto ao comportamento dos compósitos.

Comparando-se os compósitos com ambos teores de solução, observa-se que ambos apresentam uma dependência mais acentuada da tensão desvio. Com a inserção de fibras, observou-se alteração apenas no comportamento com solução de 1:2, que passou a ter uma maior dependência da tensão desvio com aumento com aumento do módulo de resiliência.

Na Tabela 4.14 está representada as constantes de regressão para o modelo citado e o coeficiente de determinação (R^2) de cada ajuste ao modelo.

Tabela 4.14. Constantes de regressão e R^2 para o modelo composto.

Modelo Composto				
Material	K1	K2	K3	R²
R	227,28	-0,5357	0,1749	0,77
RP_1:4_7d	190,17	-0,0239	0,1691	0,17
RP_1:4_14d	354,55	-0,0511	0,3742	0,94
RP_1:4_28d	270,24	0,0098	0,0309	0,83
RP_1:4_7d_PP	155,68	0,1374	0,1969	0,35
RP_1:4_14d_PP	234,12	-0,2105	0,5813	0,94
RP_1:4_28d_PP	205,18	-0,0541	0,1931	0,49
RP_1:2_7d	200,09	-0,1037	0,0432	0,19
RP_1:2_14d	317,69	-0,1354	0,1025	0,1
RP_1:2_28d	531,97	-0,1237	0,2163	0,49
RP_1:2_7d_PP	767,79	0,2378	-0,0091	0,54
RP_1:2_14d_PP	875,04	0,4998	-0,3269	0,36
RP_1:2_28d_PP	1090,34	0,3684	-0,1293	0,54

Medina e Motta (2015) deixam claro que não existe um modelo inerente ao solo, por existirem diversas possibilidades de ajustes estatísticos com certo conjunto de dados. Segundo Venson (2015), apesar de observar valores baixos de R^2 com alguns modelos, como apresentado na presente pesquisa, deve-se considerar que o módulo de resiliência é influenciado por outras questões que não são consideradas nos modelos, como a tensão volumétrica e granulometria do material, e no caso estudado, trata-se de um novo material e há o tempo de cura a ser levado em conta.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA –INDICADO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

Pela possibilidade de utilização principalmente do compósito rejeito-polímero com solução de 1:2 na camada superior de estradas não pavimentadas com baixo volume de tráfego, foram realizados ensaios adaptando-se a obtenção do MR como uma mistura asfáltica. O ensaio foi realizado aplicando tensão correspondente à 30% dos valores obtidos pelo ensaio de RT para a comparação com outros ensaios (Tabela 4.15).

Tabela 4.15. MR adaptado de misturas asfálticas dos compósitos.

Compósito	MR (MPa)
RP_1:4	649,00
RP_1:2	1634,00
RP_1:4_PP	504,00
RP_1:2_PP	1326,00

Comparando-se a porcentagem de solução polimérica, observa-se um aumento de quase três vezes no valor do MR, para o compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução, o mesmo ocorre para o compósito com inserção de fibras. Porém, quando comparado a mesma solução e a inserção de fibras, nota-se haver uma redução, mesmo que pequena, no valor do MR, indicando assim, a não justificativa de seu uso para estradas não pavimentadas com baixo volume de tráfego.

Oliveira *et al.* (2017), realizando ensaio de módulo de resiliência em areia obtiveram o valor de 1671MPa, considerando mistura de AAUQ indicada para pavimentos de baixo volume de tráfego e de 1510 MPa para mistura areia asfalto. Valores estes que vão em encontro ao obtido pela solução polimérica de 1:2.

4.2.6. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

A realização do ensaio de dano por umidade induzida partiu-se da necessidade do entendimento quanto ao comportamento dos compósitos em ambientes com temperaturas diferentes das encontradas habitualmente.

Por se tratar de um composto visando estabilização, resolveu-se adaptar situações de alteração de temperatura e submersão. A Tabela 4.16, apresenta os valores obtidos durante o ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos compósitos.

Tabela 4.16. Resultados da determinação por umidade induzida

Compósito	RT (MPa)	RTc (MPa)	RRT (%)
RP_1:4	0,11	0,06	54,39
RP_1:2	0,56	0,38	67,87
RP_1:4_PP	0,16	0,10	64,18
RP_1:2_PP	0,43	0,35	81,81

RT: resistência a tração; RTc: resistência a tração com condicionamento e RRT: razão a tração retida.

Analisando a porcentagem de solução, os compósitos com 1:2 de solução polimérica, apresentaram uma resistência tração maior que os compósitos com menor teor de polímero. Essa resistência também foi apresentada no ensaio realizado após o condicionamento ao dano submetido aos compósitos.

Observando-se os valores obtidos para os compósitos com inserção de fibra, observa-se elevação da resistência a tração para o compósito com 1:2 de solução polimérica.

Analisando os compósitos com inserção de fibras quando comparado aos compósitos com o mesmo teor de solução e sem inserção de fibras, mostram que só ocorreu uma pequena elevação apenas para o compósito com 1:4 de solução polimérica. Observando-se os valores encontrados após as amostras submetidas ao dano, há uma perda de resistência à tração menor nos compósitos rejeito-polímero-fibra com 1:2, indicando que a fibra é solicitada e atua como reforço, melhorando a resistência do material. Devido a este fato, apresentou uma razão a tração retida maior do que o compósito com 1:4 de solução.

Considerando os valores obtidos no cálculo da razão a tração retida, houve uma redução maior de resistência nas amostras com menor teor de polímero. A maior perda da capacidade de carga por volta de 45%, ocorreu, como esperado, para amostra com 1:4 de solução polimérica e a menor perda de capacidade de carga foi de 18% na amostra com 1:2 de solução polimérica e inserção de fibra.

Comparando-se a quantidade de polímero, quanto a razão a tração retida, conclui-se que o acréscimo de polímero acarretou um ganho de resistência principalmente nos compósitos não submetidos ao dano quanto nos submetidos, assim como, os que tiveram inserção de fibras.

As situações impostas às amostras, foram de certa forma mais severas quando comparados com as condições ambientais existentes no Brasil, porém constata-se que mesmo a amostra com maior perda de resistência, ainda obteve uma resistência superior a 50% de sua capacidade de carga.

Silva (2020), realizou os mesmos ensaios para compósito solo-polímero, para ambos teores de solução a autora obteve uma perda de capacidade de carga de aproximadamente 30%,

mostrando assim que os compósitos rejeito-polímero possuem maior resistência após submetidos ao dano por alteração de temperatura e umidade.

4.2.7. ENSAIO HAMBURG WHEEL-TRACK – SIMULADOR DE TRÁFEGO

Para a realização do ensaio de simulador de tráfego, foi necessária uma adaptação para que tornasse possível a avaliação do desgaste do compósito e assim, obter o afundamento máximo que os compósitos apresentariam após 20 mil ciclos de passagens de roda, simulando seu desempenho como camada de revestimento.

Na Figura 4.34 é apresentado o gráfico referente ao número de ciclos *versus* deformação máxima dos compósitos.

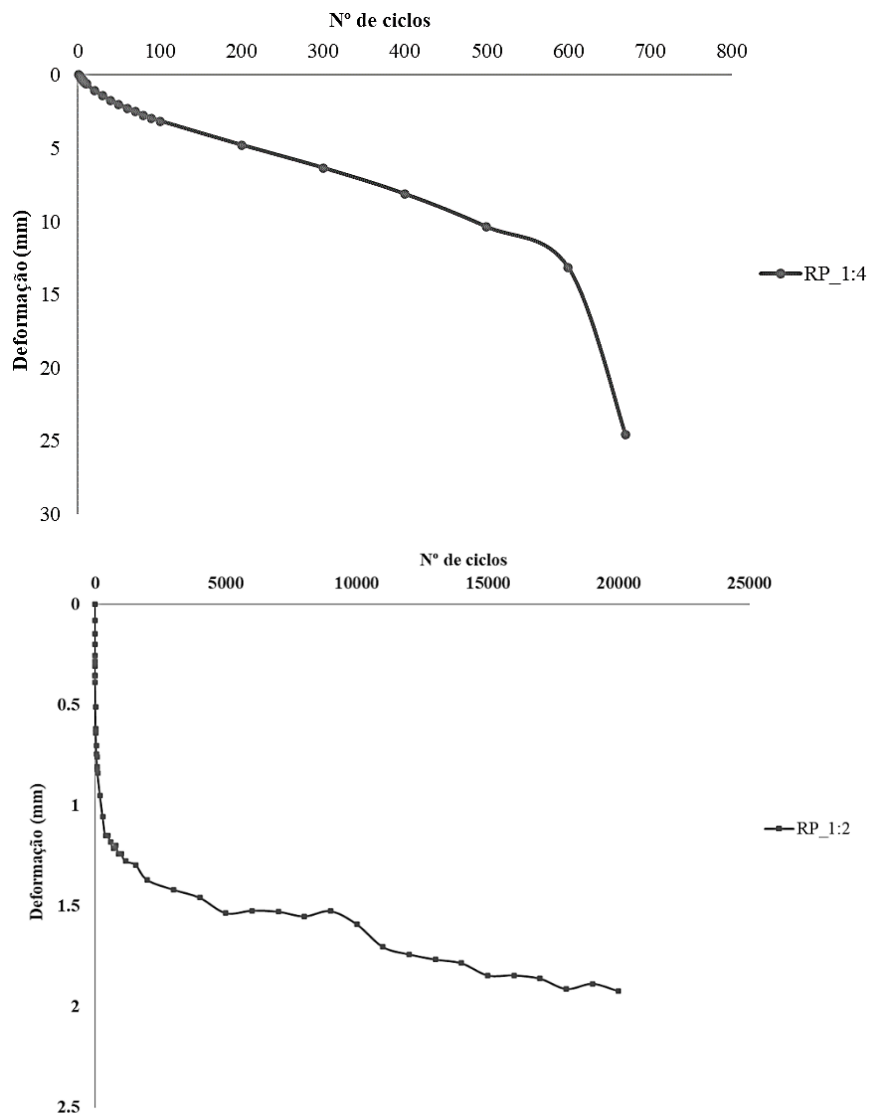


Figura 4.34 Gráfico referente ao número de ciclos *versus* deformação máxima para ambos compósitos com 1:4 e 1:2 de solução polimérica, respectivamente.

O compósito com 1:2 de solução polimérica, suportou bem os ciclos de passagem da roda. A parte inicial do gráfico, de 0 a 1.000 ciclos, chama-se parte de consolidação da amostra. Nesse intervalo, à medida que ocorre a passagem das rodas sobre a amostra, há acomodação final dos grãos.

Conforme exposto, os resultados mostram que o compósito 1:2 de solução polimérica pode ser usado como camada de revestimento, pois suportou o dobro de ciclos de acordo com o exigido na norma AASTHO T-324.

Comparando-se o resultado de afundamento obtido com o compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução polimérica e o encontrado por Silva (2020) ensaiando compósito solo-polímero, que foi de 2,73 mm, verifica-se que o compósito com rejeito obteve um menor afundamento, sendo assim, uma solução viável para esta aplicação. O menor afundamento deve-se a angulosidade dos grãos proporcionarem uma melhor aderência a solução polimérica de maior teor.

4.3. CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

4.3.1. ENSAIO DE SUCCÃO

O ensaio de psicrômetro (WP4C), foi realizado com objetivo de descartar que o ganho de resistência esteja associado apenas ao aumento da sucção com o tempo de cura.

Os valores obtidos com a realização do ensaio de sucção total são apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Valores do ensaio de sucção total.

Material	Sucção inicial (MPa)	Sucção final (MPa)
R	67,84	92,51
RP_1:4	95,37	101,51
RP_1:4_PP	95,89	100,78
RP_1:2	86,11	100,29
RP_1:2_PP	89,27	101,6

Observou-se uma estabilização dos valores de sucção total, tanto que ao 30º dia, sucção final, os compósitos não apresentaram uma alteração significativa dos valores obtidos na sucção inicial, 0 dias de cura. Para o rejeito puro após a adição de água, foi mantido fechado para conservação da umidade e no mesmo ambiente dos compósitos. Contudo, a medição final para

o rejeito ocorreu no 4º dia de cura, até a evaporação praticamente total da água do rejeito, o valor correspondente a última leitura possível foi de 92,51 MPa.

Os compósitos com pouco tempo de cura já apresentavam estabilização dos valores de sucção, enquanto o rejeito com água possuía maior umidade e assim menor valor de sucção.

Os valores obtidos na sucção total em 30 dias para os compósitos e o último valor passível de medição para o rejeito puro, mantiveram no mesmo patamar, o que nos possibilita constatar que o aumento de resistência e rigidez do compósito não ocorre apenas por conta da sucção, mas principalmente pela ação do polímero.

Constata-se que a cura ao ar leva ao acréscimo da resistência devido a redução da umidade e, assim, a sucção aumenta. Contudo, por meio da realização do ensaio de sucção total, constatou-se que o aumento de resistência ocorreu mais intensamente pela adição do polímero, já que não constatou-se por meio do ensaio a existência de uma alteração significativa no valor de sucção com o aumento do tempo de cura e com o rejeito puro.

4.3.2. EXPANSÃO

O ensaio de expansão foi realizado para um melhor entendimento do novo material, em condição submersa.

Os valores obtidos com a realização do ensaio foram considerados praticamente desprezíveis, todos se mantiveram na faixa de zero, mostrando que a inserção do polímero aglutina e cimenta os grãos, preenchendo os vazios, mas sem expandir dentro da amostra e a inserção de fibra reduz essa pequena expansão, porém sem alteração significativa.

4.3.3. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro necessário para se analisar, principalmente no quesito do melhoramento e estabilização. Na Tabela 4.18 são expostos os valores do coeficiente de permeabilidade do rejeito puro, do compósito rejeito-polímero e compósito rejeito-polímero-fibras com ambas soluções de polímero.

Tabela 4.18. Valores de coeficiente de permeabilidade (k) do rejeito puro e compósitos.

Material	k (m/s)
R	$2,96 \times 10^{-5}$
RP_1:4	$6,08 \times 10^{-7}$
RP_1:2	$6,24 \times 10^{-7}$
RP_1:4_PP	$4,38 \times 10^{-7}$
RP_1:2_PP	$3,11 \times 10^{-7}$

Observa-se que a inserção de polímero reduziu significativamente a permeabilidade do rejeito de minério de ferro. O valor obtido corresponde à solos permeáveis, areas argilosas, ao adicionar polímero o valor se enquadra ao correspondente a solos com baixa permeabilidade, argilas. Dessa forma, percebe-se que a ação da aplicação do polímero reduz a permeabilidade no rejeito, havendo redução dos vazios existentes.

Comparando-se a porcentagens de soluções poliméricas, nota-se que o aumento de polímero não muda a permeabilidade, tal fato explicado por haver preenchimento dos vazios no momento da inserção e o enrijecimento do material com o tempo de cura.

Pode-se observar que a inserção das fibras, diminuiu pouco a permeabilidade, quando comparado aos compósitos sem fibras, tal fato pode ser explicado pela ocupação das fibras nos vazios, onde elas podem reduzir os vazios, porém podem deixar interstícios que possibilitem a percolação da água.

Ressalta-se que não há uma mudança significativa de permeabilidade entre os compósitos, mostrando a viabilidade da inserção de polímero.

A literatura, indica que o coeficiente de permeabilidade de rejeitos varie entre os valores 10^{-4} m/s, para rejeitos arenosos, e até 10^{-11} m/s, para rejeitos argilosos finos e bem consolidados (Bhering, 2006). Nota-se que os valores obtidos com a realização deste ensaio estão na faixa de solos argilosos, mostrando assim que a inserção da solução polimérica reduz a permeabilidade do material.

4.3.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO

Devido à redução significativa da permeabilidade, verificou-se a taxa de absorção de água dos compósitos com o intuito de avaliar a redução dos vazios. A temperatura do ensaio manteve-se a 25°C . Na Tabela 4.19 mostram-se os resultados obtidos com a realização do ensaio.

Tabela 4.19. Valor de absorção dos compósitos.

Material	Absorção (%)
RP_1:4	18,37
RP_1:2	15,42
RP_1:4_PP	19,96
RP_1:2_PP	18,09

Por meio dos valores obtidos com a realização do ensaio de absorção, verifica-se que há uma redução maior referente a porcentagem de água retida na amostra com 1:2 de solução polimérica, quando comparada com a amostra de menor dosagem de polímero. Tal fato explica-se devido essa amostra possuir maior quantidade de solução, e o polímero atuar enrijecendo o material, ocasionando assim menor taxa de absorção.

Analisando os compósitos com inserção de fibra não há uma mudança significativas dos valores obtidos.

Comparando-se as mesmas proporções de solução entre os compósitos, há uma redução maior quanto a porcentagem de água retida para o compósito com solução de 1:2 sem inserção de fibras. Constata-se que a fibra absorve uma parte da água.

4.4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-AMBIENTAL

4.4.1. ESPECTROMETRIA DE FLORESCÊNCIA DE RAIOS X

Na Figura 4.35 é apresentado os elementos químicos obtidos pela análise de . espectrometria de fluorescência de raios x realizada no polímero puro e no compósito rejeito-polímero com ambas concentrações de polímero estudadas.

Na análise realizada no polímero, percebe-se a existência de uma maior quantidade de elementos químicos, quando comparado aos compósitos, esses elementos são decorrentes dos processos de polimerização.

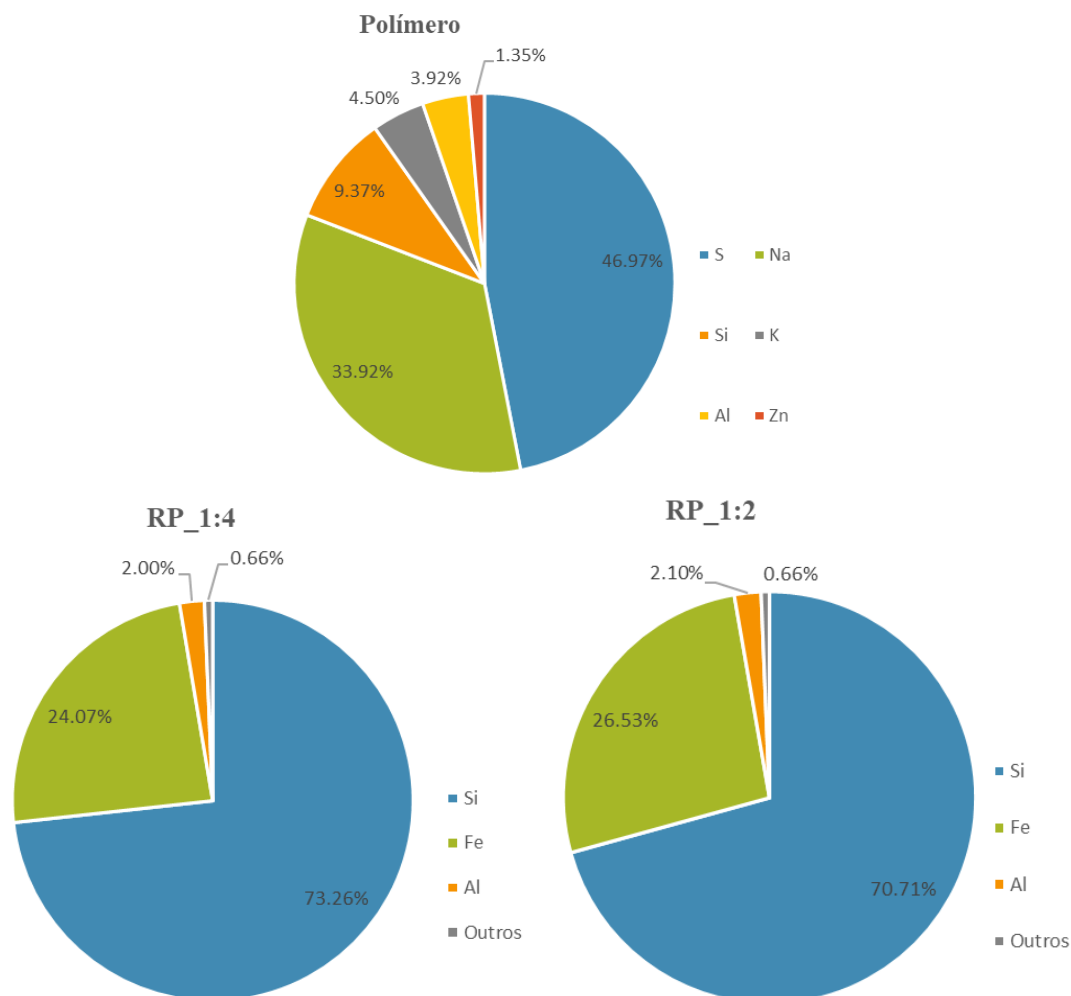


Figura 4.35. Gráficos dos elementos químicos encontrados no ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-x realizados em polímero puro e composto rejeito-polímero com solução de 1:4 e solução de 1:2.

Nos resultados obtidos na análise dos compostos rejeito-polímero com 1:4 de solução e 1:2 respectivamente, foi identificado principalmente silício, alumínio e ferro como elementos químicos encontrados em maior proporção. Nota-se que os elementos químicos encontrados foram os mesmos, o que pode-se dizer não haver uma alteração química, na ação do polímero com o rejeito de minério de ferro estudado.

Com a análise realizada, pode-se concluir que a estabilização obtida quando insere-se a solução polimérica ao rejeito, é uma estabilização química devido existir a ação de um elemento químico em contato com o rejeito, mas a ação do polímero atuando no comportamento mecânico do rejeito é física.

4.4.2. ANÁLISE ELEMENTAR DE CHN

O ensaio de análise elementar CHN realizado em amostras com material líquido visa a obtenção da porcentagem desses elementos químicos existentes nos materiais, principalmente nos poliméricos.

Na Figura 4.36 está representado um gráfico com a porcentagem de carbono (C), nitrogênio (N) e hidrogênio (H) existente na amostra de polímero.

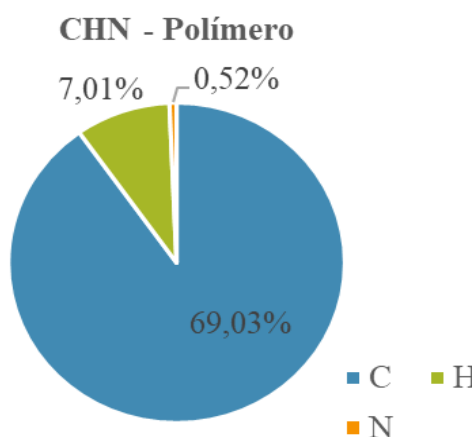


Figura 4.36. CHN do polímero

Através da análise de CHN verifica-se que a amostra possui grande quantidade de carbono e o restante é composto de hidrogênio, pois o nitrogênio praticamente inexistente na amostra.

Vale ressaltar que os polímeros são monômeros constituídos desses dois elementos. Portanto, o material analisado, é constituído basicamente desses dois elementos, mostra-se assim, que em contato com a natureza não gera nenhum dano. Os elementos identificados no ensaio de espectrometria não estão presentes na cadeia polimérica em si, mas advindos dos processos para a formação desse polímero

4.4.3. ANÁLISE DO LIXIVIADO

Ressalta-se que a água ao entrar em contato com o compósito o infiltrará e carreará a possível contaminação, processo chamado de lixiviação. Essa água foi recolhida e analisada quimicamente.

A Tabela 4.20 apresenta os valores dos elementos que ,em excesso, no lixiviado, tornam-se perigosos para contaminação da flora, fauna e de humanos, assim como outros elementos identificados em análises adicionais realizadas.

Tabela 4.20. Resultado das análises do lixiviado dos compósitos

Elementos	Valores
pH	8,94
Nitrogênio Total (mg/L)	1,98
Ferro (mg/L)	0,1554
Cobre (mg/L)	<0,1000
Manganês (mg/L)	0,7505
Alumínio (mg/L)	<0,0018

Avaliando os dados do lixiviado, por meio da resolução nº 420/2009 do Nacional Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que determina valores máximos permitidos e orientadores para solo e para águas subterrâneas, os valores máximos permitidos (VMP) de cobre dissolvido em águas subterrâneas é 2 mg/L e do compósito rejeito-polímero ficou com valores inferiores (0,1 mg/L).

Outro elemento descrito na norma é o alumínio, sendo seu VMP de 3,5 mg/L, o valor do compósito é inferior a 1 (0,0018 mg/L), ao estabelecido em norma.

O último elemento citado na resolução é o manganês, cujo VMP é de 0,4 mg/L existindo não coerência com o valor encontrado para o compósito, pois este foi encontrado em maior quantidade. Contudo, o VMP do manganês está ligado a risco à saúde humana no seu consumo, não à contaminação direta dos elementos naturais.

Tratando o lixiviado como um efluente de uma fonte poluidora, utiliza-se a resolução CONAMA 430, na seção II no artigo 16º, em que há a determinação das condições e padrões de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora diretamente no corpo receptor.

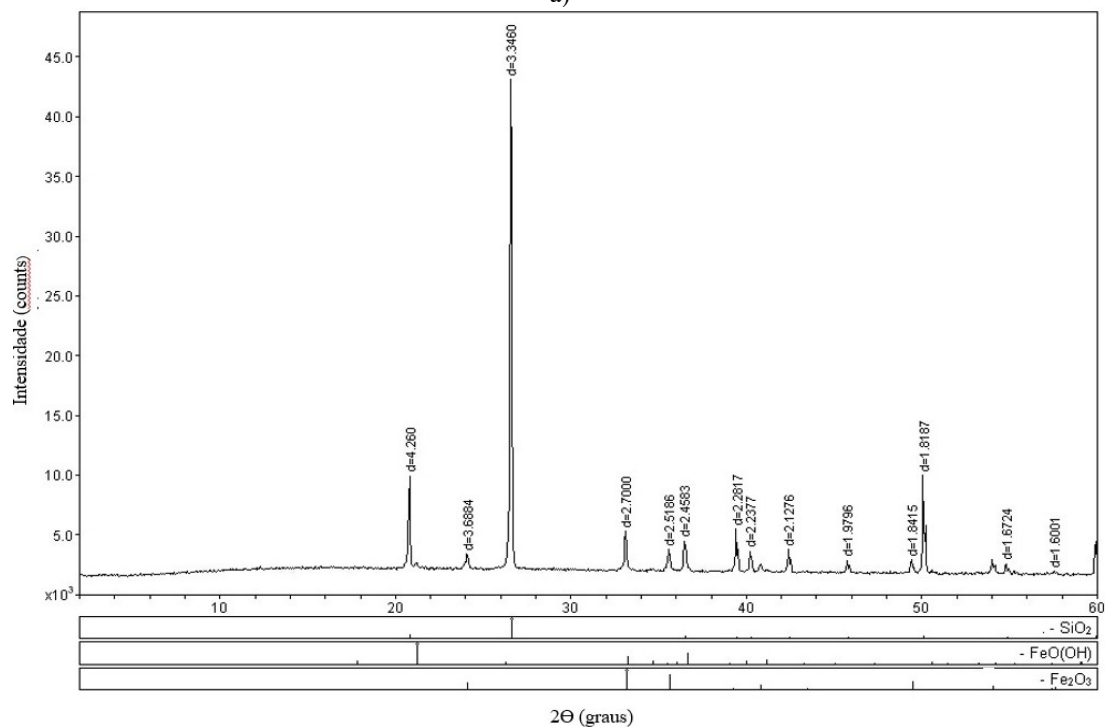
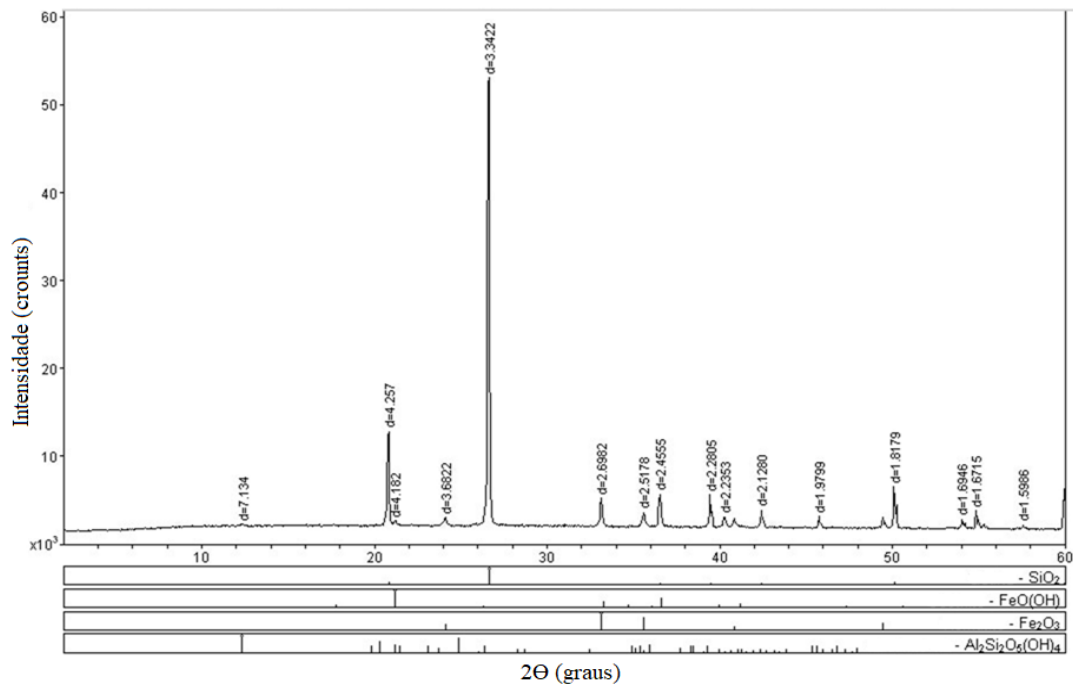
Assim, ao se analisar todos elementos de ambos lixiviados pode-se, de acordo com a resolução, ter condição de lançamento direto corpo hídrico. A NBR 10.004 (ABNT, 2004) estabelece normativas de resíduos sólidos. No anexo F estabelece os valores máximos de concentração obtido em ensaios de lixiviado. O VMP de todos elementos analisados ficaram dentro dos valores prescritos pela norma.

Considerando a aplicação do polímero ao rejeito com a finalidade de estabilização, mesmo que este seja aplicado em uma área de preservação ambiental, não haveria contaminação junto ao lençol freático, lagos etc.

4.5. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA-ESTRUTURAL

4.5.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A realização do ensaio de DRX ocorreu para verificar se a inserção da solução polimérica altera a composição dos minerais já existentes. Na Figura 4.37 é apresentado o DRX do rejeito puro e composto rejeito-polímero.



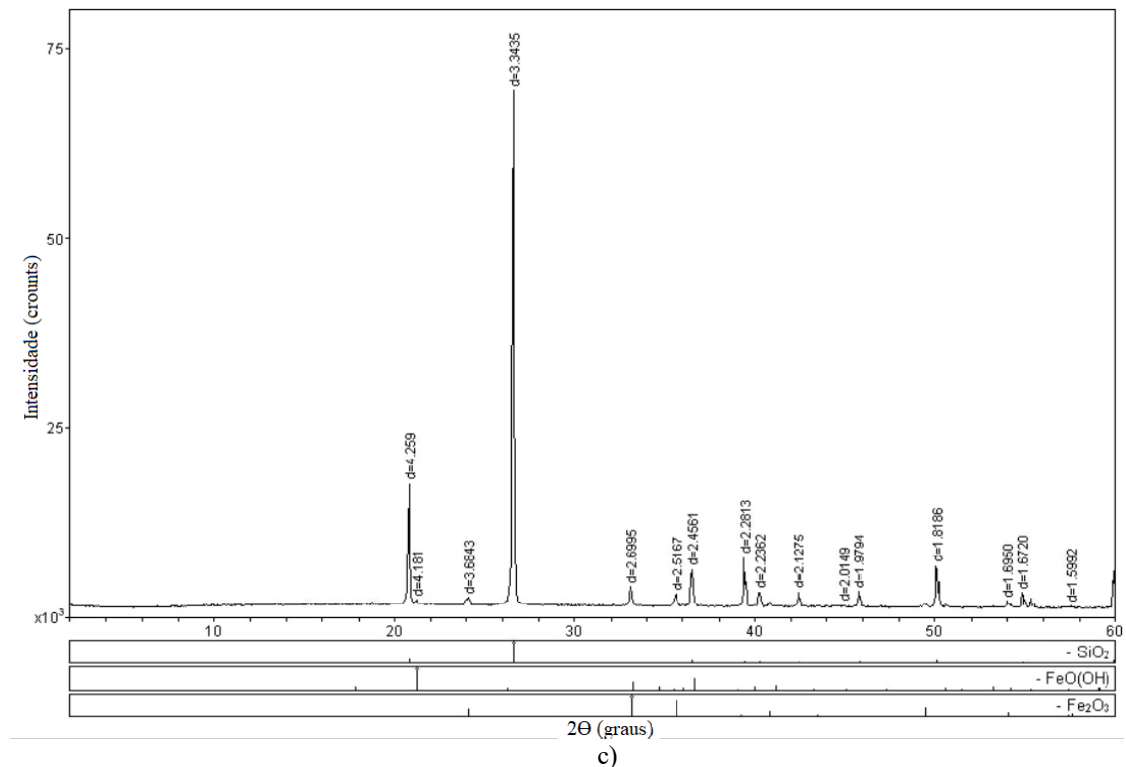


Figura 4.37. Difratoograma a) rejeito de minério de ferro puro; b) compósito rejeito polímero com 1:4 de solução e c) compósito rejeito-polímero com 1:2 de solução.

Por meio da análise de fase por difratometria de Raios-X, Figura 4.37 a), é possível constatar que o rejeito de minério de ferro estudado, independente da inserção do polímero, é composto basicamente por minerais de quartzo (SiO_2), goetita (FeO(OH)), hematita (Fe_2O_3), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), e outros minerais em proporções menores.

Pode-se observar que no rejeito de minério de ferro, a sílica é o componente químico mais encontrado e o mineral característico mais abundante deste componente é o quartzo, produto das rochas que apreendem o minério de ferro. A porcentagem de óxido férrico é o segundo componente mais abundante, e o mineral característico é a hematita (Fe_2O_3), mostrando assim ser um rejeito de minério de ferro.

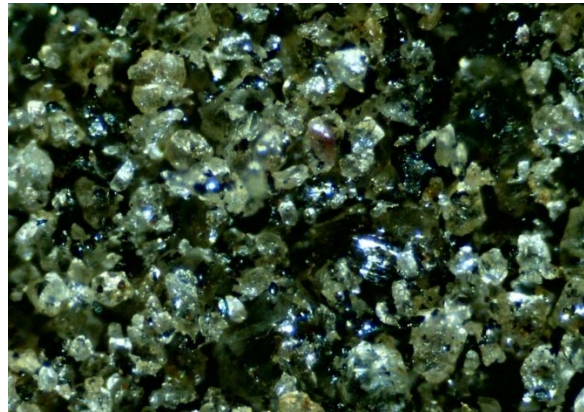
Observa-se que no difratograma referente ao compósito, Figura 4.37 b) e c), em ambas dosagens 1:4 e 1:2 de solução polimérica, respectivamente, houve um aumento da proporção do mineral hematita. Vale ressaltar que a hematita é conhecida pela sua fina textura e como agente cimentante para formação de agregados. Acredita-se que o aumento da hematita é ocasionado na verdade pela presença do polímero na matriz, em formato nodular e como agente cimentante dos grãos, que possui propriedades semelhantes à hematita.

A caulinita foi o mineral que não foi identificado na difratometria após a inserção de polímero, lembrando que tal fato não caracteriza a inexistência do mineral, mas a redução de

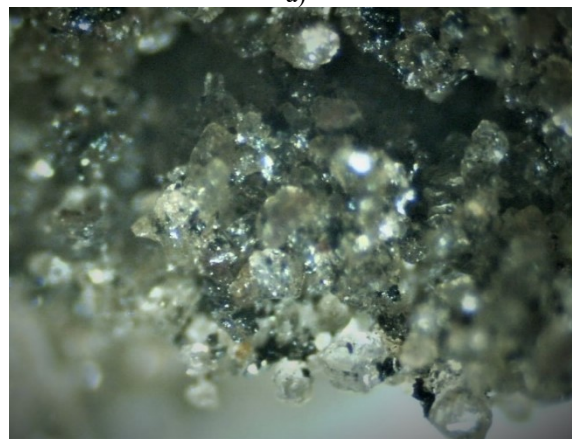
sua proporção na matriz após a inserção da solução polimérica. Consta-se que independente da proporção do polímero, os minerais identificados foram os mesmos.

4.6. MICRÓSCOPIA ÓPTICA

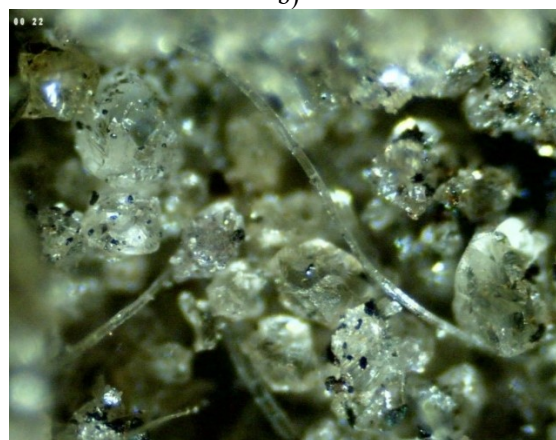
Na Figura 4.38 mostram-se imagens obtidas por microscopia ótica do rejeito puro e dos compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra com solução polimérica de 1:4.



a)



b)

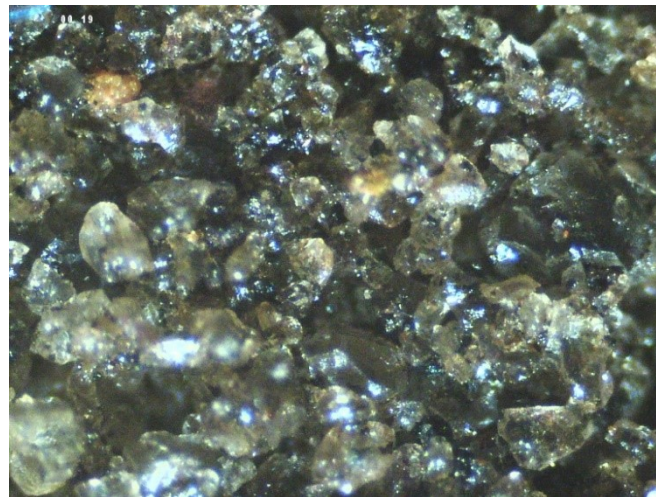


c)

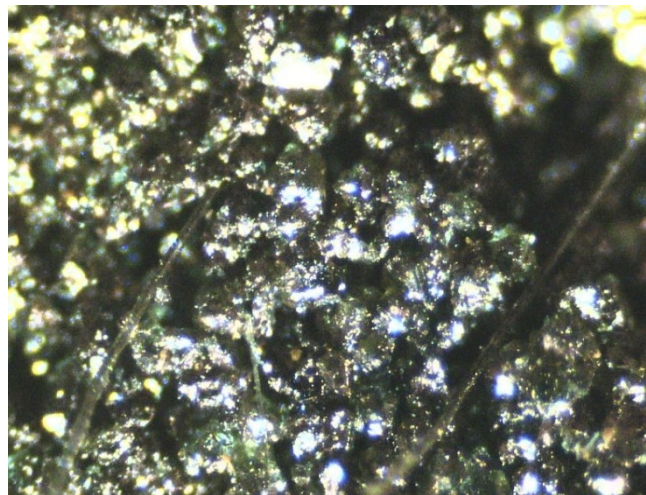
Figura 4.38. Imagens obtidas por microscopia ótica com aumento de 40 x a) rejeito puro, b) compósito rejeito-polímero, c) rejeito-polímero-fibra.

Na Figura 4.38 (a) apresenta-se o rejeito de minério de ferro, em seu estado puro na imagem pode-se observar grãos mais escuros e outros transparentes, provavelmente hematita e quartzo respectivamente, além de espaços vazios entre os grãos de minério, grãos de diversos tamanhos e superfície mais irregular. Na imagem (b) já se percebe a união dos grãos quando adiciona-se a solução polimérica de 1:4, reduzindo os vazios existentes, nota-se uma película envolvendo os grãos e um aspecto mais reluzente. Na imagem (c) pode-se perceber a fibra de polipropileno entre os grãos, os entrelaçando e preenchendo os vazios, nota-se ela com aspecto reluzente o mesmo aspecto presente nos grãos, pois a solução polimérica também aderiu nas fibras funcionando como espécie de cola, aproximando os grãos e as fibras.

A Figura 4.39 apresenta as imagens obtidas por microscopia óptica dos compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra com solução polimérica de 1:2.



a)



b)

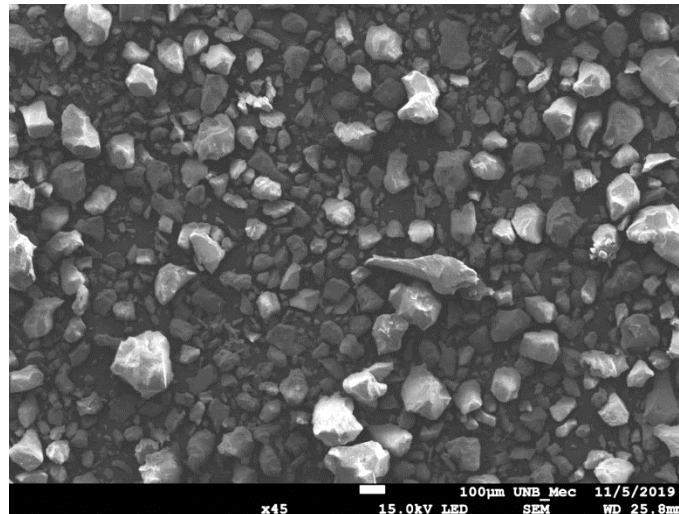
Figura 4.39. Imagens obtidas por microscopia óptica com aumento de 40 x a) compósito rejeito-polímero, b) rejeito-polímero-fibra.

A Figura 4.39 a) apresenta o compósito rejeito-polímero com solução de 1:2 através da imagem pode-se notar uma maior a união dos grãos, quando comparada a Figura 4.38 b), imagens com 1:4 de solução polimérica e uma redução ainda menor dos vazios existentes, além de notarmos que a película envolvendo os grãos possui um aspecto ainda mais reluzente. Na Figura b) nota-se os grãos mais entrelaçados e a fibra atuando nos vazios existentes, porém com espaços vazios ainda menores que a Figura 4.38 c).

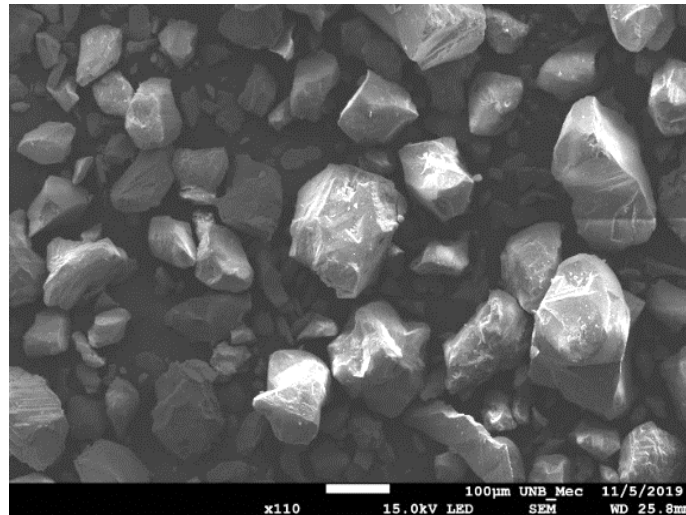
4.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Na Figura 4.40, por meio do uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a caracterização microscópica, é possível observar a distribuição dos vazios no rejeito de minério de ferro estudado na forma pura.

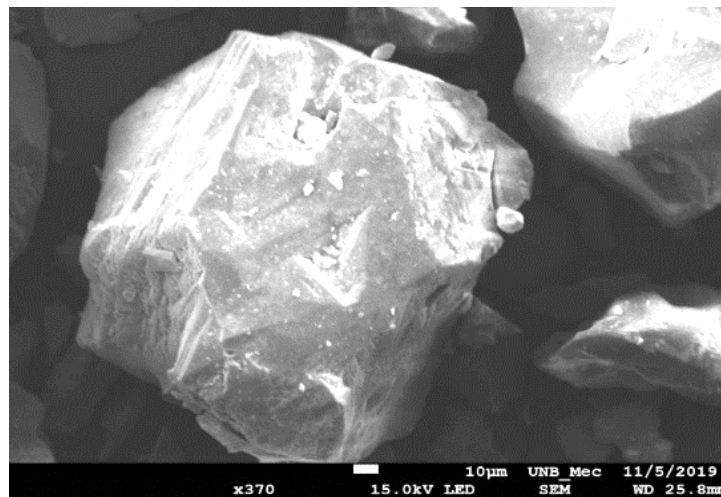
Observa-se pelas Figura 4.40 que os grãos são soltos e com diversos tamanhos. Não se observa algum elemento que una os grãos, os menores ficam próximo dos maiores, como se ocupassem os espaços vazios, conforme pode-se ver na Figura 4.40 a). Na Figura 4.40 b) observa-se em uma faixa de variação menor os vazios entre os grãos, na Figura 4.40 c) nota-se o vazio existente ao redor do grão e sua superfície mais irregular.



a)



b)

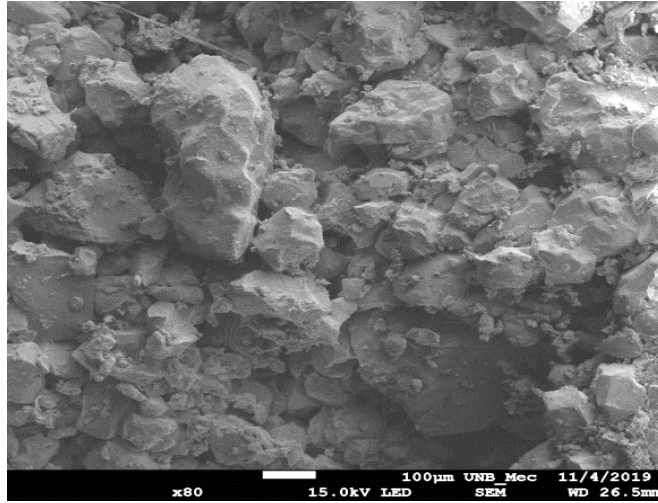


c)

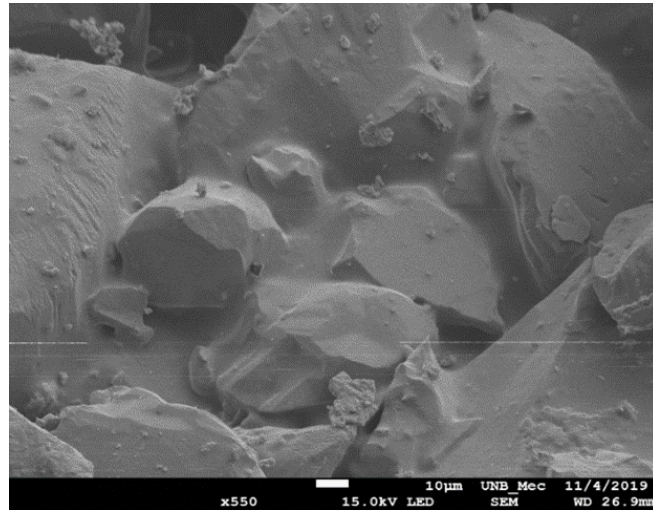
Figura 4.40. MEV a) vista geral dos grãos de minério de com aumento de 45 x, b) grãos do rejeito puro aumento 110 x e c) superfície do grão com aumento de 370 x

Na Figura 4.41 por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a caracterização microscópica, é possível observar a distribuição dos vazios no rejeito de minério de ferro estudado após a inserção da solução de polímero de 1:4.

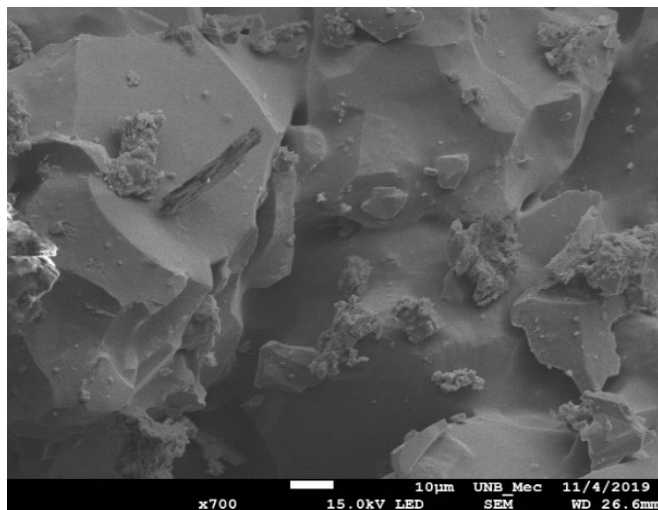
Na Figura 4.41 a) pode-se verificar que após a inserção da solução polimérica há uma redução dos vazios havendo uma união entre os grãos, através da Figura 4.41 b) percebe-se melhor essa união e a superfície dos grãos com uma película deixando-o mais liso. Em certos grãos não se observa seus limites, Figura 4.41 c), o que se vê é uma união entre as partículas. Acredita-se que essas uniões e meniscos advêm do acréscimo do polímero e, com o tempo de cura, fica externa aos grãos os unindo e causando a cimentação entre partículas.



a)



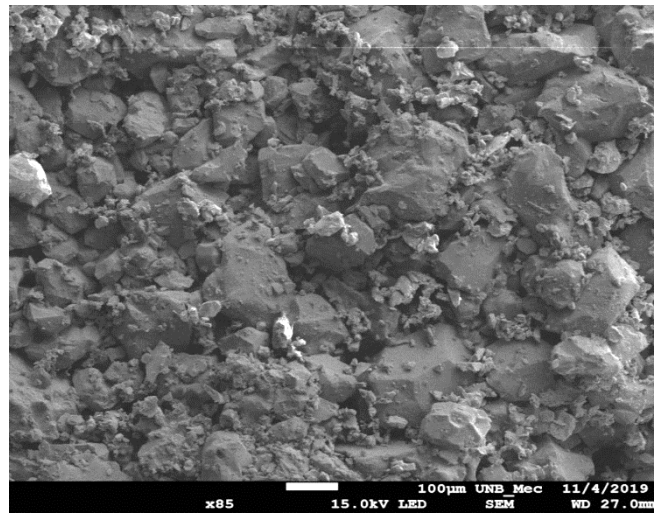
b)



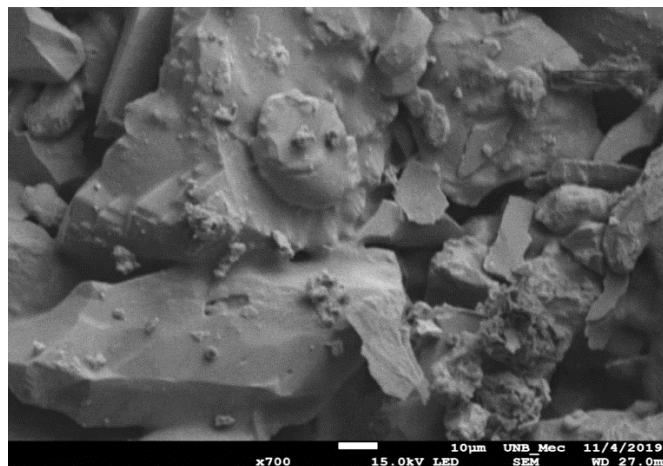
c)

Figura 4.41. MEV a) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 80 x b) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 700 x e c) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 550 x.

Na Figura 4.42, apresenta-se as imagens obtidas pelo MEV do rejeito de minério com inserção da solução polimérica de 1:2.



a)

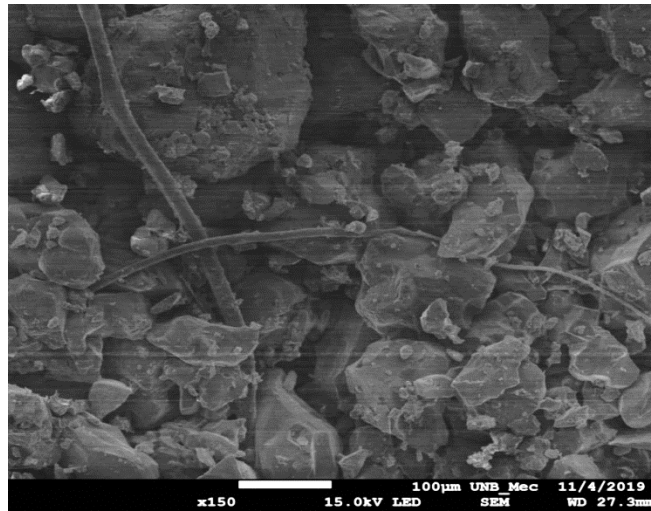


b)

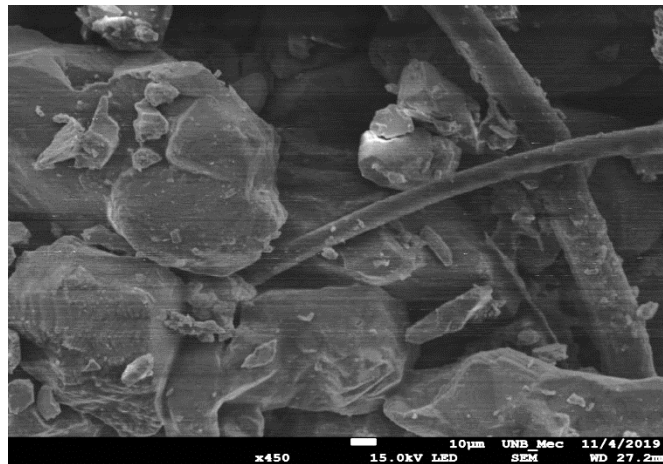
Figura 4.42. MEV a) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 85 x e b) grãos do compósito rejeito-polímero com aumento 700 x.

Pode-se observar na Figura 4.42 a) a vista geral dos grãos do rejeito acrescido da solução polimérica de 1:2, nota-se que os grãos de rejeito aparentam estar ainda mais unidos e percebe-se camadas de grãos estão com aspecto cimentados em toda superfície. Na Figura 4.42 b) constata-se que essa união está maior, os grãos estão com a superfície mais espessa, uma maior quantidade de solução e um aspecto mais cimentado que havia com 1:4.

Na Figura 4.43, apresenta-se as imagens obtidas pelo MEV do rejeito de minério de ferro com inserção da solução polimérica de 1:4 e fibras de polipropileno.



a)

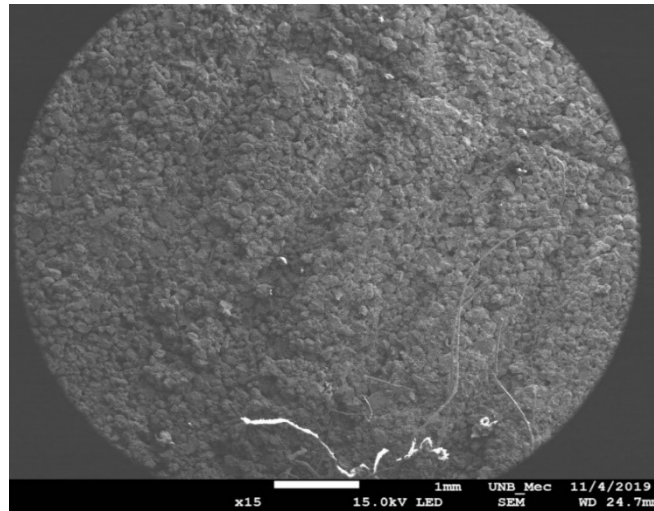


b)

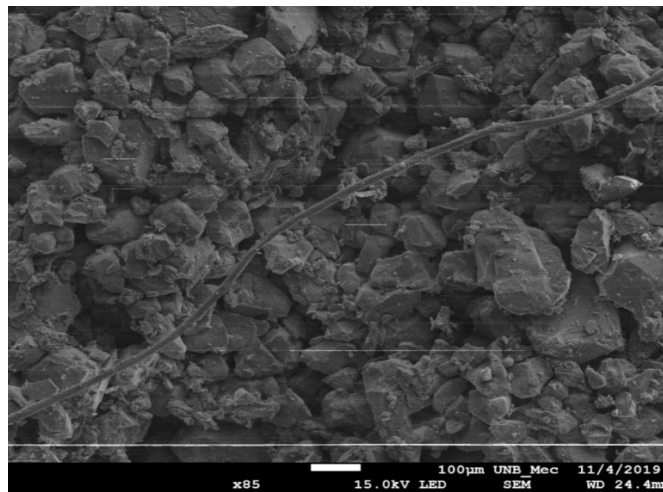
Figura 4.43. MEV a) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 150 x e b) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 450 x.

Observa-se na Figura 4.43 a) que há uma redução ainda maior dos vazios após a inserção das fibras, onde elas encaixam-se nos vazios existentes e aparentam entrelaçar os grãos aproximando-os ainda mais na Figura 4.43 b), é possível observar bem a fibra ocupando o vazio e notar os grãos bem próximos e os interstícios bem pequenos. A superfície do grão aparenta-se com aspecto cimentado e nota-se os grãos menores aparentemente colados na fibra, ou seja o polímero também adere-se na fibra possibilitando este aspecto de cola.

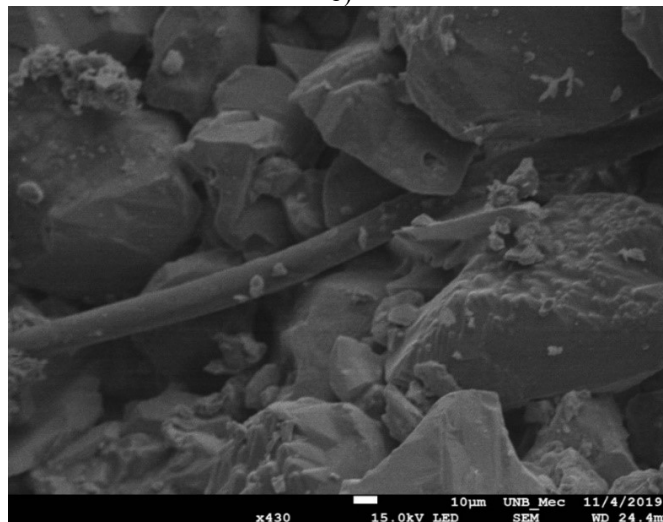
A Figura 4.44, exibe as imagens obtidas pelo MEV do rejeito de minério de ferro com inserção de 1:2 de solução polimérica juntamente com as fibras de polipropileno.



a)



b)



c)

Figura 4.44. MEV a) vista geral com aumento de 15x b) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 85 x e c) grãos do compósito rejeito-polímero-fibra com aumento 430 x.

Na Figura 4.44 a) observa-se os grãos bem unidos e nota-se que as partículas de rejeito estão, em toda superfície, unidas. Na Figura 4.44 b), observa-se a inserção da fibra e os grãos

com aspectos bem cimentados, unidos e com poucos interstícios, na Figura 4.44 c) ressalta-se o encaixe da fibra no interstício. A superfície dos grãos estão com aparência mais cimentada e há fragmentos dos grãos de rejeito na fibra, o que constata que o comportamento do polímero é semelhante a uma cola.

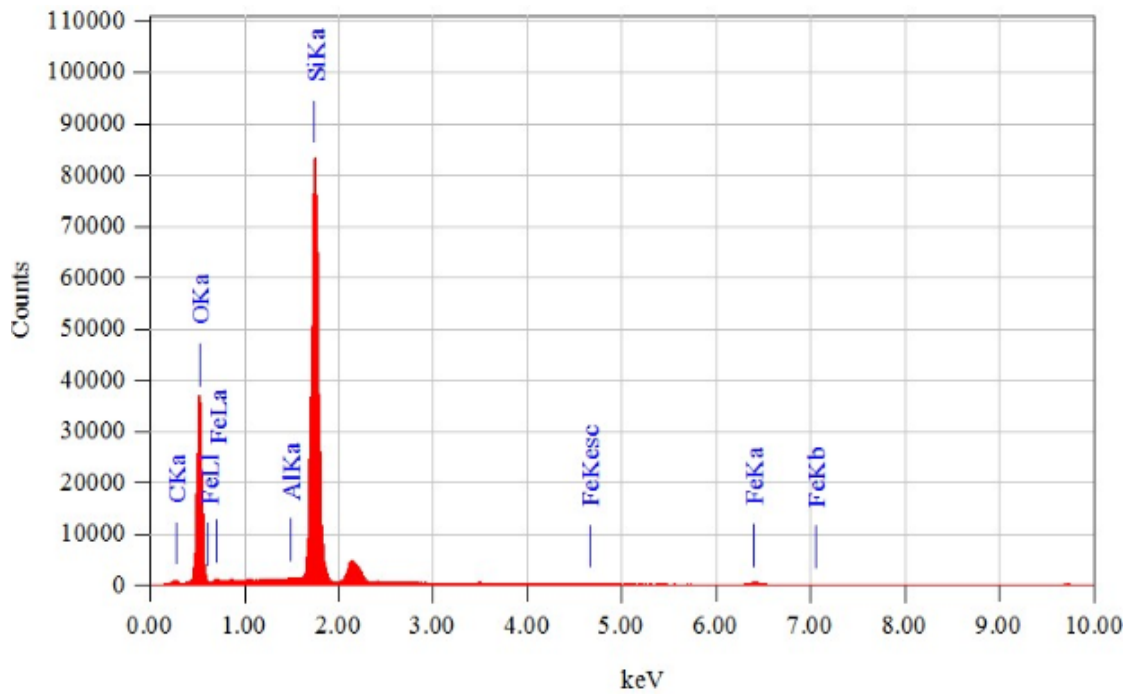
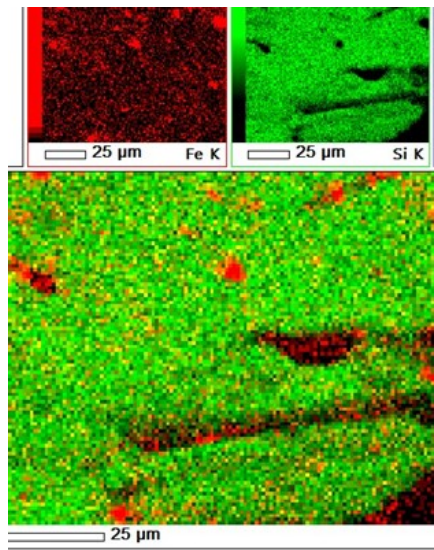
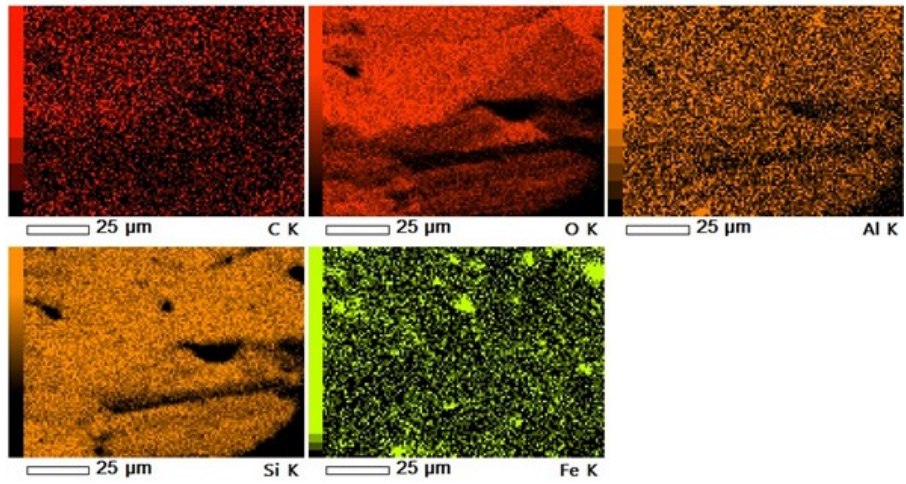
4.8. ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)

Na Figura 4.45 apresenta-se a análise química referente ao ensaio de EDS realizado no rejeito puro, no compósito rejeito-polímero e compósito rejeito-polímero-fibras, em ambas proporções. Os elementos químicos principais encontrados são pontuais não representam a análise química total do rejeito.

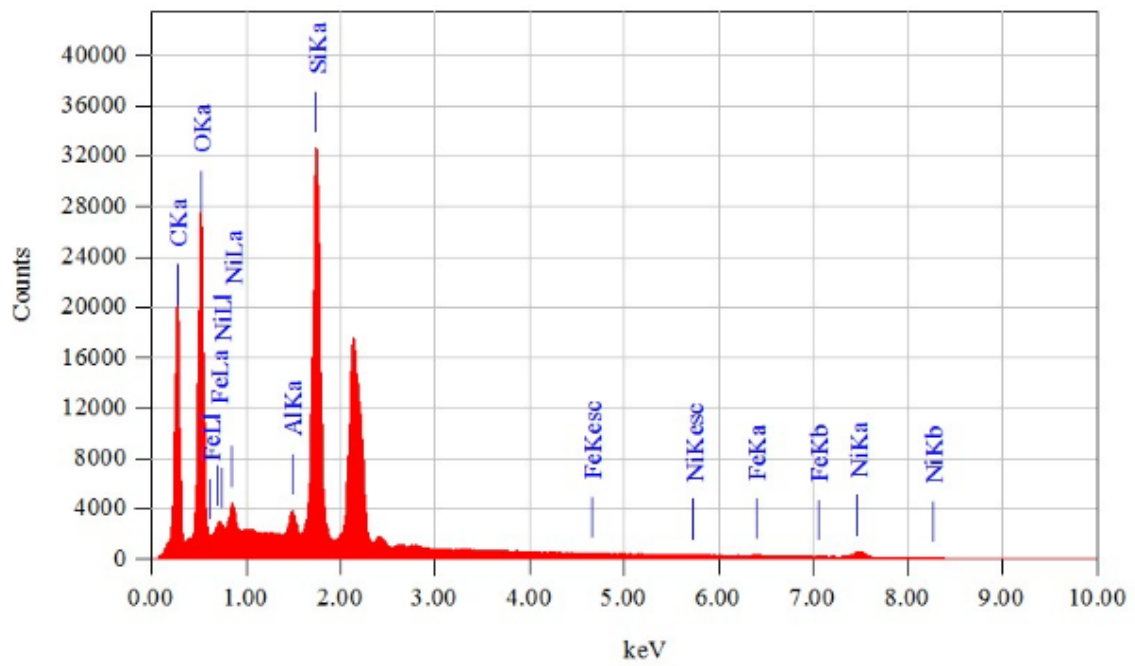
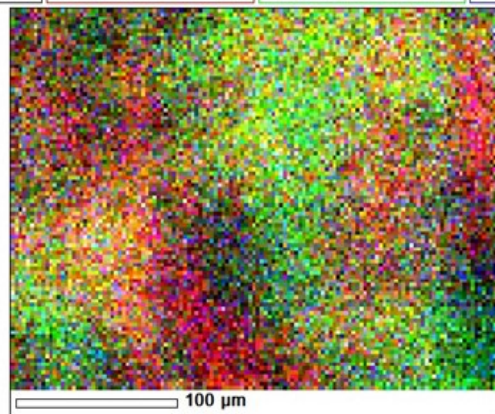
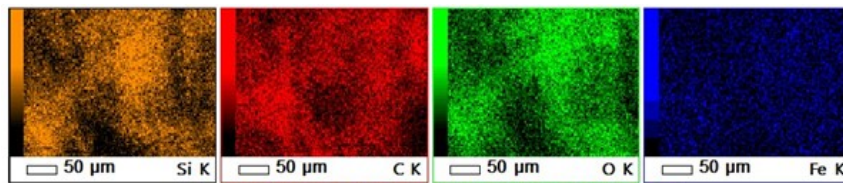
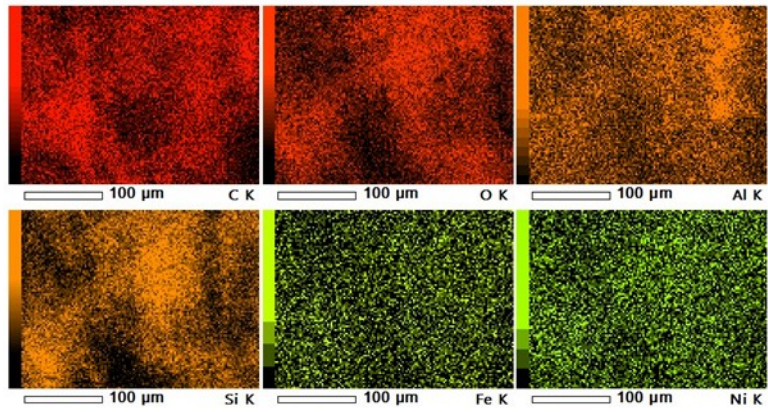
Os ensaios de EDS foram realizados para confirmar o que foi encontrado pelo ensaio de DRX. A grande diferença é que o DRX encontra elementos químicos na forma de minerais, para classifica-los geologicamente, enquanto o EDS faz varredura de elementos químicos constituintes na amostra. Assim, conclui-se que apesar da interpretação dos dados, há os mesmos elementos químicos.

Na Figura 4.45 (a) observa-se a presença principalmente de silício (Si), o teor de ferro também se destaca, além do carbono e oxigênio. A Figura 4.45 (b) apresenta um aumento na quantidade de carbono (C) e oxigênio (O) na Figura 4.45 (c) observa-se um aumento ainda maior desses elementos químicos e uma redução de silício, o que está relacionado ao aumento de polímero. Vale ressaltar, conforme já mencionado, o K não se refere a um elemento químico e sim, a camada em que ocorreu a ionização e as letras minúsculas à camada a partir da qual saiu o e- para preencher o vazio deixado pela ionização.

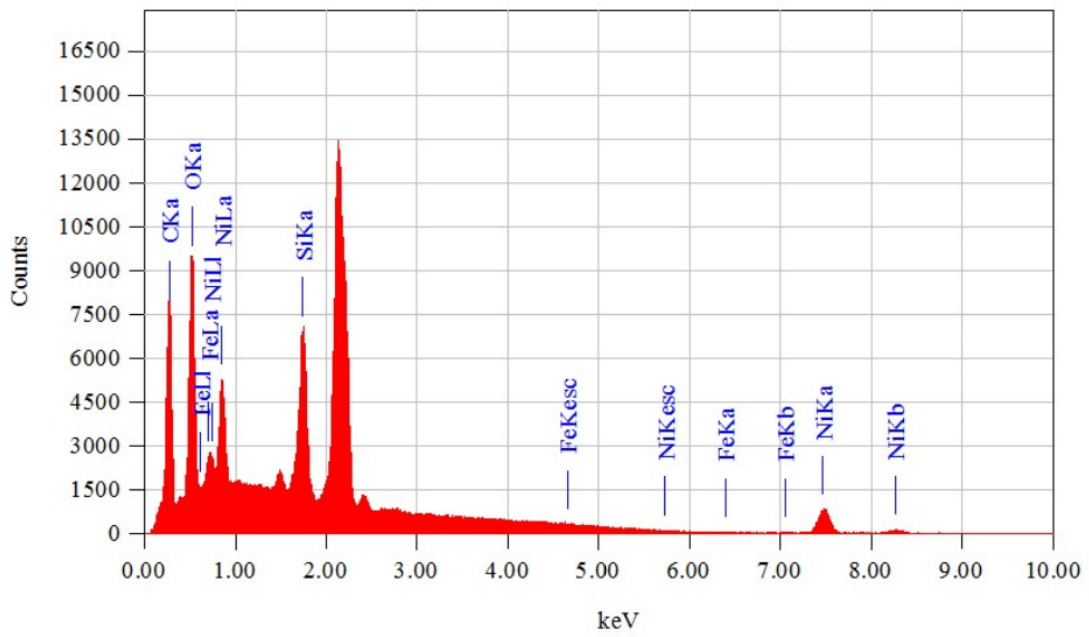
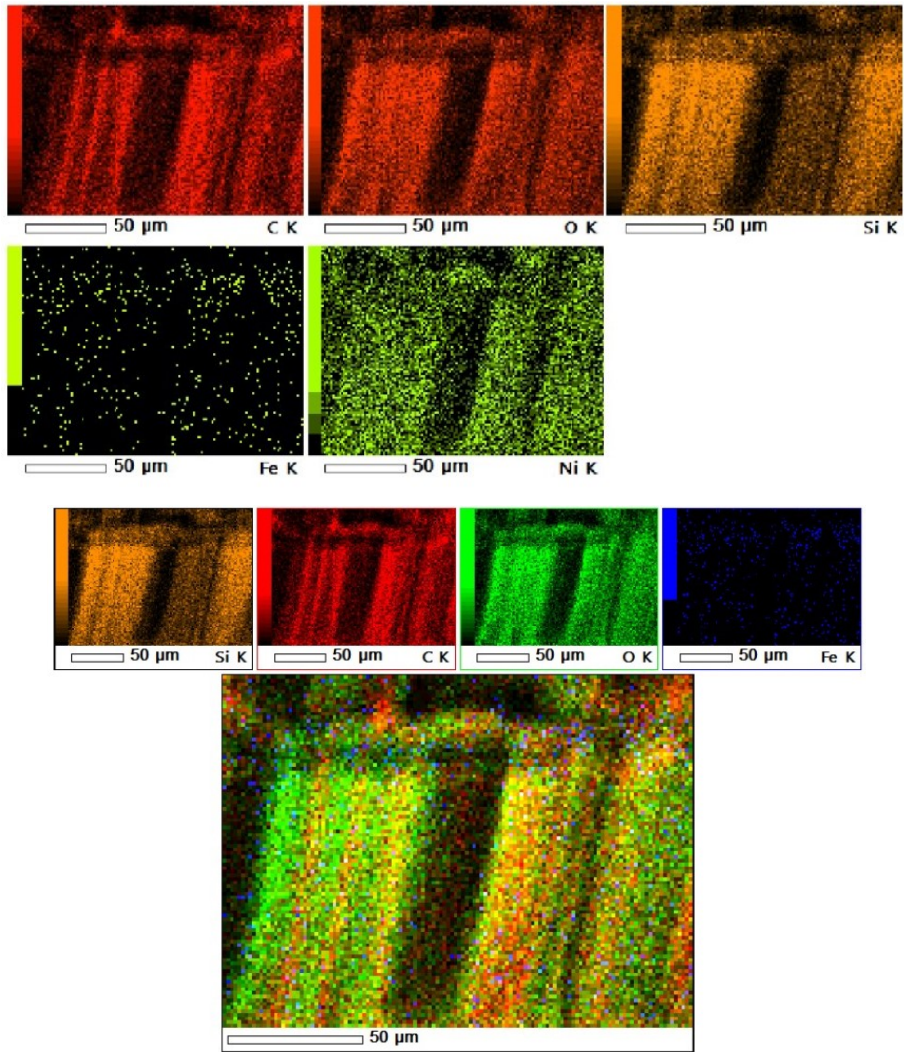
Verifica-se na Figura 4.45 (d) e (e), que a inserção da fibra não altera o comportamento referente a proporção da solução assim como, dos elementos químicos encontrados.



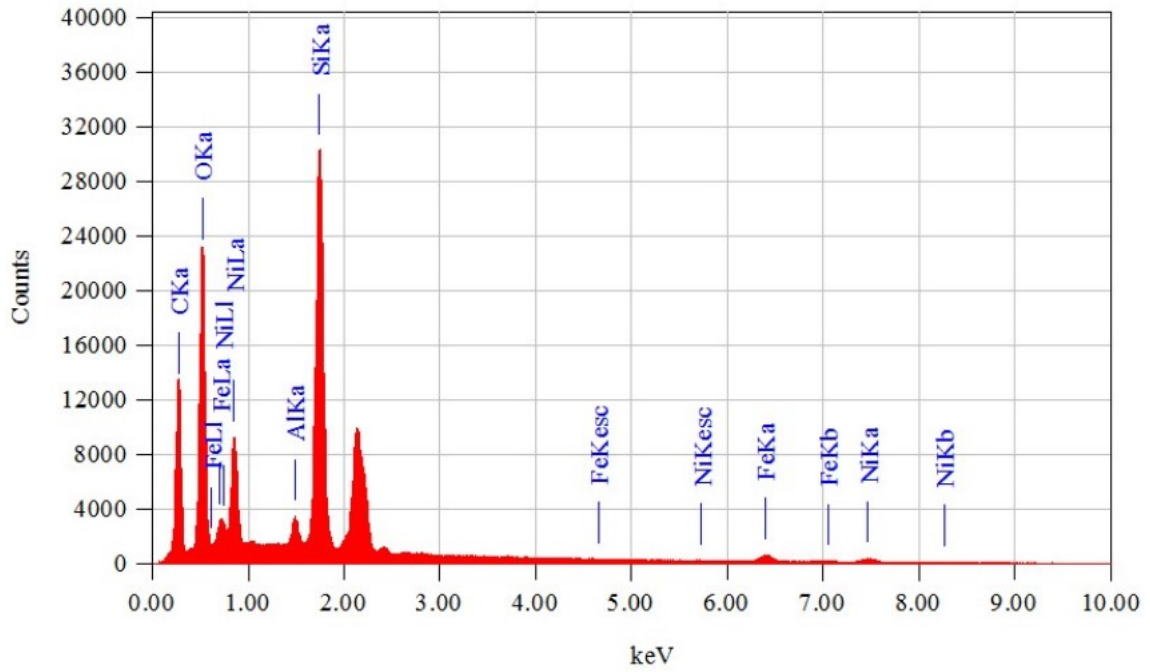
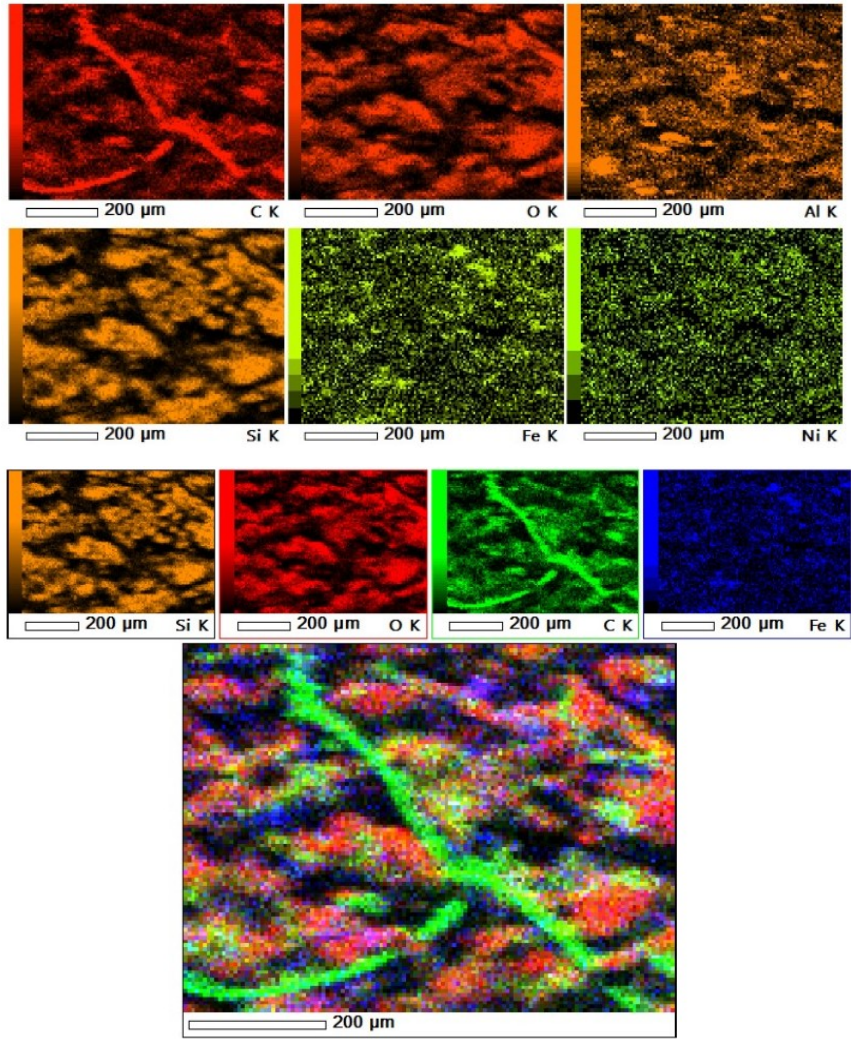
a)



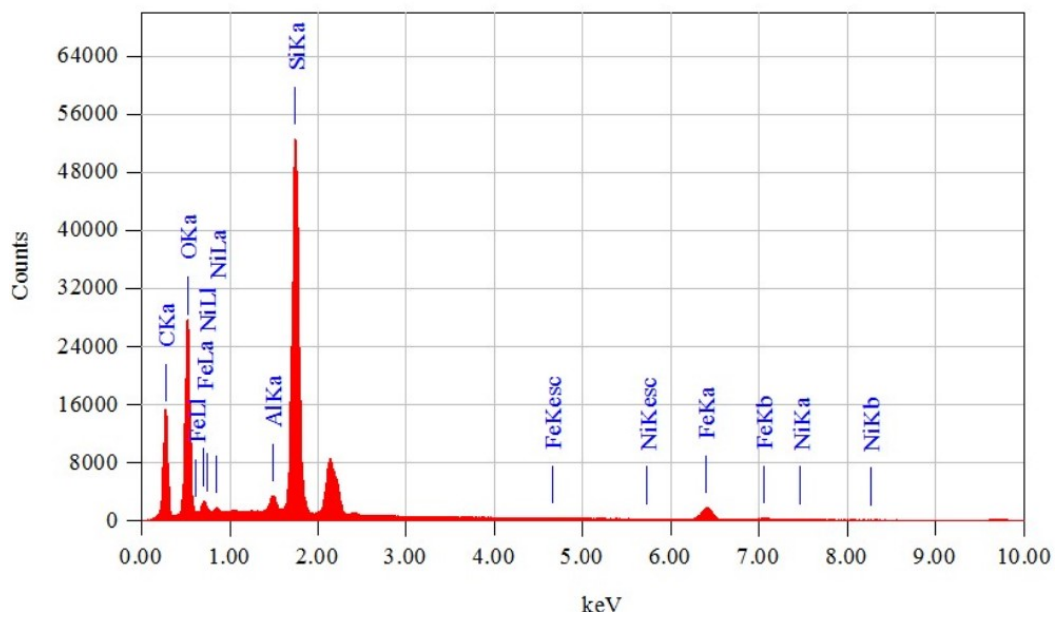
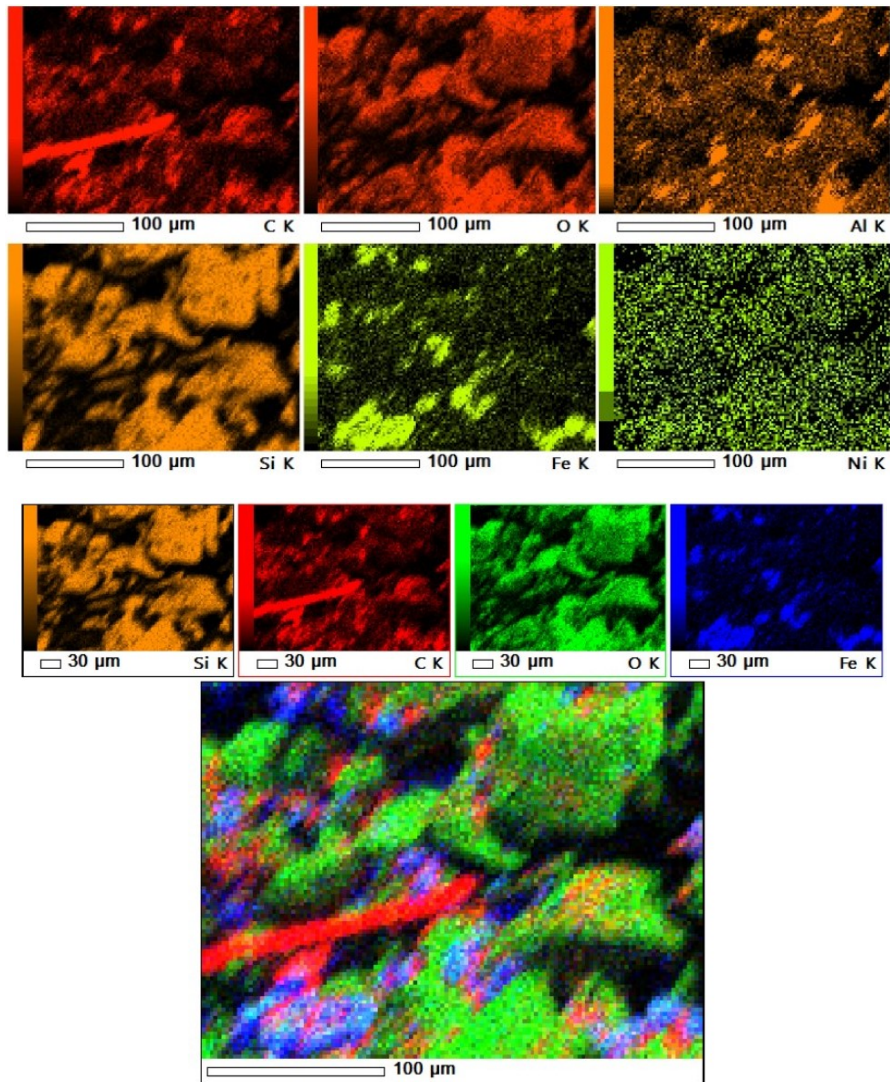
b)



c)



d)



e)

Figura 4.45. EDS (a) rejeito puro e (b) e (c) composto rejeito-polímero com 25 % e 50 % de solução polimérica, respectivamente; (d) e (e) composto rejeito-polímero-fibra com 25 % e 50 % de solução polimérica, respectivamente.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.4. CONCLUSÕES

De acordo com a pesquisa realizada, na avaliação do comportamento mecânico e ambiental de compósitos de rejeito de minério de ferro com a inserção de solução polimérica e fibras, conclui-se que:

- 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. Constatou-se que a inserção da solução polimérica 1:4 aumentou peso específico seco e reduziu umidade ótima, justificado pela ocupação da solução nos vazios existentes gerando uma maior umectação e união dos grãos. A solução 1:2 deixa o material com aspecto mais pastoso, reduzindo o peso específico seco e a umidade ótima;
- A inserção da solução polimérica, em ambas dosagens estudadas, mas principalmente para 1:2 adicionada ao rejeito de minério de ferro, mostrou-se viável, observando-se a melhoria dos parâmetros de resistência com o aumento do tempo de cura dos compósitos;
- Constata-se, por meio do ensaio de compressão simples, que a solução polimérica 1:2 apresenta uma resistência significativamente superior à de 1:4, para todos tempos de cura estudados;
- As curvas dos ensaios de compressão simples dos compósitos com fibra, para ambas dosagens, mostram que a fibra atua como reforço, não havendo um decréscimo das curvas;
- Analisando-se as curvas de cisalhamento dos compósitos rejeito-polímero observa-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,

- Para o comportamento das envoltórias de pico referente aos compósitos rejeito-polímero observa-se um aumento nos valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito, de acordo com o aumento do tempo de cura, para ambas dosagens da solução polimérica. Já para as envoltórias de tensão residual, para ambas soluções poliméricas, apresentam um aumento no valor do ângulo de atrito efetivo e a coesão aparente aumenta para maiores tempos de cura;
- Nos ensaios realizados no compósito rejeito-polímero em superfície polida, com solução polimérica de 1:4, observa-se que há uma maior resistência nos compósitos submetidos a maiores tensões normais, porém não houve uma alteração significativa na resistência com o tempo de cura. Os compósitos com solução polimérica de 1:2 apresentaram uma maior resistência, principalmente para maiores tensões de confinamento e maior tempo de cura;
- No comportamento referente ao compósito rejeito-polímero-fibra ensaiados com superfície polida, em ambas dosagens, observa-se que as fibras são solicitadas apresentando maiores resistência, indicando a atuação das fibras como reforço após o cisalhamento;
- Nas envoltórias de pico referente aos compósitos rejeito-polímero e rejeito-polímero-fibra observa-se um aumento nos parâmetros de resistência com o tempo de cura, sendo mais significativo para o intercepto coesivo, principalmente para a maior dosagem de solução polimérica;
- Nas envoltórias de tensão residual, para todos compósitos, observa-se um aumento significativo do intercepto coesivo, principalmente para a maior dosagem de solução polimérica e maior tempo de cura;
- A inserção de fibras de polipropileno juntamente com o polímero, apresentou viabilidade de sua inserção, pois atuou como reforço principalmente após haver o cisalhamento evitando um pós pico acentuado;
- O aumento da dosagem de solução polimérica elevou os parâmetros de resistência dos compósitos;
- O ensaio de superfície polida demonstrou que a inserção da solução polimérica continua atuando na fase residual dos compósitos;

- A resistência a tração diametral apresentou superior para a maior dosagem de solução polimérica;
- Todos os compósitos apresentaram melhoria dos valores de módulo de resiliência após inserção da solução polimérica, principalmente para a dosagem de 1:2;
- Avaliou-se 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;
- Todos os compósitos submetidos à dano por umidade induzida, apresentaram uma resistência superior a 50% de sua capacidade de carga;
- 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;
- 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;
- Percebe-se que a inserção de polímero, reduz a permeabilidade no rejeito, havendo redução dos vazios existentes e não houve expansão;
- Comparando-se as mesmas proporções de solução entre os compósitos, há uma redução da absorção de água para o compósito com solução 1:2 sem a inserção de fibras. Constata-se que a fibra absorve parte da umidade;
- Pelas análises química e ambientais observa-se 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. Com o aumento do tempo de cura, nos ensaios mecânicos, essa união dos grãos levou a uma melhoria dos valores de resistência dos compósitos;
- Conclui-se, por este estudo, que há viabilidade técnica para aplicação da solução polimérica, para ambas dosagens estudadas, em obras geotécnicas, como por exemplo em pavimentação, taludes e aterros. Para aplicação em obras de pavimentação, a solução polimérica 1:2 gerou melhores resultados, contudo, para aplicação em aterros e taludes, a solução 1:4 seria suficiente, tendo também proporcionado resultados satisfatórios.

Por fim, considera-se que o estudo realizado é de alta relevância e promissor na área de estabilização de rejeitos de mineração, devido à alta geração de rejeitos pelas atividades de mineração, no intuito de um aproveitamento total destes rejeitos, com aplicabilidade técnica do compósito solo-polímero em obras geotécnicas, a fim de conceder um fim mais nobre a este material, do ponto de vista técnico, ambiental e econômico.

5.5. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As seguintes recomendações podem ser feitas para futuras pesquisas:

- Avaliação de novas dosagens de polímero e maiores tempos de cura;
- Estudar o comportamento do polímero em outros tipos rejeitos de mineração;
- Avaliar a resistência pós pico do compósito com teores menores de fibra;
- Estudar o comportamento de compósitos rejeito-polímero à luz da mecânica da fratura;
- Analisar o comportamento e o desgaste do compósito quando submerso;

- Avaliar mediante ensaios triaxiais o efeito da poropressão na resistência do compósito;
- Desenvolver modelos numéricos para previsão do comportamento mecânico dos compósitos rejeito-polímero;
- Avaliar os compósitos rejeito-polímero em ensaios de grande escala ou pela construção de pistas experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, American Association of State Highway Transportation Officials (2017). T 307-99-UL: Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. Washington, USA, 41p.
- AASHTO, American Association of State Highway Transportation Officials (2019). T 324-19: Standard method of test for hamburg wheel-track testing of compacted asphalt mixtures. Washington, USA, 14p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). NBR 6508: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, Versão Corrigida: 1988, 13p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 4p
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 8p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos. Rio de Janeiro, Brasil, 12p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 16p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) NBR 10004 : Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, Brasil, 74p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 13555: Solo-Cimento – Determinação da absorção de água – Método de Ensaio Rio de Janeiro, Brasil, 1p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, Brasil, 5p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade Rio de Janeiro, Brasil, 3 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, Brasil, 9p.
- AG-TERRA. (2005). Apresentação Terrafix. Minas Gerais, 2005. Relatório.

- AHMAD, F.; BATENI, F.; AZMI, M. (2010). Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles and Geomembranes*, (28): 93–99.
- AL WAHAB, R.; AL-QURNA, H. (1995). Fiber reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. In: *Proceedings of the GEOSYNTHETICS'95 CONFERENCE*. 2:433–466.
- ALMEIDA, G. B. O.; CASAGRANDE, M. D. T ; CALVANCANTE, E. H. (2016) Avaliação da resistência à compressão simples de misturas de solo e escória de cobre aditivadas com cimento portland aplicadas à pavimentação, 18º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 7p.
- ANDERSLAND, O.; KATTAK, A. (1979). Shear strength of kaolinite/fiber soil mixtures. In: *International Conference on Soil Reinforcement*. 11–16p.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (2011). D3080: Standard test method for direct shear test os soil under consolidated drained conditions. Pennsylvania, USA, 9p.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (2016). D6836: Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. Pennsylvania, USA, 22p.
- ARAUJO, C. B. (2006). Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 133p.
- AKCELRUD, L. (2007). *Fundamentos da Ciência dos Polímeros*. Editora Manole Ltda, São Paulo, SP, 288p.
- BAGHINI, 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. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9:321-336.
- BARRETO, T. M.; REPSOLD, L. L. & CASAGRANDE, M. D. T. (2018). Melhoria de solos arenosos com polímeros, 19º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Salvador, Bahia, 11p.
- BARBOSA, M.C., SANTOS, A.C.B. (2003). Aspectos geotécnicos e ambientais associados a rejeitos finos com elevado teor de água inicial; Conferência, Proc. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO, Porto Alegre, RS, 339-363p.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2010) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 504p.
- BELCHIOR, I. M. R. M., CASAGRANDE. M. D. T., ZORNBERG. J. G. (2017). Swelling Behavior Evaluation of a Lime-Treated Expansive Soil through Centrifuge Test. *Journal Materials Civil Engineering*, 29(12):04017240.

- BHERING, I.C. (2006). Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 143p.
- BLASS, A. (1985). Processamento de Polímeros. Série didática. Editorial da UFSC, 1985.
- BOLAÑOS, R. E. Z. (2013). Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 143p.
- BOSCOV, M. E. G. (2008). Geotecnia ambiental. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 248p.
- BRAZETTI, R. (1998). Considerações sobre a influência de distintos aditivos orgânicos nas características micromorfológicas, mineralógicas, físicas, mecânicas e hidráulicas de um latossolo roxo. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 275p
- BUENO, B. S. LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO, N.J (1996). Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: International Symposium on Environmental Geotechnology. 3, p. 878–884.
- BUCHANAM, S. J. (1952) Military Application of Soil Stabilization. Proceedings of the Conference on Soil Stabilization. Massachusetts.
- BUDINSKI, K.G. (1996) Engineering materials, properties and selection. 5ed. New Jersey: Prentice Hall International, 653p.
- CALLISTER, W. D. Jr. (2006). Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Abordagem Integrada. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 520 p.
- 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.
- CANEVAROLO JR., S. V. (2006). Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. Artliber Editora, SP. pp. 21-30; pp. 42-46; pp.120-121.
- CAO, S., YILMAZ, E., SONG, W. (2019). Fiber type effect on strength, toughness and microstructure of early age cemented tailings backfill Shuai. Construction and Building Materials. 223: 44-54.
- CASAGRANDE, M. (2001). Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 109p.
- CASAGRANDE, M.D.T.; CONSOLI, N. (2002). Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, 25(3):223-230.

- CASAGRANDE, M. D. T. (2005). Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 219p.
- COELHO E.F. (2008). Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, MG, 100p.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA Resolução N° 420. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, Brazil, 2009.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA Resolução N° 430. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, Brazil, 2005.
- CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; TOMHÉ, A; DALLA ROSA e FAHEY. P (2009) Effect of relative density on plate loading tests on fiber-reinforced sand. *Geotecnique* 59(5):471-476.
- CONSOLI, N. C., DALLA ROSA, A., SALDANHA, R. B. (2011). Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 23(4):432-440.
- CONSOLI, N.; HEINECK, K. S.; CASAGRANDE, M.D.T.; AND COOP, M. R. (2007) Shear strength behavior of fiber-reinforced sand considering triaxial tests under distinct stress paths. *J Geotech Geoenviron Eng*, 133(11): 1466-1469.
- CONSOLI, N.C.; MONTARDO, J.P.; PRIETTO, P.D.M.; PASA, G. (2002) Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, 128(6): 462-472.
- 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.
- CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. (1999). The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. *Ground Improvement*, London, 3(1):21–30.
- CULLITY, B.D., STOCK, S.R. (2014). *Elements of X-Ray Diffraction*. Pearson, England, 649p.
- DAVIDSON, D.T.; HANDY, R.L. (1960). *Highway Engineering Handdbook, Soil stabilization*. McGraw-Hill, New York. pp.108-133.
- DEDAVID, B.A., GOMES, C.I. & MACHADO, G. (2007). *Microscopia Eletrônica de Varredura, Aplicações e Preparação das Amostras, Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores*. EDIPUCRS, Porto Alegre, RS, 60 p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL(DNPM). (2018). Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Brasília.
- DIAMBRA A., IBRAIM, E., MUIR WOOD D, RUSSELL A. R. (2010). Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and geomembranes* (28): 238-250.
- DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. (2015). Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale. *Geotechnique*, 65(4): 296–308.
- DIAB, A. A., NAJJAR, S.S., SADEK, S., TAHA, H, JAFFAL, H. ALAHMAD, M. (2018). Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay. *Soils and Foundations*, 58: 462-480.
- DIAS, C. R. C. D. (2004). Estudos de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 127p
- DNER, Departamento nacional de estradas de rodagem. (1994) 093: Solos. Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, Brasil, 4p.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2016). 172: Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Brasília, Brasil, 16p.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 135: Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 13p.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 136: Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 9p.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 180: Mistura Asfáltica – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, Brasil, 9p.
- DONATO, M. CERATTI, J. A. P., FOPPA, D. CONSOLI, N.C. (2004). Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Soils and Rocks* 27(2):161–179.
- ELDESOUKY, H., MORSY, M., MANSOUR, M. (2016). Fiber-reinforced sand strength and dilation characteristics. *Ain Shams Engineering Journal*. 7(2): 517-526.
- ENDO, T., TSURUTA, T. (1969). The Effect of Tree Roots upon the Shearing Strength of Soil. Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, Tokyo, Japan; 18: 168-179.
- FATANI, M.; BAUER, G.; AL-JOULANI, N.(1991). Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic fibers. *Geotechnical Testing Journal*, 14(1):78–87.

- FESTUGATO, L. (2008). Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 146p.
- FESTUGATO, L., CONSOLI, N.C., FOURIE, A. (2015). Cyclic Shear Behaviour of Fibre Reinforced Mine Tailings. *Geosynthetics International*, 22(2): 196-206.
- FEUERHARMEL, M. (2000). Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 152p.
- FORCELINI, M.; GARBIN, G. R.; FARO, G. P; CONSOLI, N. C. (2016). Mechanical behavior of soil cement blends with osorio sand. *Procedia Engineering*, 143:75–81.
- FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- FLOSS, M.F.; REZENDE, I.M; FERREIRA, P.H.G.; THOMÉ, A.; CONSOLI, N.C. (2016). Avaliação das resistências à compressão simples e tração de resíduo de ágata artificialmente cimentado. *Science & Engineering Journal*, 25(1):01-06.
- GARCIA, N. F.; VALDES, J. R. & CORTES, D. D. (2015). Strength characteristics of polymerbonded sands. *Géotechnique Letters*, 5(3):212–216.
- GHAVAMI, K.; TOLÊDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, 21(1):39–48.
- GIRARDELLO, V. (2010). Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 141p.
- GIRODO, A., (2005), *Minação. Projeto APA Sul, Estudos do Meio Físico*, Secretaria de Geologia, Minação e Transformação Mineral/ CPRM, Belo Horizonte, MG.
- 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.
- GRAY, D.; AL-REFAI, T. (1986). Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. 112(8):804–826.
- GRAY, H.; OHASHI, H. (1983) Mechanics of fiber reinforcement in sand. *J. of Geotech Eng ASCE*; 109: 335-353.
- GUIMARÃES, N. C., VALADÃO, G. E., PERES, A. E., 2012, “Filragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas”, *Revista Escola de Minas*, 65(4):543-548.

- HANNANT, L. (1994) Polymers and polymers composites. 2° J.M. ILLSTON. Construction materials: their nature and behavior, London: J.M. Illston/E & FN Spon, 359-403.
- HEINECK, K.S.; CONSOLI, N.C. (2002) Influência da adição de fibras na resistência última de solos. 12° Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. São Paulo: ABMS, 3(1):403-408.
- HEINECK, K. S. (2002). Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 275p.
- HOARE, D. (1979). Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibers. In: Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement. 1, p. 47-52.
- HOLLAWAY, L. (1994). Polymers and polymer composites. 2 ° Construction Materials; their nature and behavior. London: J. M. Illston /E. & F.N. Spon, 321-358.
- ILLSTON, J.M. (1994). 2° Construction materials; their nature and behavior. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 518p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). (2016). Gestão e Manejo de Rejeitos na Mineração. Brasília, 128 p.
- JAMEI, M.; VILLARD, P.; GUIRAS, H. (2013). Shear failure criterion based on experimental and modeling results for fiber-reinforced clay. International Journal of Geomechanics, ASCE, 13(6): 882-893.
- JIGHEH, H. S., BAGHERI, M., AMANI-GHADIM, A. R. (2019). Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils. Cold Regions Science and Technology. 157:187-195.
- JIMÉNEZ, F. E. P. (2014). Manual de Pavimentação, PROAS-CEPSA, CEPSA, Espanha, 3 ed., 176 p.
- KÉZDI, A. (1978) Stabilized Earth Roads. Developments in Geotechnical Engineering 19. Budapest, Elsevier, Akadémiai Kiadó, Hungary.
- KHATAMI, H. R.; O'KELLY, B. C. (2013). Improving Mechanical Properties of Sand Using Biopolymers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139:1402-1406.
- KHOEINI, S., DESSOUKY, S., APAGIANNAKIS, A.T., WALUBITA, L. F., TAHAMI, S. A., GHOLIKHANI. M. (2019). Using polymer-based mixes as alternative to asphalt mixes in low volume roads. Construction and Building Materials, 204: 177-183.
- KITTEL, C. (1953). Introction to Solid State Physis, 7 ed., Canadá.

- KLINSKY, L. M. G., BARDINI, V. S. S.; FABBRI, G. T. P. (2014). Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. *Transportes*, 22(2): 1–10.
- KOLAY, P.K.; DHAKAL, B.; KUMAR, S.; PURI, V.K. (2016). Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils *Int. J. of Geosynth and Ground Eng.*2(29): 9p.
- LAM, C., JEFFERIS, S. A. (2018) Introduction to polymers and polymers fluids. Polymer support fluids in civil engineering. ICE publishing, Londres. 29-53.
- LAMBE, T. W (1953). The Effect of Polymers on Soil Properties. Proc. of Third Intern. Conf. on Soil Mech and Foundation Eng. Switzerland.
- 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.
- LEE, S., CHUNG, M., PARK, H.M., SONG, CHANG, I. (2019). Xanthan gum biopolymer as a soil stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 31(11): 9p.
- LEOCADIO, G. (2005). Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, MG, 100p.
- LI, N., LV, S., WANG. W., GUO, J., JIANG, P., LIU. Y. (2020). Experimental investigations on the mechanical behavior of iron tailings powder with compound admixture of cement and nano-clay. *Construction and Building Materials*, (254) 11p.
- LI, C. H; ZORNBERG, J.G. (2013). Mobilization of Reinforcement Forces in Fiber Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. (139): 107-115.
- LI, W., CHAI S., ZHANG H., QIAN S. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials*, (172): 300-308.
- 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.
- LIU, J.; BAI, Y.; SONG, Z.; KANUNGO, D.P.; WANG, Y.; BU, F.; CHEN, Z.; SHI, X. (2020). Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer. *Construction and Building Materials*, (253) 14 p.
- LIU, J.; BAI, Y.; SONG, Z.; LU, Y.; QIAN, W.; KANUNGO, D.P (2018). Evaluation of Strength Properties of Sand Modified with Organic Polymers. *MDPI, Polymers*. 10(3):15 p.

- LIU, J.; CHEN, Z.; SONG, Z.; BAI, Y.; QIAN, W.; WEI, J.; KANUNGO, D.P. (2018). Tensile Behavior of Polyurethane Organic Polymer and Polypropylene Fiber-Reinforced Sand. MDPI, *Polymers*. 10(5):499-513.
- LIU, J.; WANG, Y.; KANUNGO, D. P.; WEI, J.; BAI, Y.; LI, D.; SONG, Z.; LU, Y. (2019) Study on the Brittleness Characteristics of Sand Reinforced with Polypropylene Fiber and Polyurethane Organic Polymer. *Fibers and Polymers*, 20(3):620-632.
- LIMA NETO, P. DE S. (2016). Estudo de utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para a pavimentação rodoviária. 45º RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, DF, Brasil. 13p.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A., (2010). Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.
- MAHER, M.; GRAY, D. (1990). Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(11):1661–1677.
- MAHER, M.; HO, Y. (1994). Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers*, 120(8):1381–1393.
- MALKO, J.A.C.; BRAZETTI, R.; CASAGRANDE, M.D.T. & SILVA, B.A. (2016). Applicability of soil-enzyme for paving. *Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (61): 2082-2085.
- MARTINS, A. (2014). Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal. Tese de Doutorado COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 297p.
- MCGOWN, A., ANDRAWES, K. Z., Hytiris, N., Mercer, F. B., (1985). Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 11:1735–1738.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. 3 ed. Rio de Janeiro – RJ. Editora Interciência, 2015. 638p.
- MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. (2011). *A história das barragens no Brasil*. Rio de Janeiro: CBDB, 524 p.
- MICHALOWSKI, R.L.; CERMÁK, J. (2003). Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, 129(2):125-136.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2010) *Plano nacional de mineração 2030 Geologia, Mineração e Transformação Mineral*. Brasília. 180p.
- MIRON, M., BOYD, B. W. (2015). Iron Ore. *The Canadian Encyclopedia*, 3p.
- MIRZABABAEI, M.; ARULRAJAH, A. OUSTON, M. (2017). Polymers for stabilization of soft clay soils. *Elsevier, Procedia Engineering*, 8p.

- MONTARDO, J.P. (1999). Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 130p.
- MONTARDO, J.P.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. (2002). Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, 24 (3):191-209.
- MOREL, J.C.; GOURC, J.P. (1997). Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements. Geosynthetics International, Minnesota, 4(5): 481-508.
- NATARAJ, M.; ADDULA, H.; MCMANIS, K. (1996). Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: International Symposium on Environmental Geotechnology. (3): 826–835.
- OLIVEIRA, L. S., SOARES, J. B., SANT'ANA, W. C. (2017). Análise de misturas de AAUQ com o equivalente de areia fora dos requisitos de norma. Reunião de pavimentação urbana, Florianópolis, Santa Catarina. 13 p.
- OKONTA, F. (2019). Pavement geotechnical properties of polymer modified weathered semi-arid shale subgrade. International Journal of Pavement Research and Technology 12(1): 54-63.
- PACHECO, L. M. (2011) Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: Estudo Laboratorial. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 93p.
- PINTO, A. R. A. G. (2008). Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 103 p.
- PEIXOTO, R, F, A; BATISTA, J, O, S; COSTA, E, C, P; SANTOS, D, H; FILHO, J, N, S; BASTOS, L, A, C; FONTES, W, C; MENDES, J, C. (2016). Utilização de rejeitos de barragens de minério de ferro na construção civil. Relatório técnico, Universidade Federal de Ouro Preto.
- PEREIDA E.L. (2005). Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas – Ouro Preto, MG, 210p.
- PLÉ, O.; LÊ, H.; GOTTELAND, P. (2009). A mechanical approach for fibre-reinforced clay in landfill caps cover application. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 13(1):53–69.
- PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R.(2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. Construction and Building Materials, 16(2): 123–131.
- RANJAN, G.; VASAN, R.; CHARAN, H. (1996). Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, 122(6):419–426.

- REZENDE, L. R. de, MARQUES; M. O. & CUNHA, N. L. (2015). The use of non-conventional materials in asphalt pavements base. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), 799–814. doi:10.1080/14680629.2015.1055334
- 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.
- ROQUE, P. F. B. (2017). Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- SABBO, G. R., Assis M.M. G., BERTERQUINI, A.B.T. (2017). Barragens de retenção de rejeitos de mineração. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, 2(1):3-15.
- SANCHEZ, P. N. I. (2015) Avaliação da Aplicabilidade de Canga de Minério de Ferro na Estabilização de dois Solos para Camadas de Pavimento. Projeto de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, RJ. 123p.
- SANDRONI, S.S., CONSOLI, N.C. (2010). Sobre a prática da engenharia geotécnica com dois solos difíceis: os extremamente moles e os expansivos. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, RS, 97-187.
- SANTIAGO, G. A. (2011). Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG 148p,
- SANTONI, R. L.; TINGLE, J. S.; WEBSTER, S. L. (2001). Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, American Society of Civil Engineers, 127(3):258–268.
- SANTOS, A. P. S. (2008). Estudo do comportamento de misturas solo cimento-fibra sob altas pressões. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 169 p.
- SENEZ, P. C. Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET). Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 124 p.
- SILVA, L. C. S., MARINHO, D. Y., SILVA FILHO, C. M. DA., SILVA, E. C. S., ESPINOSA, J. W. M. (2017). Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. 9º SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, São Cristóvão, SE, 260-274.
- SILVA, N. A. B. S. (2020). Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.

- SOARES, L., ARNEZ, F.I., HENNIES, W.T. (2000). Major causes of accidents in tailing dam dueto geological and geotechnical factors. *Mine Planning and Equipment Selection – International Symposium*, 371–376.
- SOLTANI, A. KHATIBI, M. TAHERI, A. ESTABRAGH, A. R. . (2017). Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4): 1717-1744.
- 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.
- SPECHT, L. P., HEINECK, K. G., CERATTI, J. A. P., CONSOLI, N.C. (2000). Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos. *Soils and Rocks*, 25(1):15.
- STAUFFER, S.; HOLTZ, R. (1995). Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. *Transportation research record*, 1474.
- 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.
- TAYLOR, G.D. (1994). *Materials in construction*. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 284p.
- TEODORO, J. M. (1999). Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. Dissertação de Mestrado, Escola de São Carlos/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 137p.
- TINGLE, J. et al. (2007). Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1989, p. 59-67.
- TOLEDO, A. de P; RIBEIRO, J. C. J; THOMÉ, R. (2016). Acidentes com barragens de rejeitos da mineração e o princípio da prevenção: de Trento (Itália) a Mariana (Brasil). *Lumen Juris*. Rio de Janeiro, RJ, 176 p.
- ULBRICH, L.A. (1997). Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 122 p.
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. MCgraw-Hill do Brasil. São Paulo, SP.509 p.
- VICK, S. G. (1983). *Planning, design and analysis of tailing dams*. New York: John Wiley & Sons. 369 p.
- VISCONTE, L.L.Y.; MARTINS, A.F.; NUNES, R.C.R.; SUAREZ & J.C.M. (2001) *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, XI. 5p.

- VENSON, G. I. (2015). Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga de Areia Artificialmente Cimentada. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 158 p.
- WILLIS, E. A.; CARPENTER, C.A. (1939). Studies of Water Retentive Chemicals as Admixtures with Nonplastic Road-Building Materials, Publics Roads, 20(9):173p.
- WILLIS, E. A.; SMITH, P.C. (1940). Chemical Treatment of Chert Gravel for Use in Base Course Construction. Publics Roads, (21):4.
- XING, C; LIU, X.; ANUPAM, K. (2018). Response of sandy soil stabilized by polymer additives. Open Access Journal of Environmental and Soil Sciences. 1(3): 64-71.
- 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.
- ZANDIEH, A.R., YASROBI, S.S. (2010). Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer. Geotechnical and Geological Engineering, 28(2):139-145.