

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PEC

Vivian Bignoto da Rocha Cândido

**Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de
minério de ferro**

Juiz de Fora
2023

Vivian Bignoto da Rocha Cândido

**Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de
minério de ferro**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Mário Vicente Riccio Filho

Coorientadora: Prof. Dra. Cátia de Paula Martins

Juiz de Fora
2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cândido, Vivian Bignoto da Rocha.

Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de minério de ferro / Vivian Bignoto da Rocha Cândido. -- 2023.

133 f.

Orientador: Mario Vicente Riccio Filho

Coorientadora: Cátia de Paula Martins

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Rejeito de Minério de Ferro . 2. Aproveitamento. 3. Solo Residual. 4. Geotecnia. I. Riccio Filho, Mario Vicente , orient. II. Martins, Cátia de Paula, coorient. III. Título.

VIVIAN BIGNOTO DA ROCHA CÂNDIDO**Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de minério de ferro**

Dissertação apresentada ao Nome do Curso ou Programa da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais

Aprovada em 30 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Vicente Riccio Filho - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.ª Dr.ª Cátia de Paula Martins - Coorientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.ª Dr.ª Rejane Nascentes

Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 30/06/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Mario Vicente Riccio Filho, Professor(a)**, em 05/07/2023, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Catia de Paula Martins, Professor(a)**, em 09/07/2023, às 20:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Professor(a)**, em 10/07/2023, às 09:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rejane Nascentes, Usuário Externo**, em 17/07/2023, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vivian Bignoto da Rocha Candido, Usuário Externo**, em 17/07/2023, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1347332** e o código CRC **DED53F25**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guia e me ampara em todos os momentos.

À minha mãe, Virgínia, por nunca medir esforços para que eu concretize meus sonhos, e ao meu irmão, Vinícius, por todos os conselhos e companheirismo. Vocês são a minha base!

Aos meus avós, José Carlos e Maria José, e aos meus tios, José Meireles, Carlinhos e Fernando, pelo carinho, apoio e incentivo.

Ao meu namorado, Bernardo, por todo amor e por sempre acreditar em mim. Obrigada por tornar os meus sonhos, os seus!

Ao meu orientador Prof. Mário Riccio, por toda dedicação e ensinamento compartilhado para esta pesquisa. À minha coorientadora Profa. Cátia Martins, que me acompanha deste a graduação e que me despertou o interesse pela vida acadêmica. Obrigada por toda sua paciência, incentivo e pelo conhecimento adquirido.

Aos membros da banca examinadora, por gentilmente aceitarem participar deste trabalho e contribuírem para o aperfeiçoamento.

Aos meus amigos de projeto, Vivian Lippi, Rhafaella Fernandes e Victor Hugo, por toda ajuda na realização dos ensaios, apoio emocional e pelos momentos de descontração. À minha amiga de caminhada, Paula Monteiro, pelos desabafos e incentivos. Às minhas amigas, Sabrina, Samantha e Mariana, por tornarem os dias mais leves e felizes.

Ao técnico de laboratório Lázaro Lopes, pelo acompanhamento no laboratório e pelas palavras de incentivo. À Profa. Tatiana, pelo auxílio na realização dos ensaios em seu laboratório. Ao técnico do Laboratório de Pavimentação, Vitor, pelo treinamento e ajuda nos ensaios.

À Universidade Federal De Juiz de Fora e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que me permitiram o acesso ao ensino gratuito, de excelência e que agregou muito à minha trajetória profissional e humana. À CAPES, pelo fomento financeiro ao longo desta pesquisa.

E a todos que participaram e contribuíram, de alguma forma, para a minha formação.

RESUMO

Com o avanço da atividade mineradora no Brasil, surgiu a necessidade de propor métodos ambientalmente adequados para a disposição dos resíduos gerados. O aproveitamento de rejeito de minério de ferro (RMF) em obras geotécnicas se mostra como uma potencial opção para preservar o solo natural, através da substituição total ou parcial do volume de solo por rejeito. Além disso, essa prática reduz a quantidade de rejeito disposto em barragens ou pilhas, o que reduz as grandes áreas de disposição e a necessidade de controle de estabilidade. Mais ainda, este reaproveitamento contribui para o Objetivo 12, dos “Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável” previstos na Agenda 2030. Dessa forma, a presente pesquisa busca estudar o comportamento mecânica de um RMF e de sua mistura com um solo residual maduro, com o intuito de avaliar o potencial de aproveitamento na Geotecnia, como em camadas de pavimentação e aterro rodoviário, filtros de barragem de terra, camadas de cobertura de aterro sanitário, tijolos e similares formados pela mistura de solo-cimento. Para isto, foram realizados ensaios de caracterização mineralógica, física, e os ensaios mecânicos, além da modelagem numérica. Foram estudados, então, o solo residual, o RMF e as misturas de 25%, 50% e 75% de massa de rejeito em relação a massa total seca da mistura. Junto a esses, foram também obtidos os parâmetros de interesse para uma mistura de solo e rejeito acrescidas de porcentagens de cimento e areia. Esta mistura foi modelada como um corpo de prova cilíndrico, no *software* PLAXIS 2D, para verificar se os parâmetros obtidos experimentalmente são compatíveis com os resultados do programa. Os resultados correspondentes aos materiais puros e às misturas de solo-rejeito demonstraram ganhos nos parâmetros mecânicos e aumento de maior rigidez para as misturas. O rejeito não prejudicou nenhuma característica do solo. A possível aplicação encontrada foi em corpo de aterro rodoviário, reforço de subleito e em camadas de cobertura de aterro sanitário. Quanto à mistura com cimento e areia, os valores obtidos apresentam um potencial uso para tijolos de solo-cimento. A modelagem demonstrou que os resultados laboratoriais são confiáveis e representativos em termos de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coesão e ângulo de atrito. Com base nos resultados obtidos e na revisão da Literatura, pode-se concluir que o rejeito é uma potencial matéria prima para as obras geotécnicas e elementos como tijolos e similares, cuja aplicação pode representar uma redução nos impactos ambientais da mineração, redução do uso de material natural e uma nova forma de disposição.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro. Aproveitamento. Solo Residual. Geotecnia.

ABSTRACT

With the advancement of mining activities in Brazil, the need arose to propose environmentally suitable methods for waste disposal. The utilization of iron ore tailings (IOT) in geotechnical projects emerges as a potential option to preserve natural soil by partially or entirely replacing the volume of soil with tailings. Moreover, this practice reduces the amount of waste disposed in dams or piles, thereby minimizing extensive disposal areas and the need for stability control. Furthermore, this reuse aligns with Goal 12 of the "Sustainable Development Goals" outlined in the Agenda 2030. Thus, this research aims to study the mechanical behavior of IOT and its mixture with mature residual soil to assess its potential in Geotechnical applications, such as pavement layers, road embankments, earth dam filters, landfill cover layers, and bricks or similar products formed by soil-cement mixtures. The study involves mineralogical and physical characterization tests, as well as mechanical tests and numerical modeling. The soil, IOT, and mixtures containing 25%, 50%, and 75% of tailings by dry mass of the mixture were investigated. Additionally, parameters of interest for a mixture of soil, tailings, cement, and sand were also obtained. This mixture was modeled as a cylindrical specimen using the PLAXIS 2D software to verify the compatibility of experimental results with the program's output. The results for pure materials and soil-tailings mixtures demonstrated improvements in mechanical parameters and increased stiffness for the mixtures. The tailings did not compromise any soil characteristics. The potential applications found were in road embankments, subgrade reinforcement, and landfill cover layers. Regarding the mixture with cement and sand, the obtained values indicate a potential use for soil-cement bricks. The modeling showed that the laboratory results are reliable and representative in terms of elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion, and friction angle. Based on the obtained results and the literature review, it can be concluded that tailings are a potential raw material for geotechnical works and elements like bricks or similar products, which could reduce environmental impacts of mining, decrease the use of natural materials, and offer a new disposal method.

Keywords: Iron Ore Tailings. Use. Residual Soil. Geotechnics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Esquema do processo de beneficiamento do minério de ferro e produção do rejeito	23
Figura 2	– Empilhamento drenado de rejeito de mineração	29
Figura 3	– Distribuição das barragens inseridas no PNSB, por estado e categoria de risco	30
Figura 4	– Barragem de terra homogênea	43
Figura 5	– Barragem de terra homogênea com filtro vertical e horizontal	44
Figura 6	– Talude de retirada do solo	49
Figura 7	– Curvas de compactação e saturação do solo puro	50
Figura 8	– Envoltória de resistência do solo, obtida por Abrantes (2022)	50
Figura 9	– Curva granulométrica do RMF	51
Figura 10	– Curva de compactação do RMF	52
Figura 11	– Curvas de compactação na energia Proctor Normal das misturas M1, M2 e M3	53
Figura 12	– Solo disposto em bandeja para secagem ao ar	55
Figura 13	– Solo destorroadado	55
Figura 14	– RMF disposto em bandeja para secagem ao ar	56
Figura 15	– RMF destorroadado	57
Figura 16	– Areia após secagem ao ar	57
Figura 17	– Materiais secos da mistura M: a) RMF, b) acréscimo de areia, c) acréscimo de solo	59
Figura 18	– Homogeneização dos materiais com: a) cimento, b) acréscimo de água	59
Figura 19	– Sedimentação do solo	60
Figura 20	– Peneiramento fino do solo	61
Figura 21	– Picnômetro de 500 ml	61
Figura 22	– Acessórios utilizados para o ensaio de ISC	63
Figura 23	– Corpos de prova submersos e determinação da expansão	63
Figura 24	– Prensa de ISC com corpo de prova	64
Figura 25	– Molde para corpo de prova cilíndrico de diâmetro 5 cm e altura 10 cm, em PVC bipartido	65

Figura 26	–	Corpo de prova da Mistura M2 após rompimento	66
Figura 27	–	Moldagem do anel de adensamento	67
Figura 28	–	Prensa de adensamento	68
Figura 29	–	Moldagem do anel de cisalhamento	69
Figura 30	–	Prensa do Ensaio de Cisalhamento Direto	70
Figura 31	–	Corpos de prova após o cisalhamento	71
Figura 32	–	Compactador mecânico	72
Figura 33	–	Molde tripartido	72
Figura 34	–	Célula do equipamento Triaxial	73
Figura 35	–	Cilindro e soquetes utilizados para a compactação da mistura MC	74
Figura 36	–	Compactação da mistura MC	75
Figura 37	–	Corpo de prova de solo, rejeito, areia e cimento moldado	76
Figura 38	–	Corpos de prova em imersão	76
Figura 39	–	Prensa de RCS com acessório metálico acoplado ao pistão	77
Figura 40	–	CP da mistura M durante à aplicação de forças na prensa	78
Figura 41	–	Difratograma das frações do rejeito: a) areia, b) silte e c) argila	82
Figura 42	–	Curva granulométrica do solo	83
Figura 43	–	Curva granulométrica das misturas M1, M2 e M3	84
Figura 44	–	Curva granulométrica da areia	85
Figura 45	–	Curvas de tensão de compressão por deformação axial específica	89
Figura 46	–	Permeabilidade com a tensão vertical efetiva para todos os materiais	90
Figura 47	–	Variação do índice de vazios por tensão vertical efetiva, para cada material	92
Figura 48	–	Variação do índice de vazios por tensão vertical efetiva, para cada material	93
Figura 49	–	Envoltória de Mohr-Coulomb para: a) M1, b) M2, c) M3 e d) RMF	95
Figura 50	–	Envoltória de Mohr-Coulomb para o RMF e as misturas	95
Figura 51	–	Módulo de resiliência em função da tensão desvio para: a) solo b) M1	97
Figura 52	–	Módulo de resiliência em função da tensão desvio para: a) M2 b) M3	98
Figura 53	–	Módulo de resiliência em função da tensão desvio para o RMF	98
Figura 54	–	Curvas da equação do modelo simples de todos os materiais	98
Figura 55	–	MR em função da tensão desvio para o solo, ZM 11, ZM 12 e ZM10'	101

Figura 56	– MR em função da tensão desvio para o rejeito (RMF) e aqueles estudados por Dantas (2019) e Campanha (2011), compactados na Energia Normal ...	102
Figura 57	– Curva de compactação da mistura M (solo, areia, rejeito e cimento)	106
Figura 58	– Curvas de tensão vertical por deformação axial específica	107
Figura 59	– Modelo proposto para a simulação no PLAXIS 2D	109
Figura 60	– Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 01 – ensaio e modelagem	111
Figura 61	– Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 02 – ensaio e modelagem	111
Figura 62	– Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 03 – ensaio e modelagem	112
Figura 63	– Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 04 – ensaio e modelagem	112
Figura 64	– Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 05 – ensaio e modelagem	113
Figura 65	– Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 01	131
Figura 66	– Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 02	131
Figura 67	– Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 03	132
Figura 68	– Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 04	132
Figura 69	– Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 05	133
Quadro 1	– Resumo das aplicações geotécnicas avaliadas e o potencial uso dos materiais estudados	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Produção e reservas de minério de ferro no mundo	22
Tabela 2	– Critérios DNER para camadas de pavimento flexível.....	38
Tabela 3	– Faixas de serviço para bases estabilizadas granulometricamente	39
Tabela 4	– Critérios de filtro	45
Tabela 5	– Limites para prevenir segregação	45
Tabela 6	– Componentes químicos do RMF	79
Tabela 7	– Percentuais de solo, areia e rejeito para a mistura e granulometria destes materiais	85
Tabela 8	– Teores de umidade de moldagem	86
Tabela 9	– Valores de ISC e Expansão para todos os materiais	86
Tabela 10	– Valores de RCS e teores de umidade ótimos e após a ruptura	88
Tabela 11	– Índices de adensamento	90
Tabela 12	– Valores de φ' e c' para todos os materiais	93
Tabela 13	– Coeficientes e valores médios de MR pelo modelo simples em função da tensão desvio	97
Tabela 14	– Coeficientes das equações pelo modelo simples em função da tensão confinante	97
Tabela 15	– Frações granulométricas e parâmetros ótimos de compactação para o solo, ZM11 e ZM12	99
Tabela 16	– Frações granulométricas e parâmetros ótimos de compactação para o RMF e para os rejeitos de Campanha (2011) e Dantas (2019)	100
Tabela 17	– Coeficientes e valores de R^2 pelo modelo composto	102
Tabela 18	– Coeficientes e valores de R^2 do modelo composto, para os outros autores	102
Tabela 19	– Valores de MR para cada material e para cada par de tensões utilizadas no ensaio	103
Tabela 20	– Valores dos parâmetros do ensaio de RCS	104
Tabela 21	– Dados de entrada do programa para os cinco CPs	104
Tabela 22	– Dados de entrada do <i>software</i> PLAXIS 2D para cada CP	106
Tabela 23	– Resultados do PLAXIS 2D e ensaio de RCS	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CEPED	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DP	Deformação Permanente
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M1	Mistura de 25% de rejeito e 75% de solo
M2	Mistura de 50% de rejeito e 50% de solo
M3	Mistura de 75% de rejeito e 25% de solo
MC	Mistura de solo, rejeito, areia e cimento
MG	Minas Gerais
MR	Módulo de Resiliência
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PROINFRA	Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão
RCD	Resistência ao Cisalhamento Direto
RCS	Resistência à Compressão Simples
RMF	Rejeito de minério de ferro
SUCS	Sistema Unificado De Classificação Dos Solos
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	SOLO RESIDUAL	18
2.1.1	Estabilização de solos	19
2.2	MINÉRIO DE FERRO: ASPECTOS GERAIS	20
2.3	REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	23
2.3.1	Conceito e classificação	23
2.3.2	Propriedades física, química e mineralógica	25
2.3.3	Propriedades Mecânicas	26
2.3.4	Processo de disposição	28
2.4	O REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM OBRAS GEOTÉCNICAS	31
2.4.1	Rejeito puro ou em misturas com solo	31
2.4.2	Rejeito em misturas com solo e outros materiais	33
2.4.3	Rejeito em misturas com cimento	35
2.4.4	Outras pesquisas	36
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUMAS OBRAS GEOTÉCNICAS	36
2.5.1	Aterros e camadas de Pavimento Rodoviário	37
2.5.1.1	<i>Faixas granulométricas de referência</i>	38
2.5.1.2	<i>Módulo de Resiliência (MR)</i>	39
2.5.2	Camadas de cobertura de Aterro Sanitário	41
2.5.3	Corpo e filtro de Barragem de Terra	43
2.5.4	Tijolo de Solo- Cimento	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	MATERIAIS	48
3.1.1	Solo	48
3.1.2	Rejeito de minério de ferro	51
3.1.3	Misturas de rejeito com solo	52
3.1.4	Mistura de solo, areia, rejeito e cimento	53
3.2.1	Coleta e Preparação de Amostras	54
3.2.1.1	<i>Preparo das misturas</i>	58
3.2.2	Ensaio de granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência	59
3.2.3	Ensaio de Difração de Raio-X (DRX) no Rejeito	62
3.2.4	Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão	62

3.2.5	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)	64
3.2.6	Ensaio de Adensamento Unidimensional	66
3.2.7	Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto (RCD)	69
3.2.8	Ensaio de Módulo de Resiliência	71
3.2.9	Mistura de solo-areia-rejeito-cimento	74
3.2.9.1	<i>Ensaio de Compactação</i>	74
3.2.9.2	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)</i>	75
3.2.9.3	<i>Modelagem Numérica</i>	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	MATERIAIS	81
4.1.1	Rejeito de Minério de Ferro (RMF)	81
4.1.2	Solo	83
4.1.3	Areia	85
4.1.4	Mistura de rejeito, solo, areia e cimento	86
4.2	ISC E EXPANSÃO – Misturas M1, M2 e M3 (SEM CIMENTO)	86
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - RCS (SEM CIMENTO)	88
4.4	ADENSAMENTO E PERMEABILIDADE, M1, M2, M3 (SEM CIMENTO)	90
4.5	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO, M1, M2, M3 (SEM CIMENTO)	94
4.6	MÓDULO DE RESILIÊNCIA, M1, M2, M3 (SEM CIMENTO)	97
4.7	MISTURA SOLO-AREIA-REJEITO-CIMENTO	105
4.7.1	COMPACTAÇÃO – MISTURA MC (SOLO, AREIA, REJEITO E CIMENTO)	106
4.7.2	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	106
4.7.3	Modelagem no <i>software</i> PLAXIS 2D	108
4.8	RESUMO DAS POTENCIAIS APLICAÇÕES DO RMF EM OBRAS GEOTÉCNICAS	116
5	CONCLUSÕES	116
	REFERÊNCIAS	120
	ANEXO 1	131

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora é responsável pelo desenvolvimento da indústria e setor de serviços no Brasil. Segundo o mais recente anuário da Agência Nacional de Mineração (ANM), encontram-se em operação 227 minas de exploração de substâncias metálicas. Isso gerou, em 2021, mais de 300 bilhões de reais em substâncias metálicas produzidas. Deste total, 80% é referente à produção do minério de ferro. Este valor contribui para tornar o Brasil o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo (ANM, 2022).

Ainda que esta indústria seja responsável por grandes benefícios no ponto de vista econômico, alguns e importantes impactos ambientais são gerados por esta prática. No Brasil, as minas de minério de ferro são à céu aberto. A lavra é feita em bancadas com desmonte por meio de explosivos, escavadeiras, transporte em pás carregadeiras e caminhões fora-de-estrada (JESUS, 2008). Com este método, solo, água e ar podem sofrer desequilíbrios e, até mesmo, terem suas condições naturais impossibilitadas de serem recuperadas (FONTES, 2013). Além disso, há a elevada geração de rejeitos, que representam um outro passivo, senão o mais importante, ambiental.

Espósito (2000) define os rejeitos de mineração como resultantes do processo de beneficiamento do minério. Este material é comumente destinado sob a forma de polpa ou lama e disposto em reservatórios (barragens) ou pilhas. As barragens de contenção são, normalmente, construídas em etapas, de acordo com a quantidade de rejeito estocado, o que diminui os custos de construção. Para favorecer a sua segurança, foram elaboradas legislações que visam estabelecer as diretrizes de segurança e estipular as formas de disposição dos rejeitos (BRASIL, 2010; ANM, 2022). Já as pilhas, como apontado por Dantas (2021), são utilizadas, sobretudo, quando não há a possibilidade de armazenamento em barragens, o que necessita de grande área para acomodação destes materiais.

Como consequência, novas pesquisas têm surgido de forma a estudar a aplicação desses resíduos como material de construção. Boscov (2008) ressalta a importância desses estudos, uma vez que são gerados consideráveis volumes de rejeitos, que necessitam de grandes áreas para disposição. Em especial na mineração, esses volumes são muito expressivos e as áreas de disposição frequentemente utilizadas são chamadas de barragens, que constituem bacias nas superfícies dos terrenos e consomem extensa área para a formação de seus reservatórios.

Por sua vez, as obras geotécnicas demandam de um grande volume de material natural, comumente constituído de solos. Como exemplos, tem-se: os aterros rodoviários, as

camadas estruturais de um pavimento flexível, as camadas de cobertura de aterros sanitários, a estrutura do corpo de barragem de terra e filtros de drenagem. Entretanto, nem sempre o solo disponível na região do empreendimento pode apresentar propriedades fundamentais para a aplicação destinada. Para que a sua utilização seja possível, é necessário, então, que suas propriedades sejam melhoradas por meio de ações mecânicas, físicas e químicas, ou do acréscimo de outro material.

Dessa forma, recentes pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar o potencial de aproveitamento do rejeito de minério de ferro (RMF) em obras geotécnicas (CAMPANHA, 2011; BASTOS *et al.*; 2016; DANTAS, 2019; CARNEIRO, 2020; OSINUBI *et al.*; 2015; RODRIGUES e FERNANDES, 2015). Dantas (2019) propôs a utilização de RMF misturado a um solo e encontrou resultados satisfatórios em relação aos parâmetros necessários para camadas de base. Echerri Vergara (2012) analisou o uso do RMF como filtro de barragens de terra e também encontrou parâmetros que se enquadram no mínimo recomendado por norma, embora não tenha analisado o efeito da colmatação. Já Mafra (2016) apresentou o uso do RMF hidrociclado na construção do corpo de barragens e dos seus alteamentos.

A importância destes estudos apresenta-se na diminuição da exploração de material natural (jazidas de solos) utilizado nas obras geotécnicas, através da possível substituição total ou parcial do solo pelo rejeito de minério de ferro. Com isto, há uma contribuição para a preservação do solo, recurso geotécnico natural, e redução do volume depositado em barragens e/ou pilhas.

Além disso, o reaproveitamento de rejeito de minério de ferro em obras geotécnicas está diretamente correlacionado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável número 12, que busca promover o "Consumo e Produção Responsáveis", presentes na Agenda 2030 (BRASIL, 2023). Ao utilizar os rejeitos provenientes da indústria mineradora como material substituto em obras geotécnicas, pode-se reduzir a quantidade de materiais descartados inadequadamente, o que contribui para a diminuição do impacto ambiental associado à produção e descarte desses materiais. Junto a isto, este uso promove a eficiência de recursos, uma vez que viabiliza o reaproveitamento de um material que, de outra forma, seria considerado de pouco ou nenhum valor econômico.

Ademais, por se tratar de um material alternativo para a Geotecnia, é necessário que suas propriedades sejam investigadas e correlacionadas com as do solo a fim de avaliar uma possível aplicação, além de contribuir para um banco de dados. Desta forma, a presente pesquisa pretende responder à pergunta: “qual a influência no comportamento mecânico de um solo após a adição gradual de porcentagens de rejeito de minério de ferro?”. Caso seja

visto que o rejeito contribui ou, ao menos, não prejudica as características do solo, pode-se considerá-lo um potencial material de construção para a Geotecnia. Com isto, tem-se uma preservação de materiais naturais, diminuição de impactos ambientais e uma destinação mais adequada do rejeito.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro, coletado em Congonhas – MG, e de sua mistura com um solo residual com o intuito de avaliar o potencial de aproveitamento na Geotecnia, como em aterros rodoviários, camadas de pavimentação, filtros de barragem, camada de cobertura de aterro sanitário e tijolos de solo-cimento. Para isso, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- a) avaliar as características físicas, químicas e mineralógicas do rejeito de minério de ferro e solo residual;
- b) fomentar a pesquisa técnico-científica com os parâmetros mecânicos obtidos;
- c) contribuir para o desenvolvimento de novos materiais aplicáveis em obras geotécnicas, bem como para redução dos passivos ambientais de maneira sustentável;
- d) modelar e analisar o comportamento tensão - deformação de um cilindro composto por solo, rejeito e cimento de forma a possibilitar a modelagem computacional de tijolos, por exemplo.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho se encontra organizado em seis capítulos. O primeiro é composto pela introdução e pelos objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados e seus fundamentos teóricos. Assim, são apontadas considerações sobre a estabilização de solos e sobre a mineração no Brasil. Em seguida, são apresentadas definições e classificações sobre o rejeito de minério de ferro e as aplicações apresentadas em pesquisas da Literatura. Logo após, são apresentados os critérios e as normas vigentes das principais obras geotécnicas que permitem potencial uso do RMF, além dos principais parâmetros necessários para as análises preliminares.

No Capítulo 3, é apresentado o programa experimental adotado para atingir o objetivo da pesquisa. Nele, são apresentados os materiais e metodologias utilizadas, com as respectivas normas e embasamentos de Literatura. São apresentadas, ainda, as variáveis adotadas e as justificativas de escolha.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio e modelagem computacional de um corpo de prova de mistura solo-RMF e cimento. Além disso, são discutidas as análises e observações quanto ao proposto na pesquisa.

No Capítulo 5, são apontadas as considerações finais e conclusão do trabalho. Por fim, são feitas sugestões para pesquisas futuras.

No último capítulo, de Referências, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da bibliográfica sobre os temas abordados nesta pesquisa. São apontadas considerações sobre estabilização de solos e extração do minério de ferro no Brasil, além de aspectos sobre o rejeito de minério de ferro (RMF), sua caracterização e aplicações geotécnicas encontradas na Literatura. Por fim, são apresentadas algumas obras geotécnicas em que pode ser utilizado o rejeito de minério de ferro e os parâmetros de interesse para as análises preliminares.

2.1 SOLO RESIDUAL

É chamado de solo residual o solo que permanece em seu local de origem. Nele, é possível observar uma mudança gradual da rocha até o solo, o que o torna heterogêneo (CAPUTO, 2015). Além dessa heterogeneidade, o solo residual possui anisotropia devido a anisotropia da rocha-mãe, o que torna difícil o estudo do estado de tensões (SOUSA PINTO, 2006).

O grau de decomposição do mineral determina a classificação do solo residual em jovem e maduro. Essa decomposição, entretanto, pode ocorrer de forma descontínua em faixas de solo devido a presença de minerais mais resistentes ao processo de decomposição. Assim, pode ocorrer a formação de blocos isolados de rochas no solo, chamados de matacões (CHIOSSI, 1975).

O solo disponível, contudo, nem sempre para uso apresenta as propriedades de projeto. De acordo com Medina *et al.* (2005) e Caballero (2019), quando isto acontece, pode-se destacar a existência de quatro possibilidades de solução do problema:

- a) Alterar o local da obra;
- b) Adaptar o projeto inicial para as propriedades do solo *in situ*;
- c) Substituir parcial ou total o solo *in situ* por outro;
- d) Alterar as propriedades intrínsecas do solo *in situ* por meio de técnicas de estabilização.

Na maioria das vezes, as opções quanto à troca de local e substituição parcial ou total do solo problemático, podem não ser opções viáveis devido ao projeto de engenharia ter sido projetado para aquela localidade específica e/ou por questões ambientais e econômicas correspondentes à disposição final e ao uso de material natural. Além destas, a adaptação do projeto para as propriedades do solo *in situ* tende a torná-lo oneroso, inviabilizando a

execução. Por outro lado, apresenta-se como uma possível opção a alteração das propriedades geotécnicas do solo disponível a partir de técnicas de estabilização.

2.1.1 Estabilização de solos

Por estabilização de solos entende-se a adoção de uma técnica ou conjunto de técnicas (física, química, mecânica e/ou térmica) que são empregadas para a alteração de determinadas propriedades de um solo a fim de tornar possível o seu uso de acordo com o propósito pretendido (WINTERKORN e PAMUKCU, 1991; MEDINA *et al.*; 2015).

Assim, a estabilização mecânica compreende os processos que alteram a estrutura de sólidos e vazios do solo natural. Para isso, são aplicados processos físicos como a compactação, vibração e/ou adição de um outro material. Esta técnica possibilita a diminuição do índice de vazios do solo e, conseqüentemente, reduz a compressibilidade e percolação de água, e aumenta a densidade, a resistência mecânica ao cisalhamento, a durabilidade e compacidade (MAKUSA, 2002; MEDINA *et al.*; 2015).

Como componente da estabilização mecânica, encontra-se a estabilização granulométrica. Por meio dela, é realizada a combinação de solos, de acordo com a proporção necessária, para que se obtenha um material cuja estabilidade seja superior ao solo de origem e adequada para a aplicação destinada (VILLIBOR, 1982). Assim, faz-se a distribuição das porções de partículas de tamanhos diferentes de tal forma que os grãos menores preencham os vazios dos grãos maiores. O material resultante deve, então, possuir maior densidade se comparado ao solo de origem (SENÇO, 2001).

Já a estabilização físico-química utiliza das reações físicas ou químicas. As reações físicas compreendem os processos de hidratação e adsorção, por exemplo. Além disso, pode ser feita pela eletrocinética, em que o solo sofre influência de um campo elétrico que facilita a consolidação do solo, que normalmente possui granulometria fina, e fornece barreiras de fluxo para desviar a percolação de água. Já as reações químicas ocorrem quando um ou mais compostos químicos são adicionados ao solo. Assim, inúmeros produtos químicos, como cimento, cal e cinzas volantes, podem ser utilizados e suas equações são desenvolvidas para a análise. Essas reações podem ser, por exemplo, de cimentação, oxidação e carbonatação. O produto final deve possuir, assim, melhor interação de suas partículas com as moléculas de água (WINTERKORN e PAMUKCU, 1991; NUNES, 1991; MAKUSA, 2002).

Por fim, a estabilização térmica é baseada também em processos físicos, mas que usa técnicas de aquecimento ou congelamento para a melhoria do solo durante um período. O

método de aquecimento pode ser feito tanto no local, através da instalação de queimadores sobre o solo, ou em fornos estacionários. Assim, é possível aumentar a capacidade de carga e diminuir a sensibilidade a água. Já o método de congelamento é usado, principalmente, para obter estabilização contínua em áreas onde o degelo deve ser evitado, ou para obter estabilização temporária em obras subterrâneas com a presença do lençol freático. Por meio dessa técnica, é possível diminuir a permeabilidade do solo e aumentar sua resistência à compressão (WINTERKORN e PAMUKCU, 1991).

Conforme mencionado, o uso de um material para a alteração de propriedades do solo natural é considerado uma técnica de estabilização mecânica. A incorporação de materiais alternativos, em especial, auxilia na redução do consumo e na preservação do recurso natural, uma vez que as obras geotécnicas utilizam de grandes volumes de solo. Tem sido observado até o presente momento que há um crescente aumento dos estudos que tratam da possibilidade de incorporação de resíduos e rejeitos em solos, de modo a investigar a contribuição no comportamento mecânico dessa adição ou identificar uma opção para a sua disposição sustentável (BASTOS, 2015; RODRIGUES e FERNANDES, 2018; DANTAS, 2019; BARLETTA, 2021). Em relação a este último ponto, essa nova forma de disposição não precisa, necessariamente, melhorar alguma qualidade do solo, e sim não o prejudicar a ponto de desclassificá-lo para o uso em estudo. Silva *et al.* (2016) encontraram resultados promissores do uso de resíduo de construção civil para a estabilização de um solo colapsível, e Silva *et al.* (2020) analisou a influência da adição de cinza de cavaco de eucalipto a um solo maduro.

À vista disso, a presente pesquisa está inserida nesse contexto, com o propósito de estudar, a partir da técnica de estabilização mecânica, o comportamento mecânico da incorporação do rejeito de minério de ferro em um solo residual maduro.

2.2 MINÉRIO DE FERRO: ASPECTOS GERAIS

Qualquer rocha ou mineral que de seja possível a extração do ferro pode ser considerada um minério de ferro (LUZ et al., 2018). Assim, apenas os minerais que possuem óxido de ferro são mais comumente explorados, uma vez que estes óxidos são os que apresentam maiores composições. Dos principais minerais que possuem ferro economicamente explorável, destacam-se hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita (FeO/OH) e siderita (FeCO_3). Dessa forma, o ferro é um dos metais mais produzidos na indústria e compõe cerca de 99% da fabricação de aço e ferro fundido (JESUS, 2008).

Ainda em relação ao minério de ferro, este pode ser dividido em minério itabirítico e hematítico, de acordo com o seu conteúdo mineral e textura. A porcentagem de ferro total no minério itabirítico varia de 20% a 55%, cujas bandas de óxido de ferro e sílica se apresentam de maneira alternada. Por sua vez, o minério hematítico apresenta teor de ferro superior a 64% e conteúdo homogêneo, com predominância da hematita. Assim, ainda que possa existir ferro na composição de diversos minerais, nem todos podem ser explorados economicamente, pois precisam apresentar percentual considerável de ferro e ter distribuição nas rochas que permitam a exploração (CARVALHO et al., 2014).

A mineração compreende os processos de extração de produtos minerais encontrados na crosta terrestre e que possuem valor econômico para a população. Esse processo envolve a lavra, tratamento mineral, disposição de resíduos e obtenção do produto, que passa por tratamento físico e químico (BASTOS, 2013).

O Brasil é o segundo país com maior produção e reserva de minério de ferro do mundo, conforme exposto pela Tabela 1. Isto representou cerca de 16% de toda a produção mundial e 19% das reservas de minério bruto, de acordo com os dados da U. S. Geological Survey (USGS, 2023).

Tabela 1 – Produção e reservas de minério de ferro no mundo

	Produção Mineral				Reservas	
	Minério Utilizável		Teor de Ferro		(milhões de toneladas)	
	2021	2022	2021	2022	Minério Bruto	Teor de Ferro
Estados Unidos	47.500	46.000	30.100	29.000	3.000	1.000
Austrália	912.000	880.000	565.000	540.000	651.000	627.000
Brasil	431.000	410.000	273.000	260.000	34.000	15.000
Canadá	57.500	58.000	34.500	35.000	6.000	2.300
Chile	17.700	16.000	11.200	10.000	NA*	NA
China	394.000	380.000	246.000	240.000	20.000	6.900
Índia	273.000	290.000	169.000	180.000	5.500	3.400
Irã	72.900	75.000	47.900	49.000	2.700	1.500
Casaquistão	64.100	66.000	13.100	14.000	2.500	900.000
Mauritânia	12.800	13.000	8.000	8.100	NA	NA
México	10.800	11.000	6.810	6.900	NA	NA
Peru	18.100	17.000	12.100	11.000	2.600	1.200
Rússia	96.000	90.000	66.700	63.000	29.000	14.000
África do Sul	73.100	76.000	46.500	48.000	1.000	670.000
Suécia	40.200	39.000	28.600	28.000	1.300	600.000
Turquia	16.100	17.000	9.710	10.000	130.000	38.000
Ucrânia	83.800	76.000	52.400	47.000	76.500	72.300
Outros países	56.700	59.000	4.900	5.000	18.000	9.500
Produção mundial (arredondada)	2.680.000	2.600.000	1.630.000	1.600.000		
	0	0	0	0	180.000	85.000

*NA – não avaliado

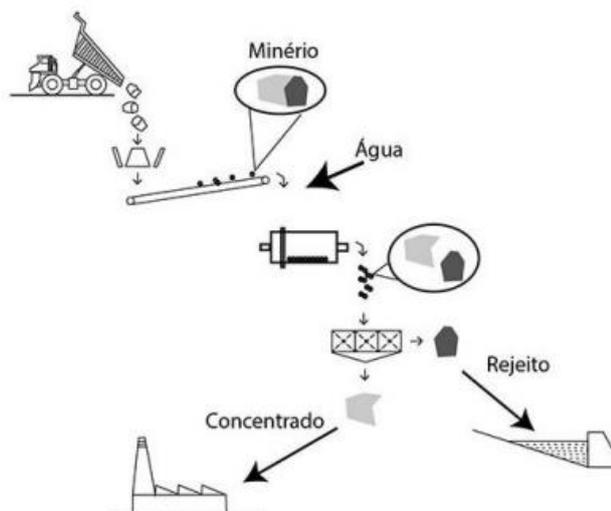
Fonte: Adaptado de USGS (2023)

De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2021, foram produzidas mais de meio bilhão de toneladas de minério de ferro no Brasil. Em relação às substâncias metálicas, essa produção correspondeu a 80% do valor total produzido. Desse total, cerca de 90% são referentes ao valor produzido pelos estados de Minas Gerais e Pará (ANM, 2022).

O beneficiamento do minério bruto é realizado para torná-lo o mais puro possível para a utilização industrial. Assim, este processo compõe operações para a modificação da granulometria, concentração relativa dos minerais e a forma, que são realizadas através de métodos físicos ou químicos, sem interferência na composição química dos minerais (LUZ et al., 2018). A forma com que é feito o beneficiamento do minério de ferro do Brasil depende, sobretudo, do tipo itabirítico ou hematítico. Para a hematita, o processo de beneficiamento é feito por fragmentação, classificação 28 e lavagem. Mas, para o itabirito, também é necessária uma etapa chamada de concentração, em que há o enriquecimento de teor. Com isso, ao final

do processo, é formada a lama e o rejeito de flotação, cujas destinações são diferentes (ZUQUETTE, 2015). Na Figura 1, é apresentado um esquema do processo de beneficiamento do minério de ferro e a geração do rejeito.

Figura 1 – Esquema do processo de beneficiamento do minério de ferro e produção do rejeito



Fonte: Zuquette (2015)

Em relação a produção, a quantidade de rejeito de minério de ferro gerada no processo de exploração e beneficiamento corresponde a uma razão média de 2/1 entre o produto final e a geração de rejeito (ABRÃO, 1987, *apud* BASTOS, 2013). Além disso, o RMF pode ser produzido por separação magnética ou flotação. Na separação magnética, o fator determinante é a suscetibilidade magnética e, normalmente, é utilizada para o minério de ferro, areias quartzosas e feldspato. Já a flotação é aplicada no beneficiamento do minério com baixo teor e granulometria fina, permite a recuperação de parte dos minérios e é utilizada para o tratamento de grande parte dos minérios (CAMPANHA, 2011).

Devido a esta crescente exploração do minério de ferro e conseqüente geração do rejeito, novas pesquisas visam caracterizar e buscar aplicações para estes rejeitos.

2.3 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Neste tópico, são abordadas as definições de rejeito de minério de ferro, suas propriedades, processos de disposição e sua utilização em obras geotécnicas.

2.3.1 Conceito e classificação

A atividade mineradora gera subprodutos denominados de estéreis e rejeitos. O estéril é o material que não possui valor econômico que permita a sua exploração direta, o que torna necessária a sua separação da forma mais pura do minério. Já os rejeitos são os materiais gerados do processo de beneficiamento e concentração dos minerais, junto da água utilizada neste processo, cujas características são função do tipo de minério bruto, da forma de beneficiamento e das substâncias químicas utilizadas. Devido a isto, os rejeitos podem ser inertes ou não inertes a água, além de poderem estar contaminados ou não (Gomes, 2004; ARAÚJO, 2006; SOARES, 2018).

Na literatura, o subproduto gerado do processo de extração, beneficiamento e concentração do minério de ferro pode receber tanto o nome de rejeito (CARVALHO, 2013; DANTAS, 2019) quanto de resíduo (BEDIN; 2010; BEZERRA, 2017). Isto depende da forma de interpretação dos autores sobre resíduos e rejeitos. A Lei nº 12.305, de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define como resíduo sólido o material descartado que provém das atividades humanas, cujo descarte não pode ser realizado diretamente na rede pública de esgoto ou corpos d'água e que não exista método economicamente viável para permitir esse lançamento. O resíduo sólido tem como característica, ainda, permitir a sua reutilização, reciclagem, recuperação ou outra técnica de aproveitamento. Já o rejeito sólido se diferencia do primeiro por possuir apenas a possibilidade de destinação final ambientalmente adequada, ou seja, não existe mais possibilidade de tratamento ou recuperação com os recursos tecnológicos existentes e economicamente viáveis (BRASIL, 2010; ABNT, 2017).

Com base no exposto, esta pesquisa adotou o termo “rejeito” por o material ainda se encontrar em fase de pesquisa, sem normas ou instruções que regulem sua utilização e sem aplicações reais que não sejam para fins de pesquisa. Assim, espera-se que, com base nos resultados positivos encontrados na Literatura (CAMPANHA, 2011; OSINUBI *et al.*; 2015; RODRIGUES e FERNANDES, 2015; BASTOS *et al.*; 2016; DANTAS, 2019; CARNEIRO, 2020), este termo possa ser reconsiderado.

Conforme mencionado, o RMF pode ser produzido por separação magnética ou flotação (CAMPANHA, 2011). Além dessa classificação quanto ao beneficiamento, o rejeito pode ser classificado de acordo com o estado físico em que se apresenta. Rejeito espessado é aquele que foi desaguado de forma parcial, mas que ainda está em forma de polpa, e possui alto teor de sólidos. Já os rejeitos em pasta são os rejeitos espessados a partir de um aditivo químico. Os rejeitos filtrados, por sua vez, podem ser a úmido, em que a sua consistência é de uma massa saturada ou quase saturada, em que não é possível mais o bombeamento, seco, ou

a seco, em que a massa está na forma não saturada e não é possível realizar o bombeamento. Estes últimos são, comumente, dispostos na forma de pilha (GOMES, 2004, CARVALHO, 2017).

Dessa forma, por se tratar de um material com potencial alternativo para a Geotecnia, requer a compreensão de suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas em seu estado puro e quando incorporado ao solo. Entre estes parâmetros, destacam-se a granulometria, densidade relativa dos grãos (G_s), limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), massa específica seca máxima ($\rho_{m\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo ($w_{\acute{o}t\imath}mo$), resistência à compressão simples (RCS), módulo de elasticidade (E), índice de suporte Califórnia (ISC), intercepto coesivo (c), ângulo de atrito (ϕ), permeabilidade (k), índice de compressão (C_c), índice de recompressão (C_r), índice de expansão (C_s), coeficiente de compressibilidade (a_v), coeficiente de variação volumétrica (m_v) e módulo de resiliência (MR) (REZENDE, 2013).

2.3.2 Propriedades física, química e mineralógica

Como já observado, é importante o conhecimento das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do rejeito de minério de ferro. Este pode apresentar heterogeneidade de suas características decorrente dos tipos do minério bruto, da posição retirada da barragem, do processo de beneficiamento e do tratamento químico utilizado na extração do concentrado (MACHADO, 2007; HU *et al*; 2017). Destaca-se, ainda, que a heterogeneidade pode estar relacionada com sua granulometria, mineralogia, densidade e forma das partículas (MACHADO, 2007; BASTOS, 2013).

Outros fatores também influenciam na variação das propriedades do rejeito. A vazão, velocidade de descarga, mudança de direção do lançamento e concentração podem modificar a granulometria do material. Além disso, as partículas de rejeito tendem a se depositar em locais de acordo com o seu tamanho, forma e, sobretudo, densidade (RIBEIRO, 2000).

Diferentemente do que ocorre para os solos naturais, a distribuição granulométrica dos rejeitos pode não possuir correlação com a composição mineralógica, uma vez que a uma sucessão de procedimentos físicos e químicos. Isso significa que, por exemplo, a fração de finos do rejeito pode não ser indicativo de presença de minerais ou argilominerais típicos dessa fração, e sim apenas algum mineral primário que foi dividido até as menores frações. Assim, estrutura cristalina, composição química e superfície específica são os fatores que influenciam diretamente nas propriedades geotécnicas (BEDIM, 2010).

Em relação à caracterização química, esta depende do mineral de origem e das substâncias químicas que foram utilizadas no processo de extração e beneficiamento (ARAUJO, 2006). Silveira *et al.* (2018), Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020) encontraram uma maior porcentagem de óxidos de ferro seguidos por óxidos de silício, enquanto Fernandes e Rodrigues (2018) obtiveram o contrário. Já Gomes (2019), realizou a caracterização mineralógica e observou a presença de quartzo, hematita e goethita.

A distribuição granulométrica de rejeitos de mineração são influenciados pelo minério de origem, o tipo de alteração sofrido, o grau de fragmentação no processo de beneficiamento e a porcentagem de argila presente (VICK, 1983; MEND, 2017). Assim, normalmente é estabelecida uma faixa de variação das frações granulométricas, sem se definir uma curva característica (VICK, 1983). Jedari *et al.* (2017) aponta que o processo da sedimentação, durante o ensaio de granulometria, pode permitir reações químicas entre o agente dispersor e as partículas do rejeito, o que interfere no resultado. Devido a isto, é recomendado que a granulometria seja realizada pelo método a laser. Junto a isso, o RMF normalmente apresenta massa específica dos grãos superior a dos solos naturais, devido à alta presença de óxidos de ferro na composição química (HU *et al.*; 2017). Além disso, a densidade pode ser influenciada pela posição de retirada do depósito, cujos valores superiores são obtidos para rejeitos de maiores profundidades (VICK, 1983).

De acordo com a pesquisa de Dantas (2015), Lara *et al.* (2018), Grasse *et al.* (2019), o rejeito apresenta tamanho de partículas que compreendem as areias finas e silte. Esse mesmo resultado foi confirmado por Silveira *et al.* (2018), Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020), que realizaram o procedimento tanto tradicional quanto à *laser*. Além disso, a massa específica dos sólidos encontrada para rejeitos nacionais foi de 2,98 g/cm³, obtida por Lara *et al.* (2018), 3,20 g/cm³ obtida por Gomes (2019), e 3,55 g/cm³, por Bastos (2015). Já o rejeito de Machado (2022) foi retirado da mesma região da pesquisa de Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020), cuja granulometria foi compatível, mas a densidade relativa dos grãos foi superior e na ordem de 3,34 g/cm³. Em relação a rejeitos de minério de ferro da China, por exemplo, estes valores apresentaram uma variação de 3,08 g/cm³ a 3,37 g/cm³. Nota-se, assim, que há uma faixa considerável de valores para massa específica dos grãos (HU *et al.*; 2017; LI E COOP, 2019).

2.3.3 Propriedades Mecânicas

Com o propósito de pesquisar a possibilidade de uso do rejeito de minério de ferro (RMF) na condição compactada em obras geotécnicas, é necessária a determinação dos parâmetros de compactação, os quais são importantes para a análise quanto a algumas aplicações e para a realização dos demais ensaios a serem empregados.

Assim, na Energia Proctor Normal, Bastos (2013) obteve os valores de massa específica seca máxima de $2,258 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade ótimo de 14,5%. Por sua vez, Dantas (2015) obteve os valores de $2,58 \text{ g/cm}^3$ para 11,5%, Cândido (2020) e Cândido *et al.* (2020), $2,130 \text{ g/cm}^3$ e 10,5%. Já Machado (2022) obteve teor de umidade ótimo de 15% e massa específica seca máxima de $2,42 \text{ g/cm}^3$.

Com relação ao Índice de Suporte Califórnia (ISC), para a Energia Normal, Bastos (2013) e Bastos *et al.* (2016) obtiveram o valor de 9% e, para a Energia Intermediária, de 29%, enquanto Campanha (2011) obteve, respectivamente, 23,46% e 40,83%, com expansões de 0,02%.

O RMF atinge valores de resistência à compressão simples (RCS) de 0,03 MPa (OLIVEIRA *et al.*; 2019) a 0,75 MPa (BASTOS, 2013; e BASTOS *et al.*; 2016), mas a maioria das pesquisas analisou esse parâmetro com o RMF misturado a outro material. Na pesquisa de Oliveira *et al.* (2013), o rejeito foi estudado para aplicação em camadas de pavimento e em aterros, na sua forma pura e misturada com cimento. Ao fazer a análise com percentuais de cimento em até 5% da massa, a resistência à compressão não confinada não atingiu o valor mínimo de 2,15 MPa para a aplicação destinada e, por regressão quadrática, esse valor seria obtido com 8,5% de cimento. Já na pesquisa de Rodrigues e Fernandes (2018), foi estudada a estabilização de solos com RMF para fins rodoviários. Obteve-se que, para o mesmo rejeito, houve perdas e ganhos de resistência, que dependiam do tipo de solo, da proporção da mistura e da energia aplicada. Por sua vez, Machado (2022) estudou a estabilização do RMF com o uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas, e obteve um valor de RCS para o rejeito de 0,15 MPa para a Energia Normal de Compactação.

Em se tratando de resistência ao cisalhamento direto (RCD), Carneiro (2020) estudou tanto o rejeito na sua forma pura quanto melhorado com polímeros e fibras. Para o rejeito puro, os valores obtidos de ângulo de atrito efetivo e coesão efetivas foram, respectivamente, $33,8^\circ$ e 8,75 kPa, para a tensão de pico, e de 31° e 0 kPa, para a tensão residual. Já na pesquisa de Coelho (2008), os valores para o rejeito puro foram de $37,6^\circ$ e 21,8 kPa. De acordo com a pesquisa de Fonseca e Vilar (2014), foi retirada da envoltória de resistência uma coesão efetiva de 40 kPa e um ângulo de atrito interno efetivo de 42° . Além disso, o autor obteve também o coeficiente de permeabilidade, retirado do ensaio de adensamento, na faixa

de 10^{-6} e 10^{-7} cm/s. Machado (2022) obteve, por meio do ensaio triaxial, valores de ângulo de atrito e coesão de, respectivamente, $32,02^\circ$ e 2,53 kPa, e valores de permeabilidade, utilizando o permeâmetro de parede flexível, à carga constante, na faixa de 10^{-6} e 10^{-5} cm/s.

Junto a esses, o Ensaio de Compressão Triaxial Dinâmico possibilita a obtenção do Módulo de Resiliência (MR), importante para o dimensionamento de pavimento flexível rodoviário. Este parâmetro está relacionado diretamente com a energia de compactação aplicada. Assim, pelo princípio do ensaio, não há um valor representativo de MR para cada material, uma vez que o seu modelo não é linear (BALBO, 2007; MEDINA e MOTTA, 2015). Entretanto, em relação aos valores máximos alcançados para os pares de tensão testado, Campanha (2011) obteve, para a Energia Normal, um valor próximo a 35 MPa e, para a Energia Intermediária, 120 MPa. Já Dantas (2019) obteve, para a Energia Normal, um valor máximo de 86 MPa e, para a Energia Intermediária, de 130 MPa.

2.3.4 Processo de disposição

O uso de barragens de contenção para a disposição de rejeitos de mineração é o método mais utilizado atualmente. Além deste método, o rejeito pode ser disposto em minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, em pilhas e por empilhamento a seco. A escolha do método considera o processo de mineração, as condições topográficas e climáticas da região, as propriedades do rejeito e o impacto ambiental (IBRAM, 2017).

As barragens são estruturas construídas com a finalidade de conter ou acumular líquidos ou misturas de líquidos (BRASIL, 2010). Devido aos custos de operação e ao volume de rejeitos, é comum utilizar o próprio rejeito para a construção do corpo da barragem, além de solo e estêreis (IBRAM, 2017).

Assim, há três principais tipos de alteamento em barragens de rejeito, conforme o deslocamento do eixo da barragem. O método de montante é considerado o mais simples e econômico, cujo eixo do dique de partida se desloca para dentro da estrutura. Este método possibilita menores custos de operação ao longo do tempo e maior velocidade na execução dos alteamentos, porém, possui o menor coeficiente de segurança devido a força de percolação da água e a sua superfície crítica de rompimento se localizar acima dos demais. No método de jusante, por sua vez, o eixo do dique de partida é deslocado para fora da barragem. Há a possibilidade de melhor controle de lançamento e compactação, o que o torna mais seguro. Entretanto, este método é o mais oneroso e o sistema ocupa maior área para a disposição. Já no método de linha de centro, o eixo do dique de partida é coincidente com os

demais alteamentos realizados. Este método é considerado como uma alternativa intermediária, e, embora a facilidade de construção seja uma vantagem, pode apresentar escorregamentos a montante caso não seja feito um bom controle de compactação (SOARES, 2010; IBRAM, 2017).

O empilhamento drenado é utilizado para disposição de rejeitos filtrados em pilhas. Diferentemente do que o nome sugere, o rejeito não se apresenta completamente seco (CARVALHO, 2017). Assim, é utilizado uma estrutura drenante que permite a saída de água dos poros do rejeito (IBRAM, 2017). As operações se constituem mais de terraplanagem, sem utilizar compactação em todo o rejeito. Esta compactação é feita, necessariamente, na superfície de ruptura crítica, de forma a aumentar a resistência ao cisalhamento e garantir a estabilidade. Este método permite, ainda, a reutilização da água para a planta de beneficiamento (CARVALHO, 2017). Na Figura 2, é ilustrado o empilhamento drenado.

Figura 2 – Empilhamento drenado de rejeito de mineração

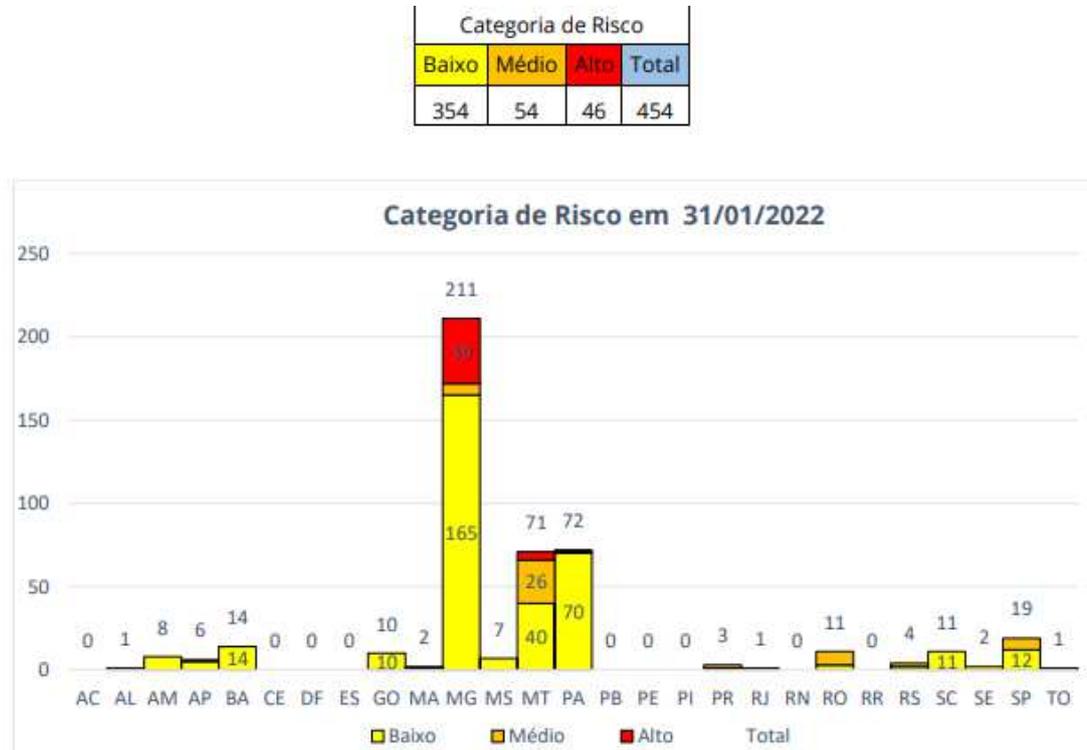


Fonte: IBRAM (2017)

Em janeiro de 2022, foram contabilizadas 905 barragens de mineração, das quais apenas 454 estão enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Desse total, 42 barragens se encontram em situação declarada de emergência. Na Figura 3, é

apresentada a relação de barragens cadastradas na PNSB de acordo com a categoria de risco e sua concentração por estado.

Figura 3 - Distribuição das barragens inseridas no PNSB, por estado e categoria de risco



Fonte: ANM (2021)

Ao analisar o gráfico da Figura 3, é possível perceber que a maioria das barragens de mineração está localizada no estado de Minas Gerais. Além disso, é nesse estado que estão concentradas quase todas as barragens com risco de rompimento. Também foi nesse estado que aconteceram os acidentes decorridos do rompimento das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e do Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019). No primeiro desastre, mais de 50 milhões de m³ de rejeito foram despejados no meio ambiente, seguidos por 13 milhões de m³ no segundo rompimento. Além de todo impacto ambiental e econômico, cerca de 320 pessoas perderam a vida nesses desastres (FREITAS *et al.*, 2019; G1, 2019).

Devido a estes acontecimentos, foi promulgada a Lei nº 23291 de 25/02/2019 (MG, 2019), que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens. No artigo 13 desta lei, é vedada a concessão de novas licenças de funcionamento e ampliação para barragens alteadas a montante. Além de vedar essas concessões, a lei instituiu o descomissionamento e a descaracterização destas barragens, segundo a Resolução nº 13 da ANM (ANM, 2022).

Diante dessa problemática, o interesse em utilizar esses rejeitos de mineração como matéria-prima para a construção tem sido despertado. Na Geotecnia, o interesse está relacionado à sua incorporação ao solo para caracterização da mistura e estudo da viabilidade de aplicação em obras geotécnicas. Na construção civil, tem-se visto pesquisas relacionadas ao aproveitamento deste rejeito na fabricação de cerâmicas vermelhas, em ladrilhos hidráulicos, em argamassas e em *pavers* (blocos pré-moldados). Nesse contexto, o tópico 2.4 apresenta estudos publicados envolvendo a aplicação de rejeito de minério de ferro em obras geotécnicas, com e sem adição de outros materiais.

2.4 O REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM OBRAS GEOTÉCNICAS

Através de uma pesquisa nos principais repositórios, anais de congresso e periódicos, foram encontradas pesquisas que estudam o reaproveitamento do RMF em obras geotécnicas, na sua forma pura e em misturas com solo (2.4.1), com adição de cimento, fibra, polímeros e outros materiais (2.4.2 e 2.4.3) e em outras aplicações com solo, sem compor obras geotécnicas (2.4.4).

2.4.1 Rejeito puro ou em misturas com solo

Silveira *et al.* (2018) realizaram a caracterização de um rejeito de Mariana (MG) para a aplicação em camadas de pavimentação. Para isto, foram realizados ensaios para o rejeito na forma pura, para o solo puro, caracterizado como cascalho de canga de minério de ferro, e para a mistura de ambos na proporção de 70% de solo e 30% de rejeito. Os ensaios realizados pelos autores foram de granulometria, densidade real dos grãos, compactação, módulo de resiliência, Microscopia Eletrônica de Varredura, caracterização química por *energy dispersive x-ray detector* (EDS), lixiviação e solubilização. Quando comparado ao solo puro, a mistura apresentou acréscimo de rigidez e viabilidade para o uso em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Já Rodrigues e Fernandes (2018) analisaram a estabilização granulométrica de um solo areno-argiloso não laterítico e de um solo argiloso laterítico de alta plasticidade com RMF. O primeiro solo apresentava granulometria de areia bem graduada, que era semelhante ao rejeito e, por isso, não contribuía para a estabilização granulométrica. Já a mistura com o segundo solo, tornou a curva mais bem graduada. Os autores realizaram os ensaios de ISC, RCS e mini-CBR, e concluíram que o solo não laterítico poderia ser aplicado em camadas de sub-

base quando fosse acrescido de 20% de rejeito. Já o solo laterítico, pode ser utilizado em camadas de base para todas as proporções, e sua resistência foi aumentada para todas as proporções de rejeito, exceto para a de 30%.

Por sua vez, Dantas (2019) objetivou analisar a aplicação de mistura de RMF a um solo laterítico para utilização em camadas de pavimento. Para tanto, foram realizados os ensaios pedidos para a classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), compactação no Mini-MCV e perda de massa. Posteriormente, foram realizados ensaios para obtenção dos índices físicos, ensaios químicos e mineralógicos. Em relação aos ensaios para analisar aplicações, foram feitos ensaios de permeabilidade, ISC, RCS e MR. De posse dos resultados, o autor obteve que a melhor mistura para aplicação nas camadas mais nobres foi a de 80% de solo e 20% de rejeito. O autor propôs, ainda, um dimensionamento de trecho de via pelo Método MeDina, DNIT e AASHTO, utilizando o *software* AEMC para fazer a retroanálise e avaliar a compatibilidade entre tensões e deslocamentos nas camadas de pavimento.

Uma proposta para utilização de rejeito como filtro de barragens foi feita por Echeverri Vergara (2012). Os rejeitos estudados se comportaram, então, como as areias que constituem esses filtros e foram obtidos pela separação magnética. Para isso, a autora realizou testes para determinar a granulometria, durabilidade, permeabilidade em condições específicas de confinamento e realizou análises químicas. Diante disso, o rejeito foi considerado um bom material para uso em filtros de barragem, o que não descartou os estudos para investigação dos efeitos da colmatação.

Ainda em relação a barragens, Mafra (2016) estudou a construção de barragens com rejeitos ciclados. Estes rejeitos são lançados por hidrociclones, que fazem a separação do rejeito em parcela grossa e fina através de uma centrifugação. A parcela grossa é a responsável pela estabilidade da barragem, já que constitui o talude à jusante, e a parcela fina é depositada no reservatório. O autor reforça, ainda, que a maioria das barragens utilizam de alteamento à montante, em que o rejeito constitui a fundação para os próximos diques. O método de rejeito ciclado constituiria, assim, alteamentos à jusante ou pela linha de centro, que são mais seguros que à montante. Por fim, é reforçado que novos estudos devem ser feitos em relação ao RMF e aos ensaios de ciclagem do rejeito em estágio duplo.

A estabilização de solos com rejeito também é alvo de pesquisas, como apresentado por Rodrigues *et al.* (2019). Nela, um solo classificado como areia argilosa e um solo, uma argila de alta plasticidade (SUCS), foram estabilizados com rejeito nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30% de rejeito em relação à massa seca total da mistura. Para obter os resultados, foram realizados os ensaios de determinação de índices físicos, compactação em equipamento

miniatura, Resistência à Compressão Simples, ISC, Mini-CBR, Mini-MCV, perda de massa por imersão e os ensaios de classificação de solos tropicais. Com isso, puderam concluir que a areia argilosa não apresentava propriedades para aplicação em camadas de pavimento, mas passou a ser aplicável em sub-base quando acrescida de 20% de rejeito. Essa mesma porcentagem (20%) também foi a melhor encontrada para beneficiar a argila de alta plasticidade, melhorando suas características.

A partir das pesquisas apresentadas, é possível perceber que a grande maioria das aplicações é relacionada às camadas de pavimentação. Isso pode ser devido ao grande consumo de material natural demandando por essas obras e pela expansão da malha rodoviária, por exemplo. Entretanto, também foram encontradas pesquisas que utilizaram o rejeito nas próprias barragens, como em corpos de barragem e filtros. Junto a isso, a aplicação de rejeito com solo é mais comum do que na sua forma pura.

2.4.2 Rejeito em misturas com solo e outros materiais

Campanha (2011) verificou as propriedades químicas, mineralógicas e geotécnicas de rejeito de flotação e de concentração magnética com vistas a aplicação em estrutura de pavimentos. Para isso, o estudo foi dividido em sete etapas. Inicialmente, os rejeitos foram coletados e preparados, além de serem submetidos aos ensaios geotécnicos. De posse dos resultados, os rejeitos foram beneficiados com cimento e ensaiados para Resistência à Compressão Simples. Feito isso, foram moldados corpos de prova para o ensaio de durabilidade por secagem e molhagem. Posteriormente, o material puro foi ensaiado para determinação do MR e para obter suas características químicas e mineralógicas. Dessa forma, a autora concluiu que os rejeitos poderiam ser usados para camadas estruturais e que essa aplicação tende a ser melhor quando o rejeito é acrescido de cimento.

Com proposta similar, Jianzhu (2013) analisou o uso de misturas de um rejeito de minério de ferro retirado de Anshan, na China, com cimento para aplicação em camadas de pavimento rodoviário. Para isso, foram feitos ensaios de composição química para analisar a reação com o cimento, além do Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada. Por fim, foi feita uma análise econômica para verificar a viabilidade da aplicação. Concluiu-se, assim, que misturas de RMF com 15% de cimento permitiam a aplicação em camadas de base de estradas com baixa circulação de veículos, e também se apresenta como uma solução mais econômica do que a normalmente utilizada no país, que é uma mistura de cimento e cascalho.

Osinubi *et al.* (2015) estudaram o efeito da mistura de RMF com um solo denominado de argila preta tropical, encontrado na Nigéria, e cimento, na proporção de 4% de cimento e 10% de rejeito da massa seca de solo. Para isto, foram feitos os ensaios de índices físicos, compactação, ensaios de resistência mecânica, ensaio de capacidade de troca catiônica, e foram estudados parâmetros de microanálise química, de partículas e mineralógica. Essa mistura, entretanto, não atendeu aos parâmetros nigerianos de aplicação em camadas de pavimento rodoviário.

Já Ghanizadeh *et al.* (2020) investigaram o uso de RMF misturado a cimento e a um solo argiloso de baixa plasticidade do Irã. Na pesquisa, foram utilizadas diversas proporções de misturas e os principais ensaios realizados foram de Resistência à Compressão Não Confinada, Módulo de Elasticidade Inicial e Resistência à Tração Indireta, para diferentes tempos de cura do cimento. Além disso, foram estudados os comportamentos em ciclos de congelamento e descongelamento. Os autores perceberam ganhos de resistência interessantes, mas a principal conclusão foi baseada na comparação da mistura completa com a mistura de apenas solo e cimento. Nesta última, precisou-se de um mínimo de 15% de cimento, valor este que foi reduzido para 12% quando misturado com 10% de RMF.

Barati *et al.* (2020) estudaram a estabilização de rejeito com cimento e com bentonita, separadamente. Este rejeito foi retirado da mina de Golgohar, no Irã, e as misturas foram submetidas a ensaios de Compactação e de Resistência à Compressão. Assim, as misturas de 10% e 15% de cimento no RMF permitiram o uso em camadas de base de pavimento, enquanto os rejeitos estabilizados com bentonita poderiam ser aplicados em camadas de cobertura no cobrimento do próprio rejeito em barragem.

Por sua vez, Coelho (2020) estudou os efeitos de um RMF estabilizado com polímeros e da mistura com fibras de polipropileno. A mistura foi confeccionada na proporção de 1:4 e 1:2 de solução polimérica e as fibras representavam 0,5% de rejeito seco. Para isso, foram realizadas caracterizações físicas, hidráulicas, químicas, mineralógicas, ambientais e mecânicas, com destaque para os ensaios do Módulo de Resiliência e da Resistência ao Cisalhamento Direto. Foi concluído, então, que ocorreu a estabilização do rejeito para as diversas solicitações. As fibras contribuíram de forma a diminuir a rigidez e a melhorar a estabilização residual. Ao se analisar possíveis aplicações, viu-se que a proporção de 1:2 seria ideal para aplicação em camadas de pavimentação.

Com base nas pesquisas apresentadas nos tópicos 2.4.1 e 2.4.2, com vistas à aplicação em obras geotécnicas, pode-se perceber que o rejeito pode ser utilizado na sua forma pura, em mistura com solo e/ou outro material, como o cimento. Normalmente, quando o rejeito é

acrescido ao solo, espera-se melhorar alguma propriedade do solo ou, apenas, substituir material natural por resíduo. Já quando é acrescido cimento ao rejeito, o que se espera é a melhora dos parâmetros mecânicos do rejeito, de tal forma que este possa ser aplicado, como visto por Campanha (2011). As outras pesquisas envolvendo a mistura de um terceiro material, entretanto, mostraram que a adição deste (predominantemente o cimento) visava melhorar a resistência das misturas em geral ou, ainda, diminuir a adição de cimento quando este fosse misturado apenas ao solo, substituindo parte da proporção de cimento pelo rejeito, como visto em Ghanizadeh *et al.* (2020). Em geral, a maioria das pesquisas demonstrou aplicação em camadas de pavimentação, mas Barati *et al.* (2020) apresentou uma finalidade para as misturas como camada de cobertura das próprias barragens de rejeito.

2.4.3 Rejeito em misturas com cimento

O rejeito de minério de ferro também foi estudado em misturas com cimento para aplicação em obras geotécnicas (OLIVEIRA *et al.*, 2013; MAFESSOLI, 2022). Nestes casos, não houve o incremento de solo.

Oliveira *et al.* (2019) estudaram a aplicação de rejeitos estabilizados com cimento em camadas de pavimento e aterros rodoviários. Para isto, dois rejeitos foram estudados na sua forma pura e melhorados com cimento nos teores de 3, 4 e 5%. Sem cimento, os rejeitos não apresentaram propriedades que permitiriam o uso sem riscos de comprometimento da estrutura, ainda que os valores de ISC estivessem conforme a norma. Entretanto, para a estabilização de 5%, o efeito cimentante garantiu maior estabilidade à mistura e elevou os parâmetros mecânicos, o que tornou favorável seu uso.

Com o intuito de avaliar o empilhamento, Mafessoli (2022) verificou o comportamento de um RMF estabilizado com cimento Portland. Para isto, o rejeito foi teve suas características físicas e químicas determinadas, que apresentaram altas frações de partículas grossas e altos teores de sílica e ferro. Foi adicionado, então, de 1 a 5% de cimento, a partir do qual rejeito e mistura foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, velocidade de pulso ultrassônico, tração por compressão diametral e ensaios de compressão triaxial drenado e não drenado. Com base nos resultados dos ensaios, viu-se que o rejeito foi estabilizado com êxito, uma vez que houve aumento de resistência, rigidez e parâmetros de cisalhamento. Isto favorece o empilhamento e a sua estabilidade.

2.4.4 Outras pesquisas

No que tange à Construção Civil, tem-se notado pesquisas relacionadas ao aproveitamento de rejeito de minério de ferro em misturas com solo e outros materiais para a fabricação de cerâmicas vermelhas (NOCITI *et al*; 2014), em blocos cerâmicos de vedação (MENDES *et al*; 2019) em ladrilhos hidráulicos (FONTES *et al*; 2018), em argamassas (HEMENERGILDO *et al*; 2021, BESSA *et al*; 2018) e em *pavers* (GUERRA *et al*; 2015; SALGADO, 2018).

Nociti *et al.* (2014) pesquisaram a incrementação de dois tipos de rejeito de minério de ferro, arenoso e lama, em blocos de cerâmica vermelha. A massa cerâmica foi cedida por uma empresa do ramo e possuía 4% de carvão e 96% de argila. Os ensaios realizados compreenderam a caracterização dos rejeitos e, para a cerâmica, a perda de massa, a retração, rugosidade e porosidade aparente. Assim, foi visto que os dois rejeitos poderiam ser utilizados para este fim, não prejudicando nenhum dos parâmetros, e que a melhor proposta foi a mistura com 7% de rejeito arenoso a massa cerâmica.

Mendes *et al.* (2019) estudou a aplicação de RMF em blocos cerâmicos de vedação com misturas de dois materiais argilosos. As misturas foram ensaiadas para caracterização física, química, mineralógica e morfológica, além de serem submetidas à prensagem. Após sua queima, foram estudados para a retração, densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água e resistência à compressão. A melhor mistura estimada foi 29,1% de rejeito em massa e atendeu a todos os critérios normativos. A sua execução correspondeu ao esperado e também foi verificada sua caracterização ambiental, classificada como não perigosa e inerte.

Nesse contexto, visualizou-se, no presente trabalho, a possibilidade de uso da modelagem computacional como ferramenta para avaliar o comportamento de corpo de prova cilíndrico a ser confeccionado com rejeito, solo e outros materiais, sendo conhecidos alguns parâmetros físicos e mecânicos iniciais desta mistura. Dessa forma, esta poderia então ser uma atividade preliminar àquela que se refere aos ensaios laboratoriais do próprio produto.

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUMAS OBRAS GEOTÉCNICAS

Conforme exposto no tópico 2.4, foram encontradas algumas aplicações de RMF em obras geotécnicas. O presente tópico apresenta considerações sobre estas principais obras,

com indicação dos principais parâmetros utilizados nas análises preliminares para aplicação. Além de obras geotécnicas, são apresentadas considerações sobre a constituição e aspectos normativos de tijolos de solo-cimento, que também constituem uma potencial aplicação do rejeito.

2.5.1 Aterros e camadas de Pavimento Rodoviário

De acordo com Franco (2007), o dimensionamento de estruturas de pavimento deve ser suficiente para que não ocorra rupturas dentro de um certo período de tempo. No Brasil, o método de dimensionamento mais adotado para pavimentos flexíveis novos, com revestimento asfáltico e camada granular, é o método do DNER, que está sendo substituído pelo Método MeDiNa. O primeiro método tem uma base empírica, que é fundamentada pelos valores do Índice de Suporte Califórnia. Sua base teórica foi formulada pelo método desenvolvido pelo Corpo de Engenheiro dos Estados Unidos e nas conclusões da Pista Experimental da AASHTO (DNER, 1981). Já o método MeDiNa foi formulado por pesquisadores da COPPE (UFRJ) em parceria com o DNIT e se baseia em um programa computacional que realiza o dimensionamento estrutural e as devidas verificações do pavimento, tanto para o tipo flexível quanto semirrígido. Assim, o método considera a Teoria da Elasticidade para modelagens lineares e não lineares aplicadas em sistemas de multicamadas e contínuo (GOMES, 2021).

Junto a isso, a IS-247 (DNIT, 2021) enfatiza que o método MeDiNa não avalia apenas os aspectos físicos e a mecânica relativa à capacidade de suporte do solo, como também avalia o desempenho do material à deformação e à resiliência. Assim, também é avaliado o dano ao longo do tempo. Como principal diferença em relação à incremento de ensaio, tem-se a execução dos Ensaios Triaxiais para determinação do módulo de resiliência (MR) e dos ensaios de deformação permanente (DP), que constituem ensaios dinâmicos. De forma simplificada, para a camada de subleito, o módulo de resiliência deverá ser igual ou superior a 50 MPa e, para as demais camadas e áreas de jazida e empréstimos, o valor deverá ser superior àquele encontrado para o subleito e todos devem apresentar acomodamento no ensaio de DP em todos os níveis de tensões. Em caso de o material não apresentar módulo de resiliência dentro do limite permitido, deve-se fazer o seu tratamento de forma a alcançar estes valores, como com a estabilização com aditivo químico ou com utilização de mistura de

solos ou areia, por exemplo. Isto também vale para o caso de os valores de expansão serem maiores do que o estabelecido pelo DNIT.

Como a presente pesquisa não tinha como propósito efetuar modelagem de camadas de pavimento no *software* MeDiNa, as análises tiveram as tabelas com os valores de ISC recomendados pelo DNIT como base comparativa do potencial de utilização do rejeito nessas camadas. Dessa forma, na Tabela 2 são apresentados os limites recomendados pelo método empírico do DNIT.

Tabela 2 – Critérios DNER para camadas de pavimento flexível

CAMADA	ISC	EXPANSÃO (sobrecarga 10 lbs)
Subleito	$\geq 2\%$.	$\leq 2\%$
Reforço de subleito	$> \text{ISC}_{\text{subleito}}$	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$. I.G.=0	$\leq 1\%$
Base	$\geq 80\%$. LL $\leq 25\%$ IP $\leq 6\%$	$\leq 0,5\%$

Fonte: (DNER, 1981).

Os corpos de aterro também possuem uma norma com valores de ISC e expansão mínimos para aprovação do material, a norma DNIT 108/2009-ES (DNIT, 2009). Assim, esta norma define esses aterros como os segmentos de rodovia que requerem depósitos advindos de corte e/ou de empréstimos dentro dos limites da seção de projeto da faixa terraplanada. O corpo de aterro é, então, a camada acima do terreno natural até 60 cm abaixo da cota do greide de terraplenagem, em que esta camada de 60 cm de espessura corresponde à chamada camada final. Os materiais para a constituição do corpo de aterro devem possuir $\text{ISC} \geq 2\%$ e expansão $\leq 4\%$ para a Energia Normal de Compactação e, para a camada final, o maior ISC possível e expansão $\leq 2\%$ para a Energia Intermediária.

2.5.1.1 Faixas granulométricas de referência

Além das especificações apresentadas, as bases estabilizadas granulometricamente devem satisfazer a uma das faixas de serviço recomendadas pela norma DNIT 141 (DNIT, 2010), de acordo com o volume de tráfego. As faixas granulométricas de referência em

questão são apresentadas na Tabela 3. Já para as demais camadas, não é necessário seguir o especificado.

Tabela 3 – Faixas granulométricas recomendadas para bases estabilizadas granulometricamente

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"		75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	55-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	15-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT (2010)

2.5.1.2 Módulo de Resiliência (MR)

De acordo com o apontado por Medina e Mota (2015), a resiliência é um parâmetro intrinsecamente ligado à capacidade de um material, quando submetido a uma carga, de retornar ao seu estado inicial após sofrer uma deformação. Em outras palavras, o módulo de resiliência é a capacidade de um material de recuperar suas deformações de forma reversível, garantindo que não haja um histórico permanente de deformações após a aplicação da carga. Este parâmetro é um importante dado para o dimensionamento mecanístico-empírico dos pavimentos flexíveis.

Na maioria dos casos, os materiais não apresentam comportamento elástico-linear do módulo de resiliência. As britas graduadas, por exemplo, possuem seu MR variável em cada ponto de sua espessura. Torna-se necessário, então, que sua análise empregue modelos não lineares para a determinação das deformações e tensões, o que não possibilita utilizar as equações da lei de Hooke, por exemplo (BALBO, 2007; MEDINA e MOTTA, 2015).

Para a obtenção desse parâmetro, é utilizado o ensaio triaxial de cargas repetidas. Este ensaio se baseia na aplicação simultânea de uma tensão confinante (σ_3) e de uma tensão desvio (σ_d). A tensão desviadora é aplicada verticalmente no topo do corpo de prova, de

forma cíclica, e a tensão confinante é aplicada de forma constante. Assim, são simuladas diferentes condições de sollicitação a que este material será submetido em campo. O módulo de resiliência pode ser expresso, então, pela Equação 1 (MEDINA e MOTTA, 2015).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}, \varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência;

σ_d = Tensão desvio;

ε_r = deformação específica axial resiliente;

Δh = deslocamento vertical máximo; e

h_0 = altura inicial do corpo de prova.

Dessa forma, foram criados modelos matemáticos que buscam expressar as melhores relações entre os estados de tensão e o MR. Normalmente, esses modelos consideram a granulometria do solo, que deve ser conhecida previamente para a adoção correta do modelo. O modelo $K-\sigma_3$ (Equação 2) é melhor utilizada para solos granulares e o modelo $K-\sigma_d$, para solos finos (Equação 3) (CUNTO, 1998).

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$MR = K_1 \times \sigma_d^{K_2} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência;

σ_3 = Tensão confinante;

σ_d = Tensão desvio; e

K_1 e K_2 = coeficientes de regressão, diferentes para cada modelo.

Junto a esses, Macedo (1996) propôs um modelo que considera as duas tensões envolvidas e tenta ser representativo para qualquer granulometria de solo, denominado de modelo composto e expresso pela Equação 4.

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3} \quad (\text{Equação 4})$$

MR = Módulo de Resiliência;

σ_3 = Tensão confinante;

σ_d = Tensão desvio; e

K_1 , K_2 e K_3 = coeficientes de regressão.

Assim, a escolha do modelo matemático para a representação de MR depende da escolha do projetista. O módulo de resiliência, então, não é comumente expresso por um número nos modelos brasileiros de análise. Diferentemente dos outros parâmetros mecânicos geotécnicos, a comparação entre os materiais não pode ser feita de forma pontual. Neste estudo, entretanto, para realizar uma análise prévia da mudança de comportamento do solo quando adicionado rejeito, foi adotado o MR médio obtido de cada ensaio triaxial dinâmico para verificar o possível ganho de rigidez, conforme feito por Andalicio *et al* (2020). Além disso, as equações obtidas foram analisadas de acordo com a consideração do Guia de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO (2002), que indica que os valores de R^2 superiores a 90 são mais indicados para o estudo do comportamento resiliente.

2.5.2 Camadas de cobertura de Aterro Sanitário

Dentre as utilizações de solo como matéria-prima para as obras geotécnicas, destaca-se a aplicação em camadas de cobertura, as quais são frequentemente utilizadas em aterros sanitários. Costa (2015) ressalta que os projetos de aterros sanitários devem funcionar de forma segura para o armazenamento dos resíduos sólidos, de tal forma que impeça a infiltração de líquidos pelo interior e ajude a prevenir a produção de lixiviados. Além disso, isto também permite o aproveitamento do biogás e possibilita uma maior eficiência na produção e captação do metano na massa de resíduos. Dessa forma, a cobertura serve para a ligação do interior dos resíduos confinados com o ambiente e dificulta tanto a infiltração de águas pluviais quanto a emissão de gases para a atmosfera.

Nesse contexto, as camadas de cobertura podem ser classificadas em cobertura convencional, coberturas evapotranspirativas e camadas oxidativas. As primeiras são aquelas que utilizam solo natural argiloso ou camadas intercaladas desse solo com geossintéticos, que visam impermeabilizar a camada superior de cobertura. Já as coberturas evapotranspirativas utilizam componentes do balanço hídrico, com pelo menos uma camada de solo para a retenção da água, que será transpirada pela vegetação e evapotranspirada pelo solo. Nestas

camadas, a capacidade de armazenamento de água é mais procurada do que materiais com baixa permeabilidade. Por fim, as coberturas oxidativas utilizam materiais que criam condições favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos que consomem metano. Estas camadas são interessantes para aterros em que a exploração do biogás não é viável tecnicamente, o que favorece a redução das emissões dos gases para a atmosfera (COSTA, 2015).

Em relação ao dimensionamento destas camadas, existem duas normas brasileiras que auxiliam nesse processo. A NBR 8419 (ABNT, 1992) determina as condições mínimas exigidas para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Já a NBR 13896 (ABNT, 1997) fixa os critérios para projeto, implantação e operação de aterros. É salientado, então, que o projeto deve ser feito de tal forma que minimize a infiltração de água, exija pouca manutenção, não permita a erosão, evite fratura e apresente coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da base do aterro.

Dessa forma, as argilas compõem os materiais mais utilizados nas camadas de cobertura de aterros sanitários. A permeabilidade desejada para os solos argilosos, componentes do depósito natural, é de 10^{-8} m/s. Já a área de subsolo do aterro deve possuir permeabilidade inferior a 5×10^{-7} m/s, que pode, a critério do projetista, ser superior, desde que não ultrapasse 10^{-6} m/s (SANTOS, 2009; ABNT, 1997). Não há, contudo, valores de limite normativo para as camadas de cobertura. Já para camada final, devido aos critérios de impermeabilização, é recomendada que a permeabilidade seja inferior a 10^{-8} m/s.

Além disso, caso possuam alta plasticidade, poderão reter grandes quantidades de água, superiores ao seu peso próprio. Entretanto, ainda que as argilas compactadas possibilitem baixos coeficientes de permeabilidade, ainda estão suscetíveis a um alto potencial de retração e expansão. Com isso, pode haver o surgimento de fissuras e trincas na cobertura, que poderão proporcionar o desenvolvimento de caminhos preferenciais para a infiltração de água e permitir o vazamento de gases no interior do maciço (HAMDI & SRASRA, 2013).

Conforme visto, o material de cobertura de aterro sanitário deve ser submetido a análises e ensaios para a confirmação da possibilidade de utilização. No caso da pesquisa, foi optado por verificar se o coeficiente de permeabilidade dos materiais em estudo está de acordo com o mínimo normativo para utilização em camadas de cobertura de aterro sanitário.

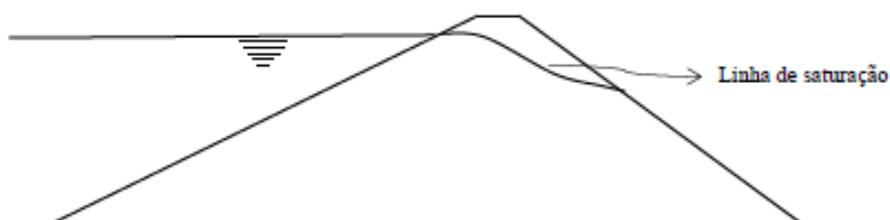
2.5.3 Corpo e filtro de Barragem de Terra

O projeto de construção de uma barragem de terra deve prever uma série de estudos que atendam a fatores tais como a finalidade, condições locais e problemas econômicos em relação a escolha do local e tipo de barragem. Para a construção da barragem, então, todos esses fatores devem ser levados em conta (ESTEVES, 1964 *apud* ECHERRI VERGARA, 2012). Assim, Geraldles (2002) aponta que as barragens de terra devem permitir uma impermeabilização que impeça a perda de água ao longo do maciço e um projeto que garanta a estabilidade. Além disso, o talude à montante deve ser protegido contra ondas, os sistemas de drenagem devem proteger contra a poro-pressão, e deve haver o controle de assentamento das barragens ao longo do tempo.

Junto a isso, é interessante que o local de instalação da barragem possua disponibilidade de solo argiloso, siltooso e arenoso. O corpo da barragem de terra é moldado em forma trapezoidal homogênea e zonada, cujos materiais cumprem diferentes funções. De forma resumida, o corpo da barragem deve ser constituído de núcleo argiloso para impedir a percolação de água, maciços estabilizados a montante e a jusante desse núcleo para garantir a estabilidade, proteções do talude de jusante contra o intemperismo e um conjunto de filtros e drenos para formar zonas de escoamento de água nessas barragens (ECHERRI VERGARA, 2012).

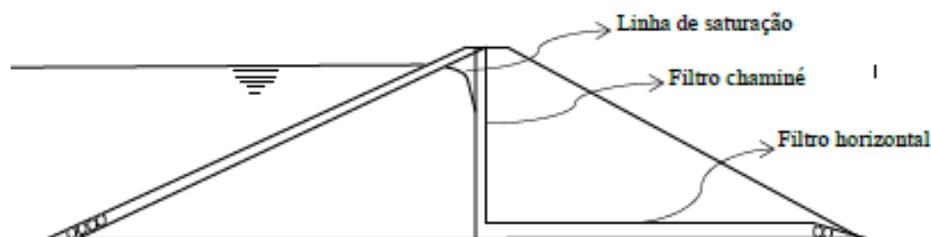
Assim, uma barragem homogênea é constituída em sua predominância de solo compactado com, no mínimo, uma proteção contra ondas no talude de montante (MARSAL E RESENDIZ, 1975). Já as barragens homogêneas com filtros possuem a diferença de possuir um filtro de areia bem graduada na base do aterro, de tal forma a impedir que a água não intercepte o talude de jusante. Além disso, pode-se incluir um filtro vertical ou uma chaminé conectada ao filtro horizontal para os casos em que os materiais no maciço e transições são suscetíveis ao trincamento e os materiais da fundação são compressíveis (ECHERRI VERGARA, 2012). Dessa forma, são apresentadas nas Figura 4 e Figura 5, respectivamente, uma barragem homogênea e uma barragem homogênea com filtro vertical e horizontal.

Figura 4 - Barragem de terra homogênea



Fonte: Echerri Vergara (2012)

Figura 5 - Barragem de terra homogênea com filtro vertical e horizontal



Fonte: Echerri Vergara (2012)

Dessa forma, os filtros, drenos e transições são responsáveis por controlar os fluxos de percolação nas barragens de terra de seção homogênea (ANA, 2016). De acordo com Echerri Vergara (2012), o material do filtro deve ser fino de tal forma que seja dificultado o carregamento das partículas e também grosso o suficiente para que as forças de percolação desenvolvidas interiormente sejam pequenas. Assim, os materiais para filtros devem, ao mesmo tempo, evitar a erosão interna, através de vazios suficientemente pequenos, e possuir permeabilidade suficientemente grande para permitir a passagem livre do fluxo.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2016) recomenda alguns critérios para o dimensionamento desses filtros, drenos e transições. Esses dimensionamentos seguem os critérios convencionais de transição granulométrica dos materiais adjacentes e são utilizados pelo *US Soil Conservation Service*, o *US Bureau of Reclamation* e o *US Army Corps of Engineers* (USDA SCS, 1986; USBR, 1987; USACE, 1994, *apud* ANA, 2020). Assim, a Tabela 4 apresenta critérios para filtro e, a Tabela 5, apresenta os critérios de D_{10} e D_{90} para prevenir a segregação. O diâmetro das partículas dos materiais a serem protegidos é dado por “d” e o diâmetro das partículas do material do filtro é dado por “D”, que também podem ser considerados, respectivamente, pelo valor médio da faixa e pelo limite superior da faixa.

Tabela 4 – Critério de filtro

Categoria do solo de base	Descrição do solo de base e % de material passado na Peneira N° 200 (0,074mm) (nota 1)	Critério de filtro (nota 2)
1	Argilas e siltes finos; Mais de 85%	$D_{15} \leq 9d_{85}$ (nota 3)
2	Areias, silte, argilas e areias argilosas e siltosas; 40 a 85%	$D_{15} \leq 0,7$ mm
3	Areias siltosas e argilosas; 15 a 39%	$D_{15} \leq 0,7$ mm (nota 4 e 5)
4	Areias e cascalhos; Menos de 15%	$D_{15} \leq 4d_{85}$ (nota 6)

Notas:

1. A designação da categoria do solo refere-se à fração do material passada na Peneira N°4, ou seja, a percentagem é determinada a partir da curva granulométrica do solo de base, ajustada a 100% passando na peneira N° 4 (4,76mm).
2. A dimensão máxima das partículas dos filtros deve ser de 75mm, e um máximo de 5% das partículas deve passar na peneira N° 200 (0,074mm); os finos devem ter um índice de plasticidade nulo. É conveniente utilizar a relação entre D_{90} e D_{10} do Quadro 9 para estabelecer a granulometria do filtro. Estes critérios conduzem à utilização de granulometrias uniformes para os filtros, o que previne a segregação, durante a construção. Para garantir uma permeabilidade adequada, os filtros devem apresentar uma dimensão D_{15} igual ou superior a $4d_{15}$, mas não inferior a 0,1mm.
3. Quando o valor de $9d_{85}$ é inferior a 0,2mm, é conveniente utilizar 0,2mm.
4. A percentagem de material passada na Peneira N° 200 (0,074 mm), após o ajustamento da granulometria (ou seja, da fracção passada na Peneira N° 4).
5. Quando o valor de $4d_{85}$ é inferior a 0,7mm, é conveniente utilizar 0,7mm.
6. Para a categoria 4, o valor de d_{85} deve ser determinado, a partir da curva granulométrica integral do solo de base, sem ajustamento para as partículas superiores a 4,76mm.

Fonte: Adaptado de ANA (2016)

Tabela 5 – Limites para prevenir segregação

D_{10} mínimo (mm)	D_{90} máximo (mm)
< 0,5	20
0,5 a 1,0	25
1,0 a 2,0	30
2,0 a 5,0	40
5,0 a 10	50
10 a 50	60

Fonte: Adaptado de ANA (2016)

Nota-se, assim, que devem ser realizados vários ensaios e análises antes de selecionar um material para compor o corpo e filtro de barragem. Entretanto, os valores apresentados nas Tabelas 4 e 5 servem como referencial para se prosseguir com o estudo. Assim, estas tabelas foram utilizadas para verificar se os materiais em estudo atendem aos critérios mínimos apresentados. Para este caso, é necessário que a análise feita considere as distribuições granulométricas dos materiais.

2.5.4 Tijolo de Solo- Cimento

De acordo com a norma NBR 8491 (ABNT, 2012), é chamado de tijolo constituído de solo-cimento o componente de alvenaria formado da mistura homogênea, compacta e endurecida de cimento Portland, solo e água, podendo ser acrescentados aditivos e pigmentos, e cuja altura é menor que sua largura. Esses tijolos podem ser divididos em maciços e vazados, em que o primeiro apresenta volume igual ou superior a 85% do seu volume total aparente e o segundo, além de apresentar volume inferior a 85%, também apresenta furos verticais.

Em relação à dimensão desses elementos, a sua forma deve ser de um paralelepípedo de comprimento C, largura L e altura H. A norma divide, assim, os tijolos em duas categorias de acordo com as suas dimensões nominais recomendadas. Os tijolos “tipo A” apresentam C=200, L=100 e H=50, e os tijolos “tipo B” apresentam C=240, L=120 e H=70, em milímetros.

Por sua vez, em relação à resistência à compressão, a média dos valores não pode ser inferior a 2,0 MPa e o valor individual, inferior a 1,7 MPa, a partir dos sete dias. Já a absorção de água não pode possuir média dos valores superior a 20% e nem valores individuais superiores a 22%, a partir dos sete dias.

Além dos valores especificados por esta norma, outros parâmetros são importantes de serem atendidos. O Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia (CEPED) recomenda que o teor de areia esteja entre 45 e 90% do material; o teor de silte+argila entre 10 e 55%; o teor de argila seja inferior a 90% e o limite de liquidez seja inferior a 45% (CEPED, 1984). Já a norma NBR 10833 (ABNT, 2012) recomenda que o solo apresente granulometria inferior a peneira n°4 e que possua de 10 a 50% de material passante na peneira n° 200, além de $LL \leq 45\%$ e $IP \leq 18\%$.

De acordo com o apontado por Nascimento (2015), os critérios de dosagem do solo-cimento seguem os parâmetros adotados para base de pavimento rodoviários. A dosagem deve ser feita, então, de forma que a proporção de volumes dos materiais atenda ao referido pela norma.

Na presente pesquisa, buscou-se verificar parâmetros mecânicos, como RCS e módulo de elasticidade, de uma mistura de solo, rejeito, areia e cimento. Para tanto, foi necessário verificar se a mistura apresentava as propriedades físicas indicadas pela norma NBR 10833 (ABNT, 2012) antes da realização dos ensaios e modelagens, e se estes parâmetros mecânicos estavam de acordo com a norma NBR 8491 (ABNT, 2012). O *software* PLAXIS 2D possibilita realizar modelagens em duas dimensões através do método dos elementos finitos. É possível simular um corpo de prova cilíndrico utilizando-se a modelagem do tipo axi-simétrica. O programa é voltado, principalmente, para a engenharia geotécnica e para a mecânica das rochas (BENTLEY, 2023). Para cada modelagem, pode-se adotar o estado plano de deformações ou o axissimétrico. O programa permite a modelagem de blocos em 2D e a simulação de ensaios e, para isso, é necessário informar, sobretudo, o módulo de elasticidade dos materiais (E), o coeficiente de Poisson (ν), o ângulo de atrito (φ) e intercepto coesivo (c). Este programa foi utilizado no presente trabalho para a modelagem de um corpo de prova cilíndrico de solo, areia, rejeito e cimento para um teor de 10% de cimento e utilizou o modelo constitutivo elasto-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, encontram-se os materiais e os métodos utilizados. Os métodos consideram os ensaios laboratoriais e a modelagem computacional.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram o solo, o rejeito de minério de ferro, as misturas de rejeito e solo, e a mistura de solo, areia, rejeito e cimento. Assim, são apresentados os materiais na forma pura e as correspondentes misturas. Os parâmetros já conhecidos dos materiais são também apresentados neste tópico.

3.1.1 Solo

O solo estudado foi retirado de um talude próximo à Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão (PROINFRA) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Na Figura 6 é mostrado o talude de retirada do solo. Este solo já é conhecido de pesquisas anteriores feitas na Universidade Federal de Juiz de Fora (ROSA E OLIVEIRA, 2015 *apud* SILVA, 2019, CANDIDO *et al.*; 2020; CÂNDIDO, 2020; BARLETTA, 2021). O interesse em utilizá-lo é devido ao seu caráter residual, tendo sido classificado pelo perfil litológico como maduro, possuindo fração predominantemente argilosa. Dessa forma, alguns resultados obtidos por estas pesquisas citadas foram utilizadas neste trabalho e o material só será ensaiado, na forma pura, para os ensaios especificados no item 3.2.

Figura 6 - Talude de retirada do solo



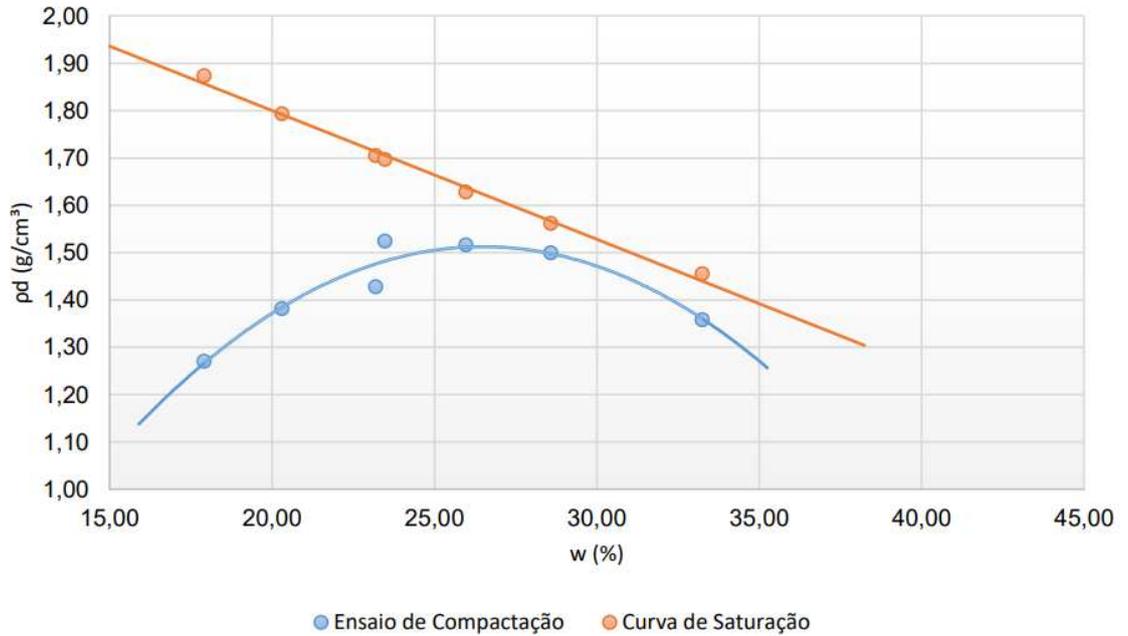
Fonte: Autora (2023)

De forma a verificar se haveria alguma variação na jazida de retirada do solo, foram repetidos os ensaios de granulometria e densidade real dos grãos, além dos limites de consistência. Os resultados foram comparados com Barletta (2021) e se mostraram muito similares, conforme apresentado no capítulo de Resultados e Discussões (tópico 4.1.2). Assim, a granulometria do solo obtida por Barletta (2021) foi de 57,1% dos grãos correspondente a fração argila, 8,4% a fração silte, 33,6% a fração areia e 0,9% a fração pedregulho, cuja densidade real do grão foi de 2,81.

A caracterização química do solo apresentou 43,5% de óxido de alumínio, seguido de 26,5% de óxido de ferro e 25,2% de óxido de silício (CANDIDO *et al.*; 2020; CÂNDIDO, 2020). Já a classificação mineralógica do solo mostrou “picos predominantes dos minerais Caulinita, Quartzo e Feldspato, além de picos de Ilita e Mica para a fração de areia” (ROSA E OLIVEIRA, 2015 *apud* SILVA, 2019). Em relação aos parâmetros ótimos de compactação na Energia Normal e sem reuso de material, foi obtida massa específica seca máxima de 1,54 g/cm³ para um teor de umidade ótimo de 26,8%, conforme curva de compactação apresentada

na Figura 7. E, para esta mesma energia, o ISC correspondente foi de 6%, com expansão de 0,1% (BARLETTA, 2021).

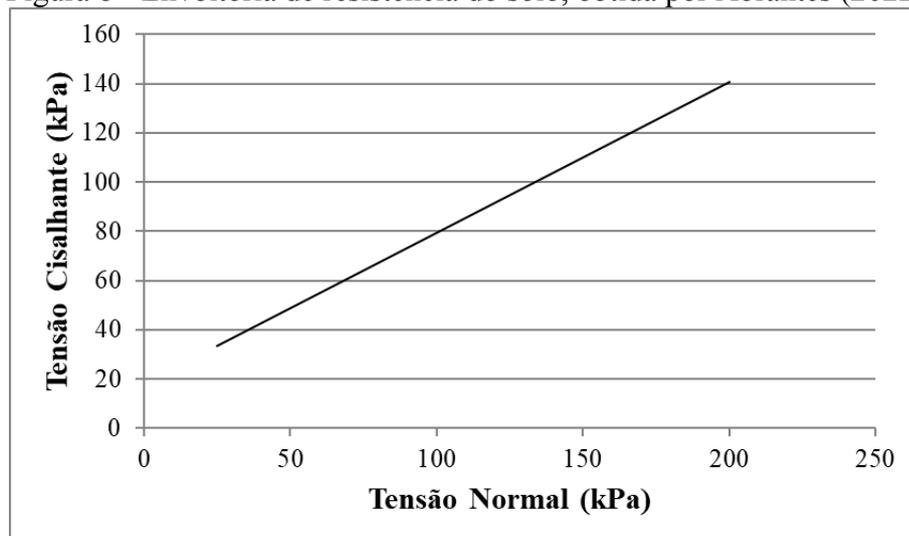
Figura 7 – Curvas de compactação e saturação do solo puro.



Fonte: Barletta (2021)

Além destes parâmetros, na pesquisa realizada por Abrantes (2022), foi obtida, para a Energia Normal de compactação, a envoltória de resistência (Figura 8) através do Ensaio de Cisalhamento Direto (ASTM, 1998). Dessa forma, o ângulo de atrito efetivo do solo foi de $35,2^\circ$ e o intercepto coesivo de 17,9 kPa.

Figura 8 - Envoltória de resistência do solo, obtida por Abrantes (2022)



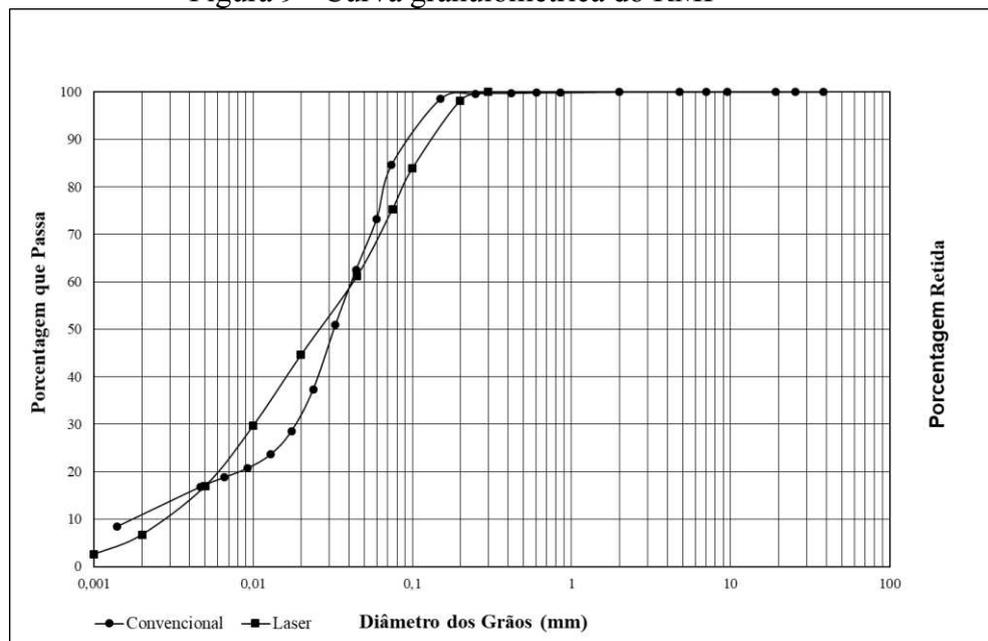
Fonte: Modificada de Abrantes (2022)

3.1.2 Rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro foi retirado de camadas controladas nas pilhas de rejeito filtrado e cedido por uma mineradora localizada em Congonhas – MG. O minério de origem deste rejeito é o itabirito, de acordo com informações da companhia.

Alguns ensaios de caracterização física, química e compactação foram realizados por Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020), cujos resultados foram utilizados nesta pesquisa. Assim, o rejeito possui granulometria com predominância de silte, cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 9 e essa granulometria foi obtida tanto pelo método convencional quanto a *laser*. Por sua vez, a densidade dos sólidos obtida foi de 2,925. Além disso, o rejeito foi classificado como não plástico, uma vez que não foi possível moldá-lo como a norma do ensaio de limite de plasticidade recomenda pela NBR 7180 (ABNT, 2016).

Figura 9 - Curva granulométrica do RMF

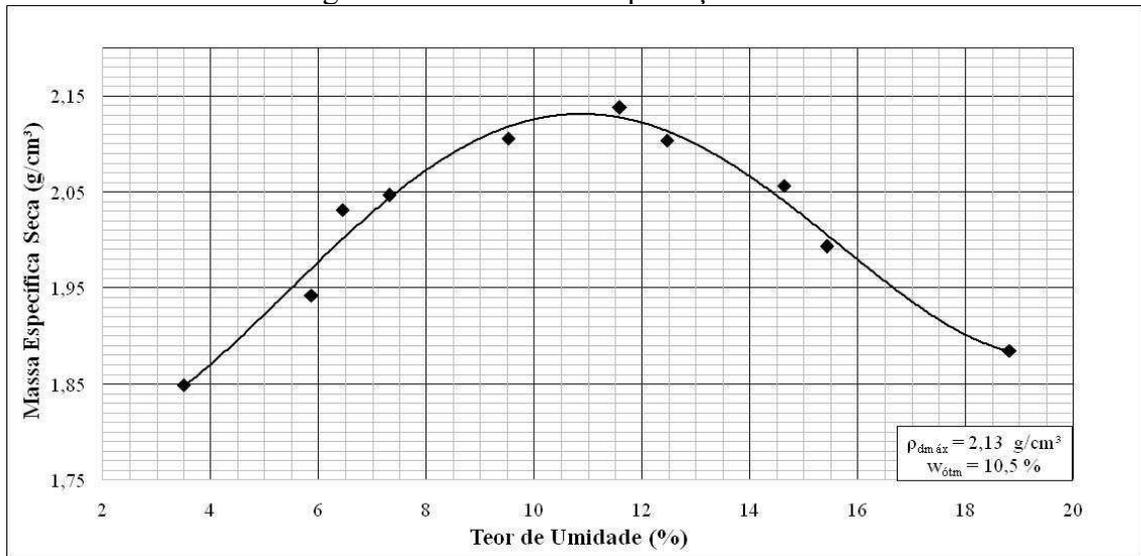


Fonte: Cândido *et al.* (2020)

Em relação à constituição química, o rejeito mostrou 56,5% de óxido de ferro seguido por 32,2% de óxido de silício (CÂNDIDO *et al.*; 2020).

Para a compactação na Energia do Proctor Normal, de acordo com a NBR 12023 (ABNT, 2012), a massa específica aparente seca máxima encontrada foi de 2,130 g/cm³ e o teor de umidade ótima de 10,5% (CÂNDIDO *et al.*; 2020), conforme curva de compactação apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Curva de compactação do RMF

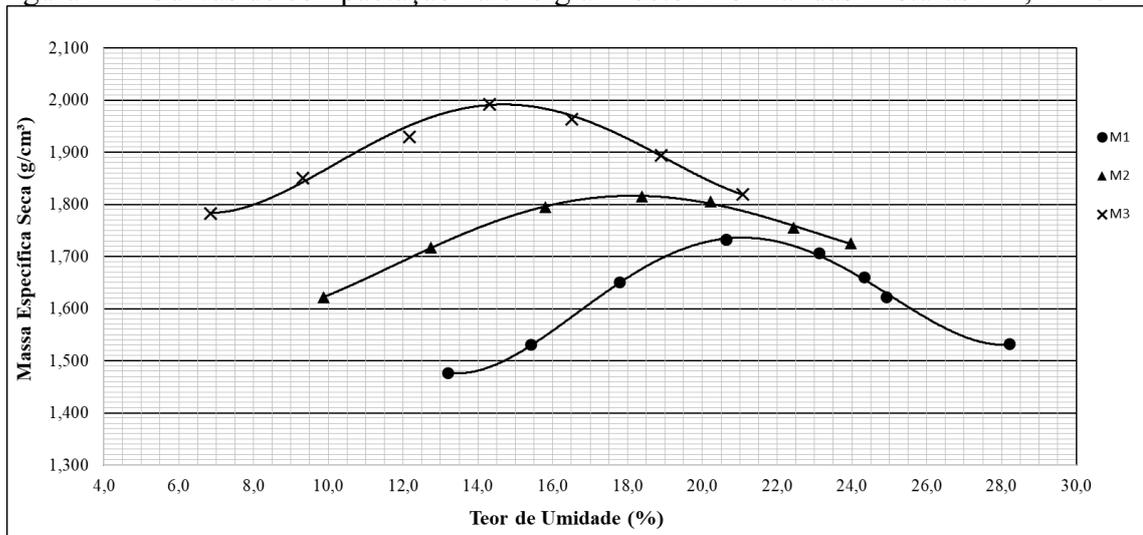


Fonte: Cândido *et al.* (2020)

3.1.3 Misturas de rejeito com solo

As misturas seguiram o que foi idealizado por Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020), nas porcentagens em relação a massa total da mistura seca de 25%, 50% e 75% de rejeito com o solo residual maduro. Essas misturas foram denominadas, respectivamente, de “M1”, “M2” e “M3”. Os valores dos parâmetros ótimos de compactação na Energia do Proctor Normal, com reuso de material e cilindro pequeno, também foram obtidos pelos autores, cujas curvas são mostradas na Figura 11. Assim, os valores dos parâmetros de compactação, massa específica seca máxima e teor de umidade ótima, foram de 1,735 g/cm³ e 21,4%, 1,819 g/cm³ e 18,3%, e 1,991 g/cm³ e 14,7%, respectivamente, para as misturas M1, M2 e M3. Foi constatado, ainda, que, à medida que se acrescentava rejeito, diminuía o teor de umidade ótima e aumentava a massa específica seca máxima.

Figura 11 - Curvas de compactação na energia Proctor Normal das misturas M1, M2 e M3



Fonte: Cândido *et al.* (2020)

3.1.4 Mistura de solo, areia, rejeito e cimento

Com o propósito de verificar se a mistura de rejeito com solo e cimento cumpre com os requisitos adotados para material de confecção de um tijolo de solo-cimento, foram realizados ensaios físicos e mecânicos, cujos resultados foram comparados com os obtidos por meio de modelagem no programa PLAXIS 2D. Além do solo e do rejeito, utilizou-se uma areia média, natural e retirada do Rio Preto, adquirida de uma loja de Materiais de Construção em Juiz de Fora (MG). Já o cimento escolhido para a mistura, por apresentar facilidade de obtenção na região, foi o CP III – E – 32. A referida mistura foi nomeada, então, de M.

3.2 MÉTODOS

A presente pesquisa buscou realizar ensaios para caracterização mecânica do solo e rejeito puros e também dessas misturas, com vistas a analisar a influência da adição do rejeito na mistura com solo e avaliar possíveis aplicações em obras geotécnicas. Para a obtenção dos parâmetros utilizados para modelagem computacional dos tijolos e/ou blocos, foram realizados os ensaios recomendados pela norma NBR 8491 (ABNT, 2012) para a caracterização dos materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova e NBR 10833 (ABNT, 2012) para verificação dos valores mínimos de resistência à compressão simples.

Para os ensaios que incluíam moldagem de corpo de prova compactado, foi adotado um padrão de aceitação dos CP's antes de serem submetidos aos ensaios propriamente ditos. Esse padrão garantia que o CP compactado apresentasse uma taxa mínima de semelhança com

os parâmetros de compactação ótimos de cada material na Energia Normal. Além disso, essa operação foi feita para diminuir a variação entre as características de cada CP. Assim, foi fixado que a massa específica seca obtida não poderia diferir mais do que 5% do $p_{dm\acute{a}x}$ retirado da curva de compactação. Conseqüentemente, o teor de umidade deveria estar o mais próximo possível para manter essa relação, além de não variar mais do que 2%. Para manter esse controle, os corpos de prova eram imediatamente pesados após a compactação e, com o seu volume definido, era calculada a massa específica úmida. Com o valor do teor de umidade ótimo teórico, era calculada a massa específica seca, que posteriormente era conferida com o valor real do teor de umidade obtido pelo método da estufa (ABNT, 2016). Por fim, dividindo-se a massa específica encontrada pela teórica, o valor não poderia ser inferior a 95%.

3.2.1 Coleta e Preparação de Amostras

As amostras de solo, retiradas do talude da PROINFRA, foram coletadas seguindo o procedimento da norma NBR 9604 (ABNT, 2016a) e preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016b). Inicialmente, o solo foi disposto em bandeja (Figura 12) para secagem ao ar até atingir o teor de umidade higroscópico e retirada de matéria orgânica manualmente. Na seqüência, foi destorroado com uso de mão de gral e almofariz (Figura 13) e, por fim, realizado o quarteamento a fim de obter a quantidade de amostra necessária para cada ensaio previsto.

Figura 12 - Solo disposto em bandeja para secagem ao ar



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 13 - Solo destorroado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Já o rejeito de minério de ferro, cedido e coletado por uma empresa de mineração localizada em Congonhas - MG, foi transportado até ao laboratório de Mecânica dos Solos da UFJF por esta empresa. Para a preparação deste material, foram seguidas as mesmas normas utilizadas para solos. Assim, o rejeito foi preparado de forma similar ao solo, com a exceção de que não foi observada matéria orgânica. Nas Figuras 14 e 15 são ilustradas as etapas para a preparação do rejeito.

Figura 14 - RMF disposto em bandeja para secagem ao ar



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 15 - RMF destorroado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Por sua vez, a areia foi cedida pelo Laboratório de Materiais de Construção da UFJF e preparada conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016b). Na Figura 16 é apresentado o material após secagem ao ar.

Figura 16 - Areia após secagem ao ar



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.2.1.1 Preparo das misturas

Para as misturas de solo e rejeito (misturas M1, M2 e M3), os materiais puros foram secos ao ar, destorroados e foram determinados os seus teores de umidade, conforme NBR 6457 (ABNT, 2016). As misturas foram, então, preparadas de acordo com a quantidade de massa de cada material correspondente a mistura total seca.

Já para a mistura de rejeito, solo, areia e cimento (mistura MC), tanto os ensaios mecânicos quanto a modelagem foram realizados para corpos de prova cilíndricos. Desta forma, foi necessário obter e caracterizar a mistura para este fim.

O solo utilizado neste estudo não apresentou previamente as condições recomendadas pela norma NBR 10833 (ABNT, 2012) em relação à granulometria (de 10% a 50% de material passante na peneira #200 com abertura de malha de 75 μm). Para a correção granulométrica, foi necessário acrescentar areia, que contém as frações de interesse.

Com a granulometria do solo e do rejeito previamente conhecidas de outras pesquisas (BARLETTA, 2021; CÂNDIDO, 2020), foi proposta uma mistura na proporção de 35% de areia, 30% de solo e 35% de rejeito em relação à massa seca total, constituindo assim um novo material com solo-rejeito-areia. Essas proporções foram escolhidas de forma a atender tanto a granulometria desejada quanto a usar o máximo de rejeito possível. Além disso, a proporção foi reanalisada após a caracterização do novo material a fim de verificar se a granulometria e os limites de consistência estavam conforme a recomendado pela norma NBR 10833 (ABNT, 2012).

Por fim, para o preparo da mistura a ser constituída pelo novo material e por cimento, estes representaram 90% e 10% da massa total seca, respectivamente, de acordo com as proporções observadas nas pesquisas de Espóstio *et al.* (2014) e Gomes *et al.* (2022). Os materiais constituintes foram utilizados após secos ao ar, destorroados (solo e rejeito), e determinados os teores de umidade higroscópico, conforme NBR 6457 (ABNT, 2016). Primeiro foram misturados, na seguinte ordem, o rejeito, a areia, e o solo (Figura 17). Após homogeneizar os materiais secos, foi adicionado o cimento, imediatamente homogeneizados, e, logo em seguida, a água (Figura 18).

Figura 17 - Materiais secos da mistura M: a) RMF, b) acréscimo de areia, c) acréscimo de solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 18 - Homogeneização dos materiais com: a) cimento, b) acréscimo de água



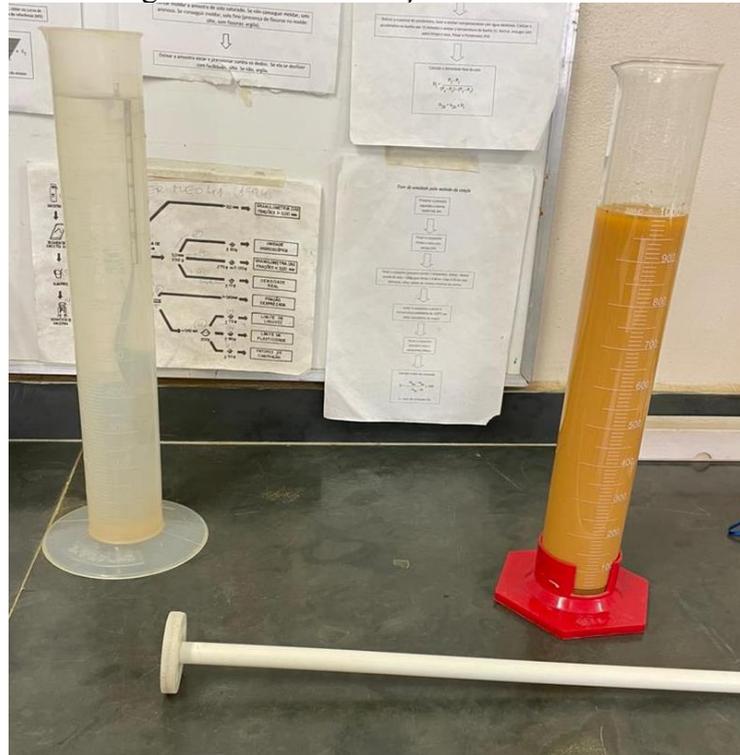
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.2.2 Ensaio de granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência

O solo utilizado neste trabalho já foi previamente estudado em outras pesquisas. Para verificar se as características das amostras desse solo se mantiveram similares, foi proposta a repetição dos ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência. Além disso, os componentes do tijolo de solo-cimento também precisaram que alguns índices fossem determinados.

Assim, a curva granulométrica foi obtida de acordo com o recomendado pela NBR 7181 (ABNT, 2016), que fixa os procedimentos para a determinação da análise granulométrica, através dos ensaios de sedimentação e/ou peneiramento. Este ensaio foi realizado para o solo, para as três misturas e para a areia de rio. As Figuras 19 e 20 mostram a etapa de sedimentação e peneiramento fino, respectivamente.

Figura 19 - Sedimentação do solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

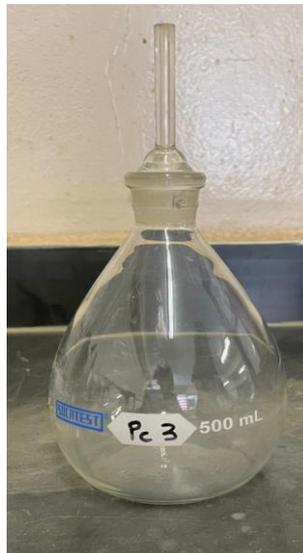
Figura 20 - Peneiramento fino do solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A densidade real dos grãos foi determinada apenas para o solo e seguiu o preconizado pela norma DNER-ME 093 (DNER, 1994), por meio de picnômetros de 500 ml de capacidade, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Picnômetro de 500 ml



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Já os limites de consistência seguiram a metodologia prescrita pela NBR 6459 (ABNT, 2016), para o método de Casagrande, para a determinação do Limite de Liquidez, e pela NBR 7180 (ABNT, 2016) para o Limite de Plasticidade. Estes últimos ensaios foram realizados para a mistura de solo residual, rejeito e areia e para o solo puro, que, para este material, também teve o Limite de Liquidez determinado pelo método do cone, normatizado pela BS 1377-7 (BS, 1990).

Em relação à densidade real dos grãos, os valores para as misturas M1, M2 e M3 foram obtidos por meio de proporção, conforme exposto em Souza Pinto (2006). Assim, utilizou-se de média aritmética ponderada com os valores de densidade real dos grãos do rejeito e do solo e as proporções em cada mistura. Desta forma, foram obtidos os valores de 2,831, 2,863 e 2,894, para M1, M2 e M3, respectivamente.

3.2.3 Ensaio de Difração de Raio-X (DRX) no Rejeito

A análise mineralógica foi realizada no Laboratório de Mineralogia do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Para isto, utilizou-se o difratômetro de raio-X Rigaku D-Max, que possui um monocromador de grafite curvo para obtenção da radiação Co-K e tubo de cobalto, cuja potência de operação é de 45 KV e corrente de 30 mA. Neste ensaio, foram separadas as frações correspondentes ao tamanho de areia, silte e argila para a análise dos minerais constituintes de cada fração.

3.2.4 Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão

Rejeito e misturas foram ensaiados de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2017) para obtenção dos valores de ISC e expansão. A prensa utilizada é do modelo eletrônica e híbrida, que suporta até 10.000 kgf, da empresa Contenco.

Para isto, foram compactados corpos-de-prova nos parâmetros ótimos de compactação na Energia Proctor Normal, obtidos por Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020). Conforme determina o ensaio, foi utilizado o cilindro grande e o soquete grande para a etapa de compactação, como ilustrado na Figura 22, junto aos demais acessórios.

Figura 22 - Acessórios utilizados para o ensaio de ISC



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para o solo, ISC e expansão foram retirados de Barletta (2021). N Figura 23, são apresentado os corpos de prova em imersão e o uso dos extensômetros para a determinação da expansão após o período de 96 horas.

Figura 23 - Corpos de prova submersos e determinação da expansão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para cada amostra, foram compactados dois corpos de prova. A fim de se evitar variação no parâmetro ocasionada pela variação do teor de umidade e consequente sensibilidade em relação à moldagem, o corpo de prova foi considerado aceito quando seu teor de umidade, obtido após secagem em estufa, não apresentou variação superior a 1% de $W_{ótimo}$. Após 96 horas em imersão, os corpos de prova foram levados à prensa e submetidos à penetração do pistão, com velocidade de 1,27 mm/s. A aquisição dos dados foi obtida de forma automática e as curvas não precisaram de correção de concavidade. Na Figura 24, é apresentado um corpo de prova sendo submetido à penetração do pistão.

Figura 24 - Prensa de ISC com corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de RCS foi realizado para todos os em estudo materiais (solo, rejeito e misturas de solo-rejeito) seguindo o preconizado pela NBR 12770 (ABNT, 2022). A prensa

utilizada para o ensaio foi a mesma prensa de ISC, com o diâmetro do pistão de cerca de 5 cm.

Para a moldagem do corpo de prova, foi utilizado molde de PVC com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, obedecendo a relação $H=2D$ da norma. Um total de 5 (cinco) moldes (Figura 25) foram confeccionados pelo Laboratório de Materiais II, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFJF. Além dessas especificações, os moldes são bipartidos para permitir e facilitar a extração do corpo de prova.

Figura 25 - Molde para corpo de prova cilíndrico de diâmetro 5 cm e altura 10 cm, em PVC bipartido



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Assim, as amostras foram inicialmente compactadas no cilindro Proctor para os parâmetros ótimos previamente conhecidos na Energia Normal, sem reuso de material. Cada cilindro foi, então, colocado no equipamento extrator de amostras e os corpos de prova moldados por cravação com o molde de PVC e uso de acessório cortante para retirada do excesso de material. Além da limitação do diâmetro do pistão (5 cm), o método de moldagem do CP após compactação foi o único possível devido às limitações do laboratório.

Para cada material, foram confeccionados três corpos de prova, de forma a obter resultados mais precisos por meio de repetições. Todas as amostras ficaram em cura ao ar por 48 horas, a partir de quando foram submetidas à ruptura na prensa. O tempo de cura foi determinado com base na Literatura e na disponibilidade de uso da prensa, não sendo o objetivo avaliar o ganho de resistência com o tempo. As amostras foram moldadas com o teor de umidade ótimo, entretanto, após a cura ao ar, essa umidade foi reduzida. Assim, também

foram determinados os teores de umidade obtidos após o rompimento. O ensaio foi realizado com repetição, tendo sido retirada a média dos resultados. Além disso, a velocidade foi fixada em 1,0 mm/min. Esta velocidade de deformação foi determinada conforme preconiza a norma do ensaio, cujo valor deve pertencer ao intervalo de 0,5%/min a 2%/min.

Os ensaios foram conduzidos até a ruptura do corpo de prova, que pode ser visualizada na queda da tensão axial na prensa e por trincas pelo CP (Figura 26). A prensa utilizada no ensaio fornece a força aplicada (kgf) e o deslocamento (mm). A aquisição dos dados foi realizada de forma manual, por meio de filmagem e posterior tabulação no *Excel*. Com estes valores, é possível traçar as curvas de tensão vertical por deformação axial específica.

Figura 26 - Corpo de prova da Mistura M2 após rompimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após este ensaio, foi possível obter a Resistência à Compressão Simples (RCS), que é equivalente à tensão normal máxima (σ_1), a tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$), e o Módulo de Elasticidade para 50% ($E_{50\%}$), obtidos através da curva de tensão vertical por deformação axial específica. Para obter o valor do $E_{50\%}$, traça-se uma reta partindo da origem até a tensão correspondente a 50% da tensão de ruptura, e o módulo corresponde a divisão entre a diferença das tensões pela diferença das deformações.

3.2.6 Ensaio de Adensamento Unidimensional

O Ensaio de Adensamento Unidimensional foi realizado para o rejeito, para o solo e para as misturas seguindo a norma NBR 16853 (ABNT, 2020). A prensa utilizada é do tipo Bishop, com capacidade de 1000 kgf e uso analógico, com bureta graduada.

As amostras para o ensaio foram moldadas a partir de CPs compactados nos parâmetros ótimos, na Energia Proctor Normal, sem reuso de material. Para isso, o CP compactado foi levado ao extrator de amostras e, à medida em que o anel de adensamento era cravado, o solo em excesso era retirado com o auxílio de uma faca (Figura 27). Para cada amostra, foi moldado um corpo de prova. A mistura M2 (50% de rejeito e 50% de solo) foi ensaiada com repetição para verificar se haveria variação considerável entre os dois ensaios. Como os resultados apresentaram proximidades, não foi visto necessidade de repetição dos demais e foram adotados os resultados obtidos do primeiro ensaio para M2.

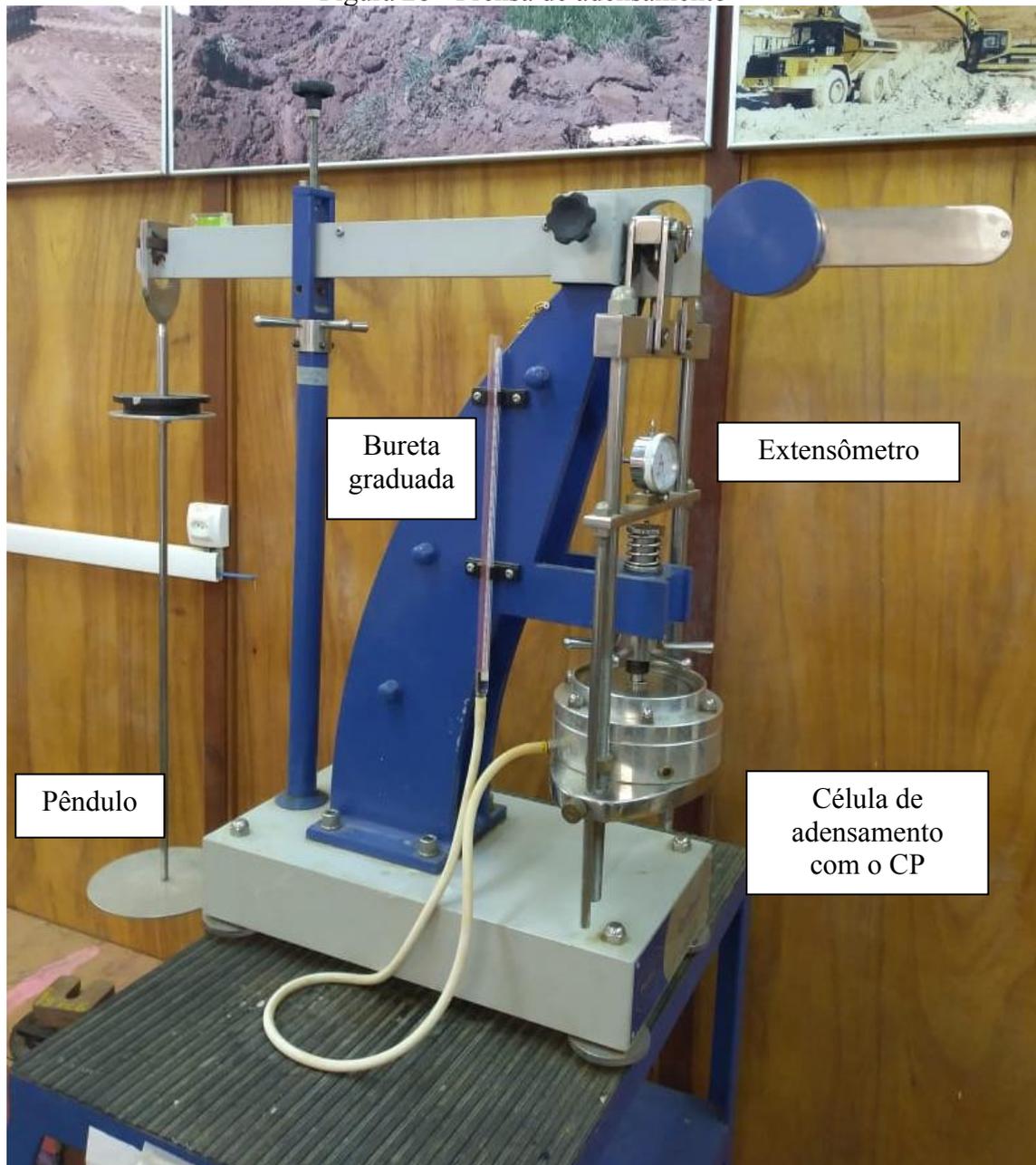
Figura 27 - Moldagem do anel de adensamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na sequência, a amostra moldada era colocada na célula de adensamento junto aos acessórios disco espaçador, pedra porosa e papel filtro e acoplada à prensa para execução do ensaio, conforme protocolo da norma. As tensões de carregamento escolhidas para o ensaio foram de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa, e as tensões de descarregamento foram correspondentes à 200 kPa, 100 kPa e 25 kPa, de acordo com as anilhas disponíveis. Ao final de cada estágio, foi medida a permeabilidade por meio de uma bureta graduada, tendo sido este o principal propósito da execução deste ensaio. A Figura 28 mostra a prensa de adensamento em execução.

Figura 28 - Prensa de adensamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Além da obtenção do coeficiente de permeabilidade (k), foi possível traçar a curva de variação do índice de vazios por tensão vertical efetiva e determinar os índices de compressibilidade. Dessa forma, o índice de compressão (C_c) foi extraído do trecho correspondente à reta virgem, o índice de recompressão (C_r) do trecho de recompressão e, por fim, o índice de descompressão ou expansão (C_s) do trecho de descarregamento. Foi possível, ainda, obter o módulo de elasticidade oedométrico (E_{oed}). Neste caso, o valor do módulo foi obtido pela razão entre dois pares de tensão e as deformações correspondentes.

3.2.7 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto (RCD)

As amostras de rejeito e suas misturas com solo foram submetidas ao Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto (RCD), preconizado pela norma ASTM 3080 (ASTM, 1998). A prensa utilizada é da marca Wille Geotechnik, modelo LO 2900. Já os resultados para o solo, estes foram retirados de Abrantes (2022).

Os corpos de prova foram moldados nos parâmetros ótimos de compactação na Energia Proctor Normal, sem reuso de material. Para isso, o CP foi levado ao extrator de amostras, e o anel de cisalhamento foi cravado no solo, cujo material em excesso foi removido com o auxílio de um objeto cortante. Para cada material, foi moldado um CP para cada tensão de estudo (Figura 29).

Figura 29 - Moldagem do anel de cisalhamento

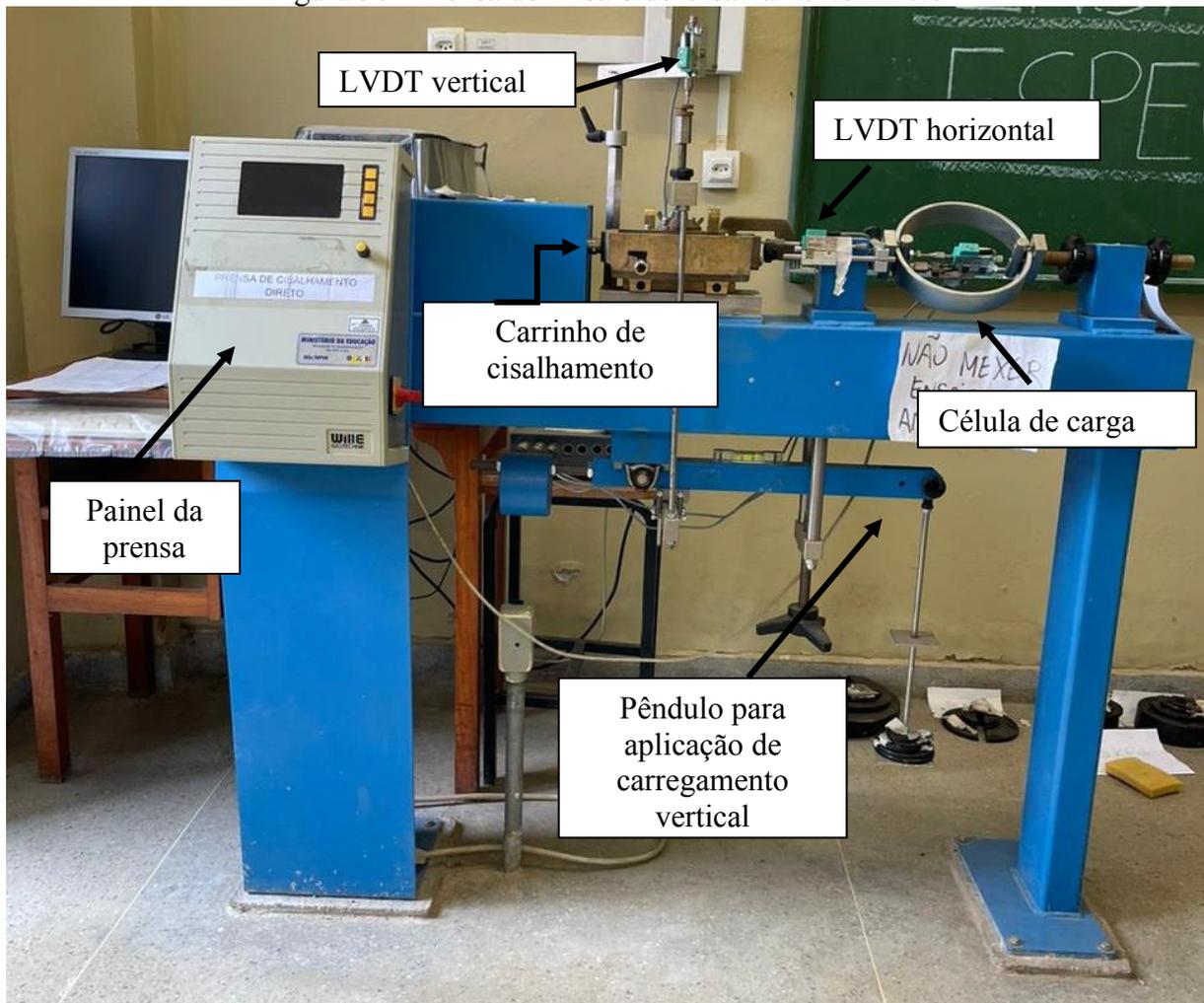


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Em seguida, o CP foi transferido para a caixa de cisalhamento junto ao conjunto de papel filtro, pedras porosas e placas ranhuradas em ambas as faces. Uma vez montada a caixa com o CP esta era acoplada à prensa para a execução do ensaio que consiste em três etapas: saturação, adensamento e cisalhamento. Os dados foram monitorados automaticamente. A etapa de saturação do CP consistia em submeter o corpo de prova à imersão por, no mínimo, 12h, tempo este constatado após análise dos dados. Na sequência, realizava-se a etapa de adensamento em que cada CP era submetido a uma das tensões de carregamento definidas previamente (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa ou 200 kPa) e o deslocamento vertical registrado até que se verificasse a estabilização das deformações. De acordo com o que é estabelecido na

norma de referência, a velocidade máxima de cisalhamento é definida pelo tempo necessário para ocorrer 90% do adensamento primário (t_{90}). Assim, a velocidade de cisalhamento máxima seguiu o preconizado pela norma e pelo método de Taylor (Taylor, 1948 apud ASTM, 1998) de acordo com a curva de adensamento obtida neste ensaio para a tensão de 100 kPa. A partir dos dados obtidos e cálculos realizados, a velocidade de cisalhamento igual a 0,1 mm/min foi adotada. Na Figura 30, é ilustrada a prensa do ensaio. Destaca-se que o máximo deslocamento horizontal permitido pelo equipamento é de 9,90 mm, que baseou o adotado para o ensaio de 8,90 mm para segurança do aparelho. Assim, a parte superior da caixa de cisalhamento era deslocada em relação à parte inferior, cujo monitoramento dos dados era feito pela tela do sistema de aquisição e pelo programa instalado no computador. Na Figura 31, é apresentado um corpo de prova de cada material, que se tem, da esquerda para direita, M1, M2, M3 e o RMF.

Figura 30 - Prensa do Ensaio de Cisalhamento Direto



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 31 - Corpos de prova após o cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Por fim, com os dados do ensaio foi obtida a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas normais e tensões cisalhantes máximas e, então, determinados os parâmetros efetivos intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ).

3.2.8 Ensaio de Módulo de Resiliência

O Ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado conforme a norma DNIT ME 134 (DNIT, 2018). O ensaio foi realizado em duplicata para todas as amostras e utilizado o equipamento triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Pavimentação da UFJF. A prensa utilizada foi desenvolvida pela empresa Suporte em Instrumentação Geotécnica (SIGEO).

As amostras para o ensaio foram compactadas nos parâmetros ótimos, na Energia Proctor Normal, sem reuso de material, com uso do compactador mecânico (Figura 32) e uso de moldes cilíndricos metálicos tripartidos com dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (Figura 33), disponibilizados pelo Laboratório de Pavimentação da UFJF. Na sequência, o CP era retirado do molde tripartido e inserido na célula para a execução do ensaio.

Figura 32 - Compactador mecânico



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 33 - Molde tripartido



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

De maneira geral, o ensaio é dividido em duas fases, com aplicações de cargas repetidas de frequência igual a 1 Hz, o que corresponde a 0,1s de carregamento e 0,9s de descarregamento. Assim, na primeira fase de condicionamento do CP, ocorrem as eliminações de algumas deformações permanentes iniciais e são aplicadas 500 repetições de carga para cada par de tensão da norma DNIT ME 134 (DNIT, 2018). Já a segunda fase é aquela em que se obtém os valores de MR propriamente ditos, em que são aplicadas 10 repetições para cada um dos 18 pares de tensão estipulados na norma. Neste ensaio, é simulada a passagem de carga e a deformação que o material estará submetido quando a carga é aplicada, além da deformação permanente, que não foi objeto desta pesquisa. Na Figura 34, é apresentada a célula triaxial em operação.

Figura 34 - Célula do equipamento Triaxial



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Além disso, o teor de umidade de cada CP foi verificado, após cada ensaio, para que esse parâmetro pudesse representar uma das variáveis em relação às interferências ocorridas ao longo do ensaio e que justifiquem as pequenas diferenças entre cada corpo de prova. Assim, o ensaio só foi considerado aceito em relação a este parâmetro quando a variação de umidade entre cada repetição foi menor do que 1,5% em relação a massa total. Mais ainda, cada amostra foi ensaiada imediatamente após a moldagem, o que tornou o tempo entre

moldagem e ensaio constante entre todas as amostras. Isso foi adotado para diminuir a influência do tempo, que está associado a estabilização interna e efeitos da sucção, conforme apontado por Dantas (2019).

3.2.9 Mistura de solo-areia-rejeito-cimento

Para a mistura de solo-areia-rejeito-cimento, foram realizados ensaios laboratoriais e modelagem computacional.

3.2.9.1 Ensaio de Compactação

Para a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de RCS, é necessário o conhecimento dos parâmetros de compactação. A mistura de areia, rejeito, solo e cimento (MC) foi submetida ao Ensaio de Compactação na Energia Proctor Normal, utilizando o cilindro Proctor pequeno e sem o reuso de material, conforme a NBR 12023 (ABNT, 2012a). A Figura 35 e 36 mostra o cilindro e o soquete utilizados e a realização da compactação, respectivamente.

Figura 35 - Cilindro e soquetes utilizados para a compactação da mistura MC



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 36 - Compactação da mistura MC



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Destaca-se que as amostras foram preparadas homogeneizando primeiramente a parte seca e, logo após, acrescentando os teores de água. Desta forma, por meio deste ensaio, foi possível obter o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima.

3.2.9.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

A modelagem do cilindro de solo-cimento necessita de alguns parâmetros obtidos pelo Ensaio de Resistência à Compressão Simples. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 12024 (ABNT, 2012b). Para isto, usou-se a Energia Normal, com o cilindro Proctor pequeno, e os parâmetros ótimos obtidos no Ensaio de Compactação. O corpo de prova seguiu as dimensões do cilindro Proctor pequeno, conforme determina a norma. Assim, para cada corpo de prova, foi medido, com o auxílio de um paquímetro, o diâmetro e a altura. A Figura 37 mostra o corpo de prova moldado.

Figura 37 - Corpo de prova de solo, rejeito, areia e cimento moldado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Destaca-se que as amostras ficaram em câmara úmida por 21 (vinte e um) dias, com temperatura próxima de 23°C e umidade relativa do ar superior a 95%. O tempo de cura mínimo recomendado pela mesma norma é de sete dias, e foi escolhido o período de 21 dias para ganho de resistência.

Após esse período, as amostras foram submetidas ao Ensaio de Resistência à Compressão Simples, de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT, 2012c), que fixa as condições necessárias para as misturas de solo-cimento em corpos de prova cilíndricos. Neste ensaio, as amostras foram retiradas da câmara úmida e permaneceram em imersão por 4h (Figura 38).

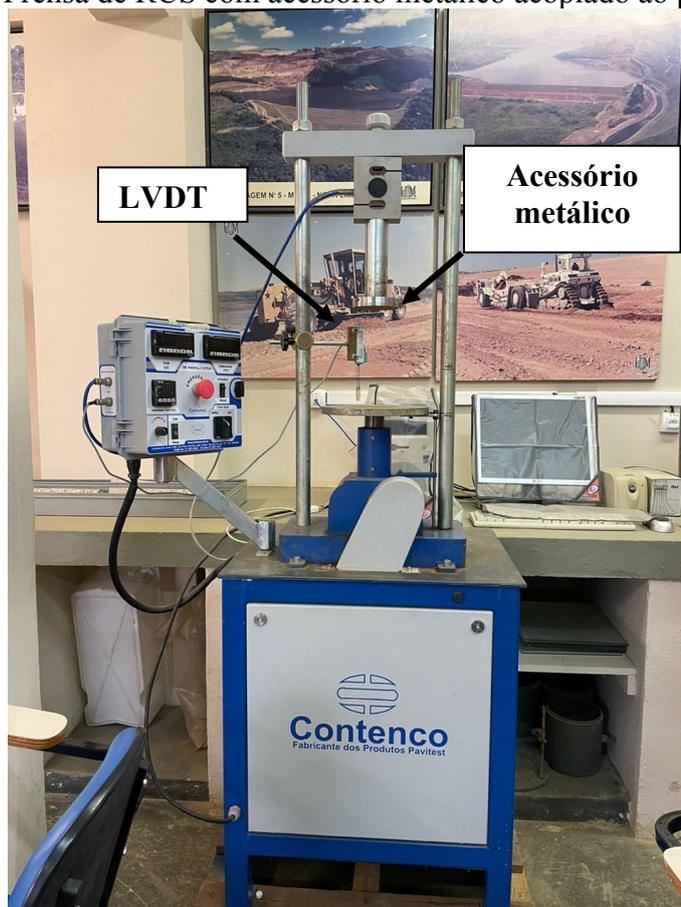
Figura 38 - Corpos de prova em imersão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após isso, as superfícies foram secas com tecido absorvente e as dimensões de diâmetro e altura foram obtidas com o auxílio do paquímetro. Logo em seguida, as amostras foram colocadas na prensa de compressão simples (mesma utilizada no ensaio de ISC) que teve o carregamento aplicado com uma deformação controlada a uma velocidade de 1 mm/min. Como o pistão da prensa era de dimensão inferior ao do CP, foi confeccionado um acessório metálico de diâmetro 10 cm e acoplado ao pistão original (Figura 39). Com isso, o CP pode ser levado à ruptura nas dimensões de moldagem. O critério de parada foi adotado quando a carga atingiu 10% da carga de ruptura, de acordo com o recomendado pela norma. NBR 12025 (ABNT, 2012c). A prensa utilizada no ensaio fornece a força aplicada (kgf) e o deslocamento (mm). Com estes valores, é possível traçar as curvas de tensão vertical por deformação axial específica. Na Figura 40, é apresentado um CP sendo submetido à tensões de compressão.

Figura 39 - Prensa de RCS com acessório metálico acoplado ao pistão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 40 - CP da mistura M durante à aplicação de forças na prensa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Por meio desta curva, é possível obter a tensão máxima que levou o corpo de prova a ruptura, também chamada de Resistência à Compressão (RCS). No círculo de Mohr-Coulomb, esta tensão é correspondente à tensão normal máxima (σ_1), cuja metade do valor corresponde à tensão de cisalhamento máxima (τ_{max}). Junto a estes parâmetros, a curva do ensaio também permite obter o $E_{50\%}$. Para isto, traça-se uma reta partindo da origem até a tensão correspondente a 50% da tensão de ruptura, e o módulo corresponde a divisão entre a diferença das tensões pela diferença das deformações. Estes parâmetros foram utilizados para a modelagem do elemento cilíndrico no PLAXIS 2D.

Por fim, os resultados obtidos pelos ensaios foram verificados quanto a média aritmética (\bar{x}) (Equação 5), desvio padrão (DP) (Equação 6) e coeficiente de variação (CV) (Equação 7).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Equação 5})$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{Equação 6})$$

$$CV = \frac{DP}{\bar{x}} \quad (\text{Equação 7})$$

3.2.9.3 Modelagem Numérica

Nesta pesquisa, foi utilizado o *software* PLAXIS 2D, desenvolvido pela Bentley, versão paga. Por meio do método de elementos finitos, o *software* fornece análises de deformações e segurança para solos e rochas, com todas as ferramentas necessárias para estes fins, exceto as relativas à efeito do tempo e águas estacionárias. De acordo com o propósito da pesquisa, o *software* permite a modelagem de formas geométricas em duas dimensões e a caracterização dos materiais em estudo, por meio da alimentação com parâmetros de entrada como peso específico aparente (γ), Módulo de Elasticidade ($E_{50\%}$, obtido quando atingida 50% da carga máxima de ruptura, em relação à origem), coeficiente de Poisson (ν), ângulo de atrito (φ') e intercepto coesivo (c'). Como dito anteriormente é possível simular um corpo de prova cilíndrico (2D) utilizando a função axi-simétrica.

O programa PLAXIS 2D possibilita então simular as condições do Ensaio de Resistência à Compressão Simples executado conforme NBR 12025 (ABNT, 2012c). Desta forma, o *software* foi utilizado para obter a tensão vertical que originou um determinado deslocamento em um cilindro composto pelo material que compõe a mistura MC (solo-areia-rejeitamento). Este deslocamento é correspondente ao momento em que, no ensaio físico de RCS, o corpo de prova atingiu a tensão axial máxima. Isto se torna importante para verificar se os parâmetros utilizados na modelagem numérica estão compatíveis com o obtido no ensaio. Dessa forma, considera-se o modelo calibrado e apto para simular outras formas geométricas relativas à tijolos, por exemplo.

Além das informações quanto ao material e às dimensões do elemento a ser modelado, é preciso indicar o deslocamento a ser estudado por meio da ferramenta de deslocamento prescrito. Feito isso, o *software* procede os cálculos e apresenta a curva de tensão vertical por deformação axial, por meio da qual é possível obter a força máxima atingida que originou o deslocamento informado.

Para o peso específico aparente, foi adotado o peso específico seco máximo obtido pela curva de compactação da mistura MC e o teor de umidade ótimo, conforme Equação 8. O parâmetro $E_{50\%}$ é obtido através da curva de tensão vertical por deformação axial específica obtido no ensaio de RCS. Desta mesma curva, é possível obter a Resistência à Compressão (RCS), cujo valor é utilizado para verificar a compatibilidade com a força máxima obtida pelo *software* para o deslocamento definido.

$$\gamma = p_{dm\acute{a}x} \times (1 + w) \times 10 \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 8})$$

Para esta pesquisa, a coes\~{a}o (c') e o \~{a}ngulo de atrito (φ') foram obtidos indiretamente atrav\~{e}s de correla\c{c}\~{o}es apresentadas por Piratheepan *et al.* (2012). Para isto, a tens\~{a}o normal aplicada (σ_1 ou σ_c) \~{e} correlacionada com a tens\~{a}o obtida pelo ensaio de compress\~{a}o diametral, que corresponde \~{a} tens\~{a}o de tra\c{c}\~{a}o (σ_{IDT} .) No caso do presente trabalho, foi optado por n\~{a}o realizar este ensaio e adotar a mesma rela\c{c}\~{a}o entre as tens\~{o}es do concreto, em que a tens\~{a}o de tra\c{c}\~{a}o corresponde a aproximadamente um d\~{e}cimo da tens\~{a}o de compress\~{a}o m\~{a}xima. Assim, para a obten\c{c}\~{a}o da coes\~{a}o e do \~{a}ngulo de atrito, foram adotadas as Equa\c{c}\~{o}es 9, 10, 11 e 12.

$$\sigma_{IDT} = \frac{\sigma_c}{10} \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 9})$$

$$a = \frac{(\sigma_c - 4\sigma_{IDT})}{(\sigma_c - 2\sigma_{IDT})} \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 10})$$

$$\varphi = \text{arcoseno}(a) \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 11})$$

$$c = \frac{\sigma_c \times (1 - a)}{2 \times \cos\varphi} \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 12})$$

Ainda em rela\c{c}\~{a}o \~{a} obten\c{c}\~{a}o dos par\~{a}metros para alimenta\c{c}\~{a}o do *software*, o coeficiente de Poisson (ν) foi estimado de acordo com os valores encontrados na Literatura. Delgado (2013) adotou, para um tijolo de solo-cimento convencional, um valor de $\nu = 0,20$. J\~{a} o Manual de Conce\c{c}\~{a}o de Pavimentos para a Rede Rodovi\~{a}ria Nacional (MACOPAV), elaborado em Portugal, recomenda um valor de solo-cimento de $\nu = 0,30$ para solos granulares (JAE, 1995). Por fim, Monte (2012) adotou um valor de $\nu = 0,25$ para uma mistura de solo-cimento para fins de pavimenta\c{c}\~{a}o.

Devido aos valores encontrados para o coeficiente de Poisson estarem na faixa de 0,20 a 0,30, o valor inicialmente adotado para a modelagem foi de $\nu = 0,25$. Entretanto, optou-se por analisar a influ\~{e}ncia da varia\c{c}\~{a}o deste par\~{a}metro, atrav\~{e}s da simula\c{c}\~{a}o tamb\~{e}m com os valores de $\nu = 0,20$ e $\nu = 0,30$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos e as análises realizadas após a realização dos ensaios laboratoriais e da modelagem computacional.

4.1 MATERIAIS

Para o rejeito de minério de ferro, foi obtida a composição química. Já o solo foi estudado quanto à sua granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência para confirmar que estas propriedades são próximas às de Barletta (2021). Além disso, foram verificados os parâmetros de interesse para a areia e as misturas.

4.1.1 Rejeito de Minério de Ferro (RMF)

A granulometria do RMF apresentou frações de silte (63%), seguido por areia (26%) e argila (11%) (CÂNDIDO *et al.*, 2020). Em relação à composição química do rejeito, a Tabela 6 apresenta os principais óxidos obtidos.

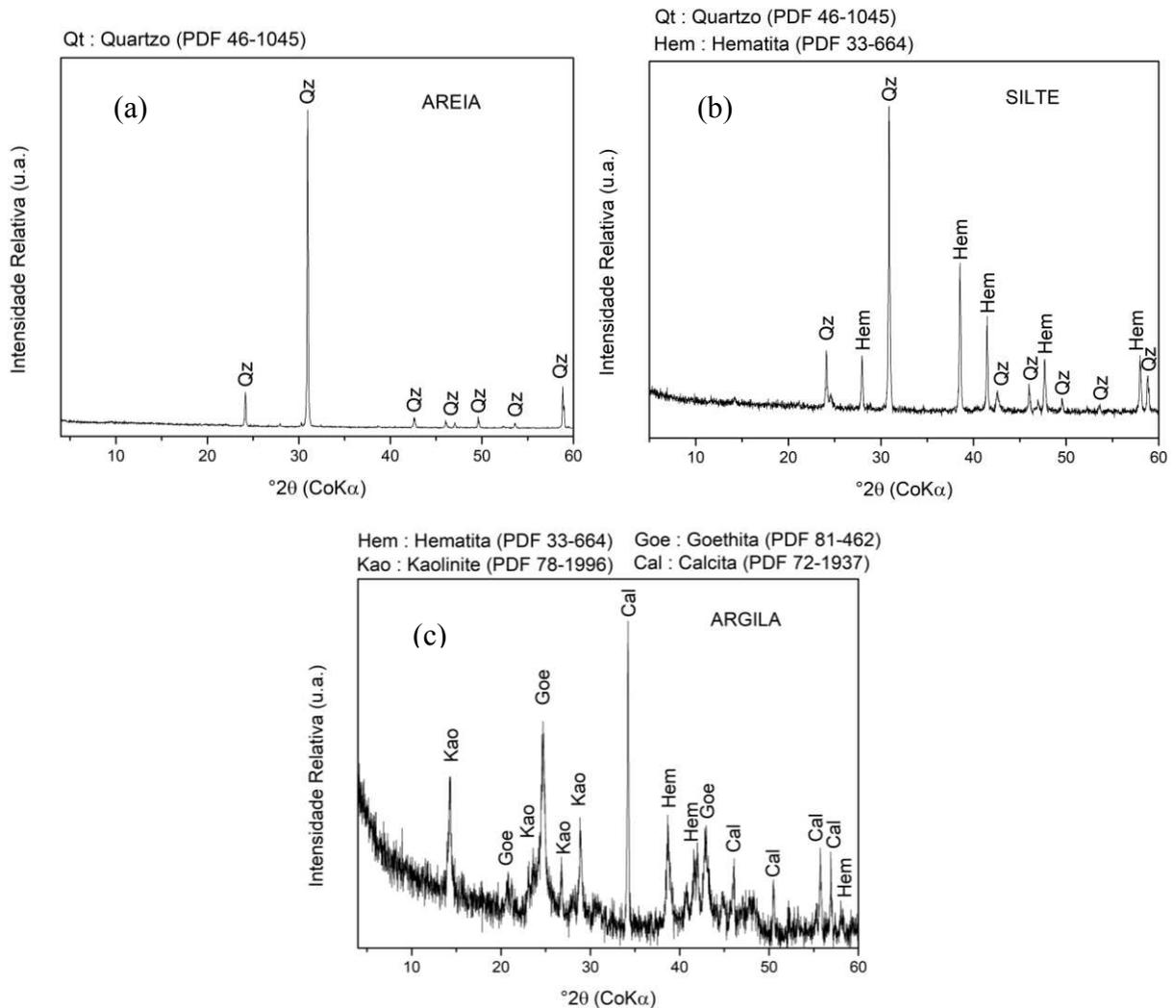
Tabela 6 – Componentes químicos do RMF

Componentes químicos							
Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	Eu ₂ O ₃	TiO ₂	CaO
(%)							
56,453	32,251	8,859	0,794	0,588	0,28	0,249	0,12

Fonte: Cândido (2020)

Na Figura 41, é apresentado, respectivamente, o difratograma da fração areia (a), silte (b) e argila (c) do rejeito.

Figura 41 - Difratoograma das frações do rejeito: a) areia, b) silte e c) argila



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

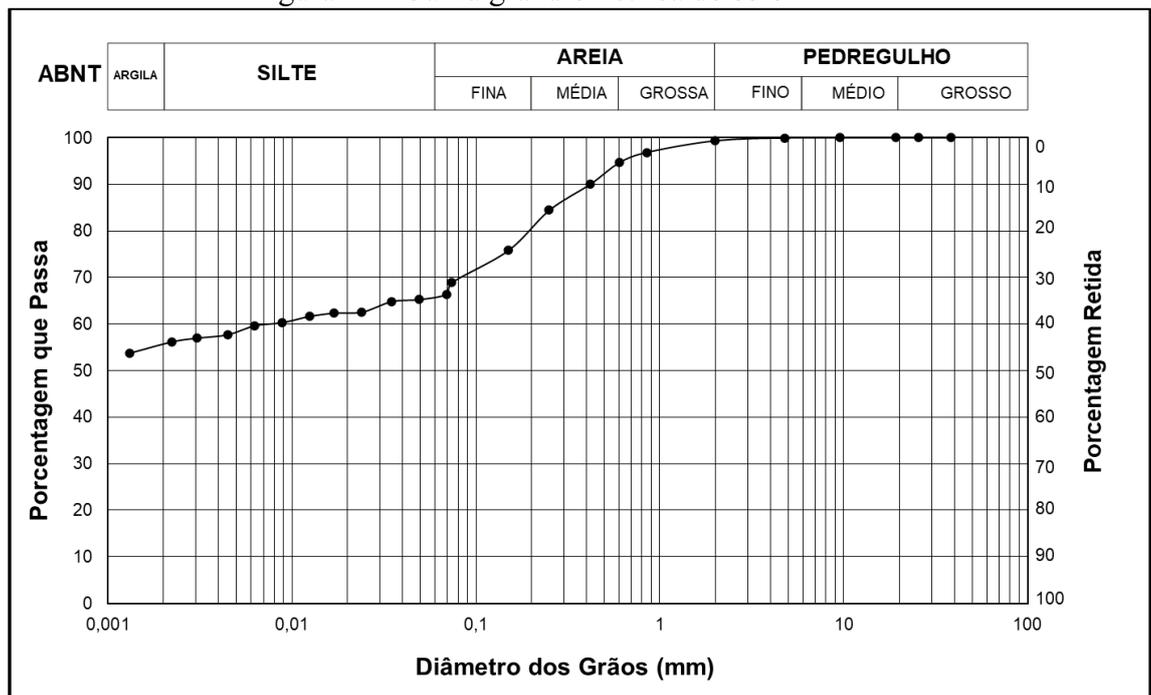
Por meio do difratograma (Figura 41), é possível identificar a predominância dos minerais Hematita e Quartzo, através dos vários picos apresentados. A Hematita é encontrada, principalmente, na fração silte, que é também a maior fração da composição granulométrica do rejeito.

Ao comparar os resultados do difratograma com a Tabela 6, vê-se que há a predominância de óxidos de ferro e óxidos de silício. O mineral Hematita, normalmente, apresenta-se na forma de óxido de ferro, enquanto o mineral Quartzo, na forma de óxido de silício. Ambos os ensaios estão, assim, em conformidade. Além disso, o rejeito em estudo é proveniente do itabirito, que é uma rocha composta quimicamente, sobretudo, de ferro e sílica, o que torna esperado o resultado.

4.1.2 Solo

Por meio dos ensaios de granulometria e densidade dos grãos, foi obtida a curva granulométrica do solo, apresentada na Figura 42. O solo apresentou predominância de frações de argila (56%), seguido por areia (33%), silte (10%) e pedregulho (1%). A densidade relativa dos grãos, por sua vez, foi de 2,79.

Figura 42 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Estes resultados são similares ao apresentado por Barletta (2021). A curva apresentada pelo autor mostrou frações de argila (57,1%), seguido de areia (33,6%), silte (8,4%) e pedregulho (0,9%). Já a densidade relativa dos grãos encontrada foi de 2,81.

Em relação aos limites de consistência, o solo apresentou $LL = 40\%$ e $LP = 30\%$. Assim, o índice de plasticidade (IP), dado pela diferença entre ambos, foi de $IP = 10\%$.

Ao comparar com o obtido por Barletta (2021), os resultados foram próximos em relação a LP, que, para o autor, foi de 29%, mas variou em relação ao LL. Pelo método de Casagrande, foi obtido um valor de $LL = 52\%$.

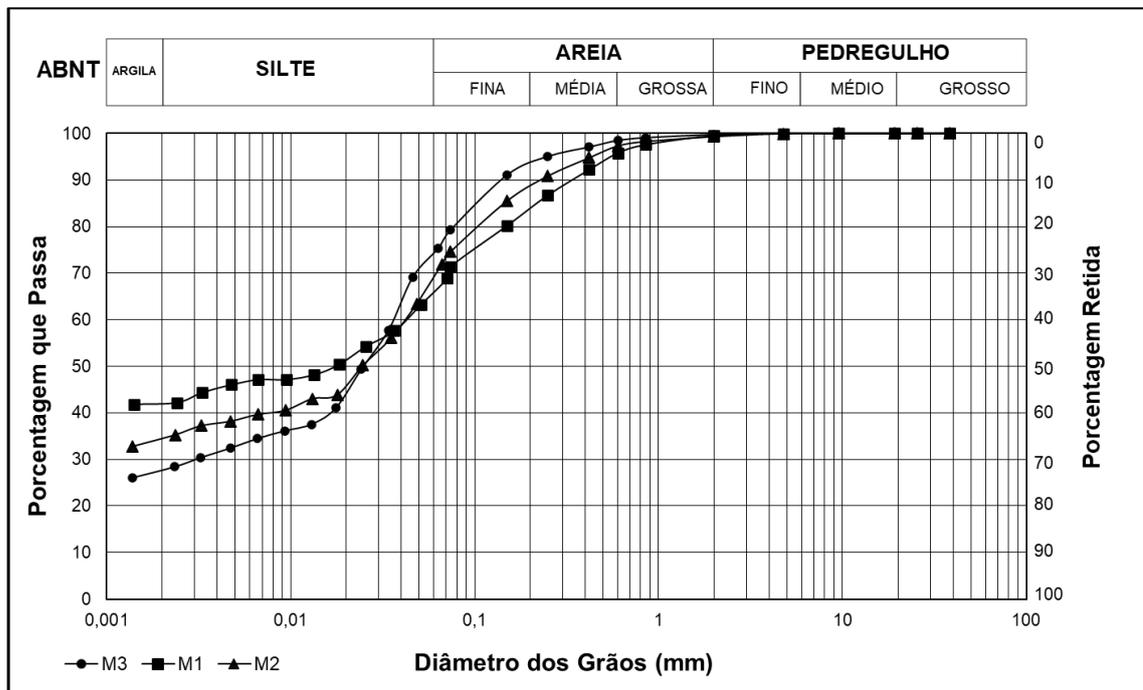
Já na comparação com o RMF, nota-se que a presença da concentração predominante de óxido de ferro (Tabela 6) e do mineral hematita (Figura 41b), na constituição química e mineralógica do rejeito, justificam a sua elevada densidade relativa dos grãos (2,925) em relação à obtida para o solo.

4.1.3 Misturas de rejeito e solo

As curvas granulométricas das misturas de rejeito com solo foram obtidas de forma a se determinar os percentuais de cada fração nas misturas. Assim, as curvas das misturas M1 (25% de rejeito, 75% de solo), M2 (50% de rejeito, 50% de solo) e M3 (75% de rejeito, 25% de solo) são apresentadas na Figura 43. Para M1, as frações foram dadas por argila (42%), areia (35%) e silte (23%). Já para M2, as frações foram de argila (35%), areia (30%) e silte (35%). Por fim, M3 apresentou frações de argila (28%), areia (25%) e silte (47%). Vê-se, portanto, a diminuição da fração argila e o aumento da fração silte com o incremento de rejeito. Isto era esperado, uma vez que a granulometria do rejeito é, predominantemente, de silte, como observado por Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020).

As misturas M1, M2 e M3 apresentaram densidade relativa dos grãos de 2,83, 2,86 e 2,89, respectivamente. Estes valores foram obtidos por meio de média ponderada entre a densidade relativa do solo e do RMF, considerando a proporção em peso de cada material (solo e RMF) na mistura.

Figura 43 - Curva granulométrica das misturas M1, M2 e M3



Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

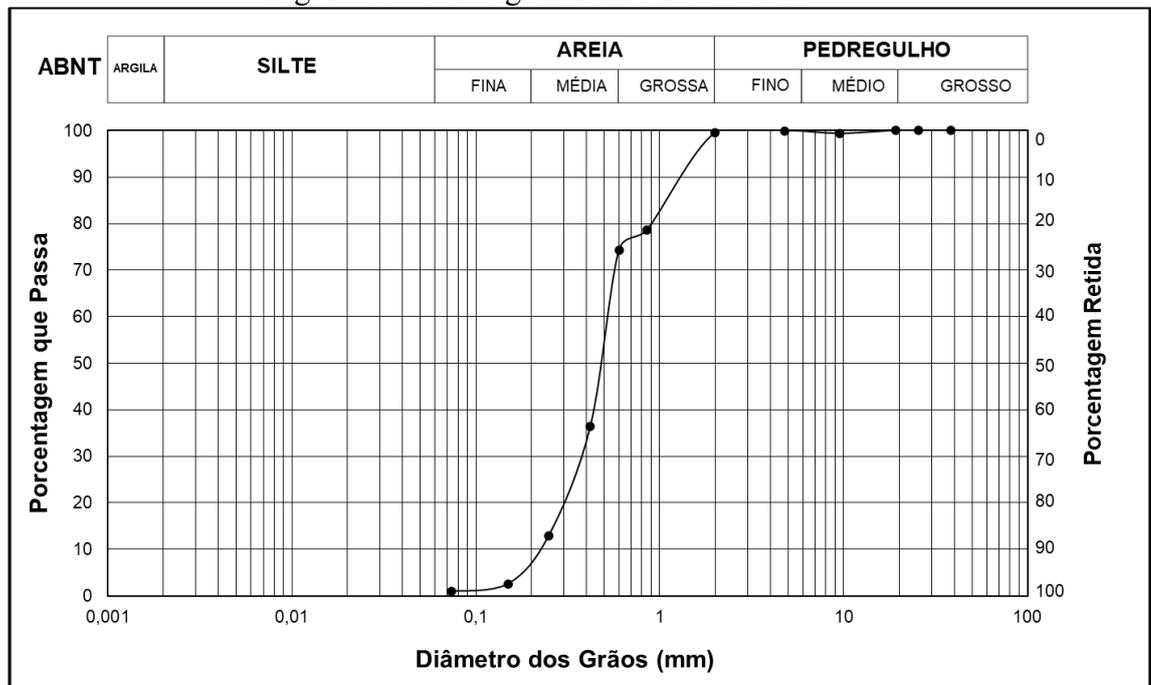
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A distribuição granulométrica do do solo (obtida por Barletta (2021) e apresentada no tópico 3.1.1), do rejeito (obtida por Cândido *et al.* (2020) e Cândido (2020) e apresentada no tópico 3.1.2), e das misturas apresenta porcentagem de material passante na peneira de nº 200 entre 65 e 80%. Com isto, de acordo com a Tabela 4, o material não pode ser utilizado como material de filtro de barragem, pois apenas 5% de material pode ser passante nesta peneira. Além disto, nenhuma mistura se encaixou nas faixas granulométricas permitidas para aplicação como camada de base, pois o máximo permitido de passante na peneira de nº 200 é de 25, que é a faixa F (Tabela 3).

4.1.3 Areia

A areia foi um material utilizado para compor a mistura de RMF, solo, areia e cimento, conforme se apresenta no item 4.2.4. Para determinação da granulometria da areia, foi realizado o peneiramento grosso e o peneiramento fino, com a amostra seca em estufa, conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Como a porcentagem de passantes na peneira de nº 200 foi inferior a 15% (0,9%), não foi necessário realizar a sedimentação. A curva granulométrica da areia é apresentada na Figura 44. A fração areia se divide, então, em 25% de areia grossa, 71% areia média e 4% areia fina.

Figura 44 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.1.4 Mistura de rejeito, solo, areia e cimento

A norma NBR 10833 (ABNT, 2012) determina os requisitos para a fabricação do tijolo de solo-cimento em prensa manual ou hidráulica. Além disso, determina as especificações dos materiais constituintes desse tijolo. Assim, a porcentagem de grãos do solo passantes na peneira de nº 4 deve ser de 100% e a de passantes na peneira de nº 200, de 10% a 50%. Ou seja, cerca de 50% dos grãos de solo devem compreender a fração de areia. Diante disso, foi usada proporção com cada material (rejeito, areia e solo) e a mistura de 35% de areia, 35% de rejeito e 30% de solo se apresentou a mais vantajosa, uma vez que cumpriu o requisito granulométrico da norma e obteve a maior porcentagem possível de rejeito na mistura, além da menor possível de areia. A mistura recebeu o nome de MC. A Tabela 7 apresenta os percentuais obtidos.

Tabela 7 - Percentuais de solo, areia e rejeito para a mistura e granulometria destes materiais.

PENEIRAS		AREIA		SOLO		REJEITO		MC
Polegadas	mm	35,00%	35,00%	30,00%	30,00%	35,00%	35,00%	
1 1/2"	38,0	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	35,0	100,0
1"	25,4	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	35,0	100,0
3/4"	19,1	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	35,0	100,0
1/2"	12,7	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	35,0	100,0
3/8"	9,5	99,4	34,8	100,0	30,0	100,0	35,0	99,8
Nº 4	4,8	98,3	34,4	99,9	30,0	100,0	35,0	99,4
Nº 10	2,0	92,0	32,2	99,4	29,8	100,0	35,0	97,0
Nº 40	0,4	34,9	12,2	90,1	27,0	99,8	34,9	74,2
Nº 100	0,2	2,6	0,9	75,8	22,7	97,5	34,1	57,8
Nº 200	0,1	0,8	0,3	68,9	20,7	82,7	28,9	49,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O outro requisito citado pela NBR 10833 (ABNT, 2012) é que LL deverá ser inferior a 45% e IP inferior a 18%. Para isso, a mistura MC foi ensaiada para estes limites de consistência e foram obtidos LL = 30% e LP = 20%, o que resultou em IP = 10%, atendendo assim à norma. Dessa forma, a mistura MC, que corresponde à porção de material para constituir um tijolo de solo-cimento, estaria apta para ser utilizada para este fim.

4.2 ISC E EXPANSÃO – Misturas M1, M2 e M3 (SEM CIMENTO)

Para diminuir os efeitos da variação do resultado em relação às condições de moldagem, cada corpo de prova poderia possuir variação do teor de umidade em, no máximo, 1% sobre o teor de umidade ótimo. A Tabela 8 apresenta o teor de umidade de cada amostra ensaiada.

Tabela 8 – Teores de umidade de moldagem

Material	Wótimo (%)	CP	w (%)
RMF	10,5	1	10,48
RMF	10,5	2	10,46
M1	21,4	1	21,32
M1	21,4	2	21,38
M2	18,3	1	18,23
M2	18,3	2	18,25
M3	14,7	1	14,68
M3	14,7	2	14,67

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Já a Tabela 9 apresenta os valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão para os materiais solo, rejeito e misturas solo-rejeito, compactados na Energia Normal.

Tabela 9 – Valores de ISC e Expansão para todos os materiais

Material	ISC	Expansão
M1	15%	0,03%
M2	17%	0,28%
M3	18%	0,23%
RMF	10%	0,68%
SOLO (BARLETTA, 2021)	6%	0,1%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Assim, é possível notar na Tabela 9 que o incremento de rejeito ao solo resultou em um aumento do valor de ISC do solo. Nota-se que os dois materiais, na forma pura, apresentaram valores de ISC menores que as suas misturas. Isto pode ter ocorrido devido ao reagrupamento dos grãos, com o preenchimento dos vazios pelos grãos finos de cada material, e pela capacidade cimentante do óxido de ferro presente no rejeito (CAMAPUM DE CARVALHO, 2015). O resultado de ISC de 10% para o rejeito está de acordo com o encontrado por Bastos (2013) e Bastos *et al.* (2016), de 9%.

Em relação à expansão, todos os valores apresentados na Tabela 9 estão abaixo de 1%, o que não impediria a aplicação em nenhuma camada estrutural de pavimento flexível, de acordo com o regulamentado pelo DNER (1981). Entretanto, os valores de ISC só permitiriam a aplicação dos materiais como material para reforço de subleito, uma vez que as

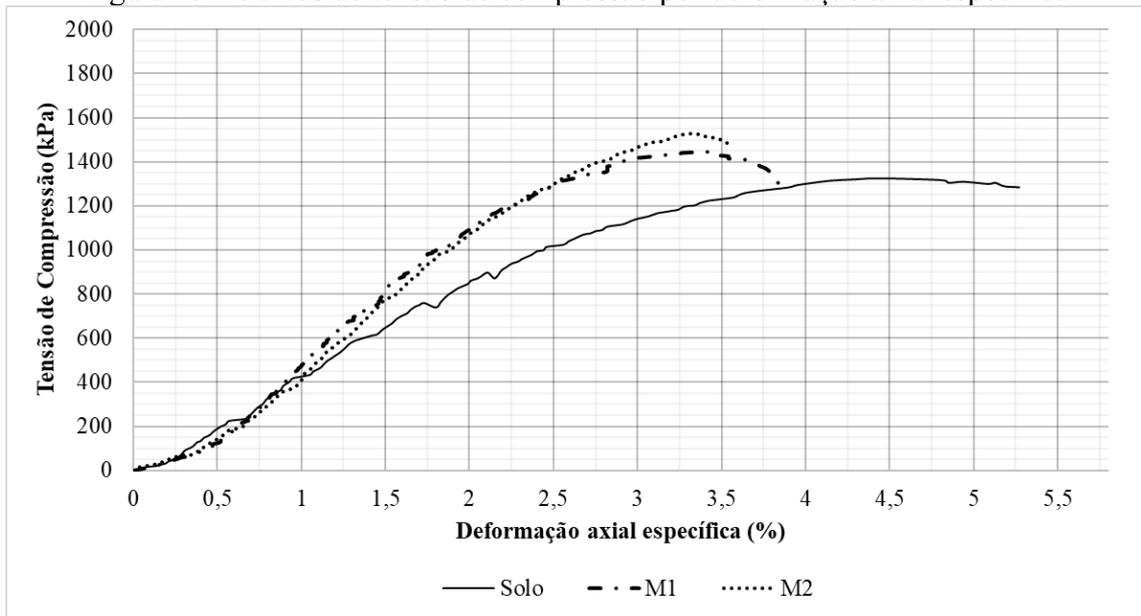
demais camadas exigem a compactação com, no mínimo, a energia intermediária (DNER, 1981). Além disso, a distribuição granulométrica impossibilita o uso para camada de base, pois não obedece ao exposto na Tabela 3. Já quanto às camadas de aterro rodoviário, todos os materiais apresentam condições de serem utilizados para o corpo do aterro, pois apresentam $ISC \geq 2\%$ e a expansão $\leq 4\%$ (DNIT, 2009). Caso haja aumento da energia de compactação, certamente todos os materiais poderão ser utilizados como camada final, uma vez que os valores de ISC e expansão estão consideravelmente maior que o recomendado.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - RCS (SEM CIMENTO)

A execução do ensaio de RCS estava prevista para o solo, rejeito e misturas M1 (25% de rejeito, 75% de solo), M2 (50% de rejeito, 50% de solo) e M3 (75% de rejeito, 25% de solo). No entanto, devido ao comportamento não plástico e a ausência de coesão, o método por cravação do molde cilíndrico em PVC não possibilitou a moldagem para a mistura M3 e para o rejeito, uma vez que o material apresentou quebras e fissuras após a extração do CP. Dessa forma, apenas o solo e as misturas M1 e M2 foram levadas à prensa para ruptura.

Após a execução do ensaio de RCS, os materiais ensaiados tiveram traçados os gráficos de tensão normal por deformação axial específica, para os CPs mais representativos (Figura 46). A partir do ponto máximo dos gráficos, foram obtidos os valores de RCS e deformação axial específica correspondente, apresentados na Tabela 10. Também são mostrados na Tabela 10 os valores do teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$) utilizado na moldagem e aquele após ruptura (w_{ruptura}) dos CPs.

Figura 45 - Curvas de tensão de compressão por deformação axial específica



Nota.: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 10 – Valores de RCS e teores de umidade ótimos e após a ruptura

Material	RCS (MPa)	W _{ótimo} (%)	W _{ruptura} (%)	ε (%)
Solo	1,38	26,80	22,02	4,43
M1	1,48	21,40	18,80	3,44
M2	1,53	18,30	14,35	3,30

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

De acordo com a Figura 46 e a Tabela 10, é possível perceber que o incremento de rejeito ao solo contribuiu para o aumento do valor de resistência à compressão simples (RCS). Não foram encontrados na Literatura resultados de misturas com granulometria, energia de compactação ou porcentagens similares que permitam comparações.

A deformação axial específica, entretanto, para as misturas foi menor do que a do solo. Isso indica que as misturas sofreram menor deformação no instante da ruptura. A modificação da estrutura do solo após o acréscimo de rejeito e do índice de vazio podem ser justificativas para tal comportamento (DANTAS, 2019).

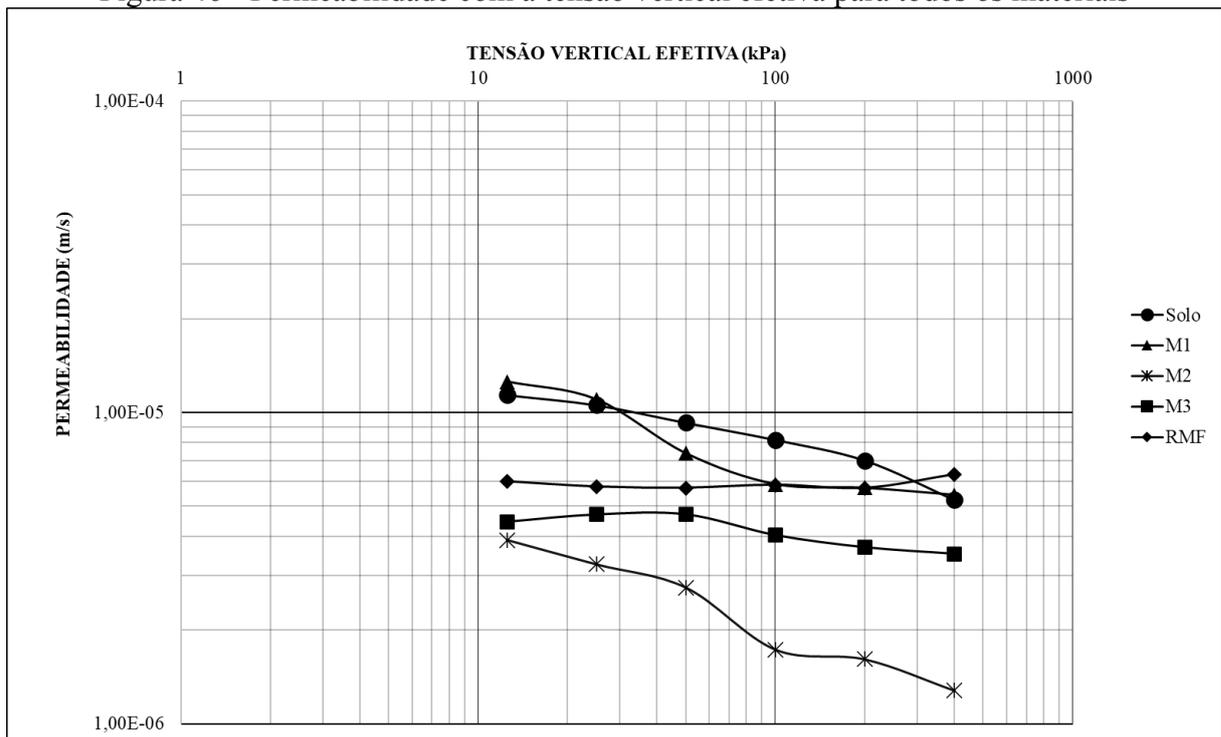
Destaca-se que, caso fosse possível moldar, o esperado seria que o rejeito atingisse valores menores de resistência à compressão simples comparado ao solo, variando de 0,03 MPa (OLIVEIRA *et al.*; 2019; MACHADO, 2022) a 0,75 MPa (BASTOS, 2013; e BASTOS *et al.*; 2016). Nestes trabalhos, a metodologia de moldagem utilizada foi diferente da adotada

na presente pesquisa, uma vez que estes trabalhos possuíam outros equipamentos de moldagem que permitiam a confecção de corpos de prova com outras dimensões permitidas por norma. Dessa forma, nota-se que o aumento de RCS com o incremento de rejeito ao solo foi de encontro ao esperado. Entretanto, conforme justifica Dantas (2019) com base nos resultados do ensaio de MEV para o seu rejeito em estudo, o formato uniforme dos grãos do rejeito pode influenciar negativamente no desempenho mecânico em relação ao ensaio de RCS, ainda que isto permita que exista teores ótimos de porcentagem de rejeito que contribuam para uma melhor estruturação do solo compactado.

4.4 ADENSAMENTO E PERMEABILIDADE, M1, M2, M3 (SEM CIMENTO)

Na Figura 47, é apresentada a variação da permeabilidade com a tensão vertical efetiva para cada material.

Figura 46 - Permeabilidade com a tensão vertical efetiva para todos os materiais



Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A Figura 47 possibilita perceber que todos os materiais apresentaram valores de k na faixa de 10^{-6} a 10^{-5} m/s. Nota-se, ainda, que a permeabilidade do solo diminuiu com o acréscimo do rejeito. Entre os materiais estudados, aquele que apresentou menor

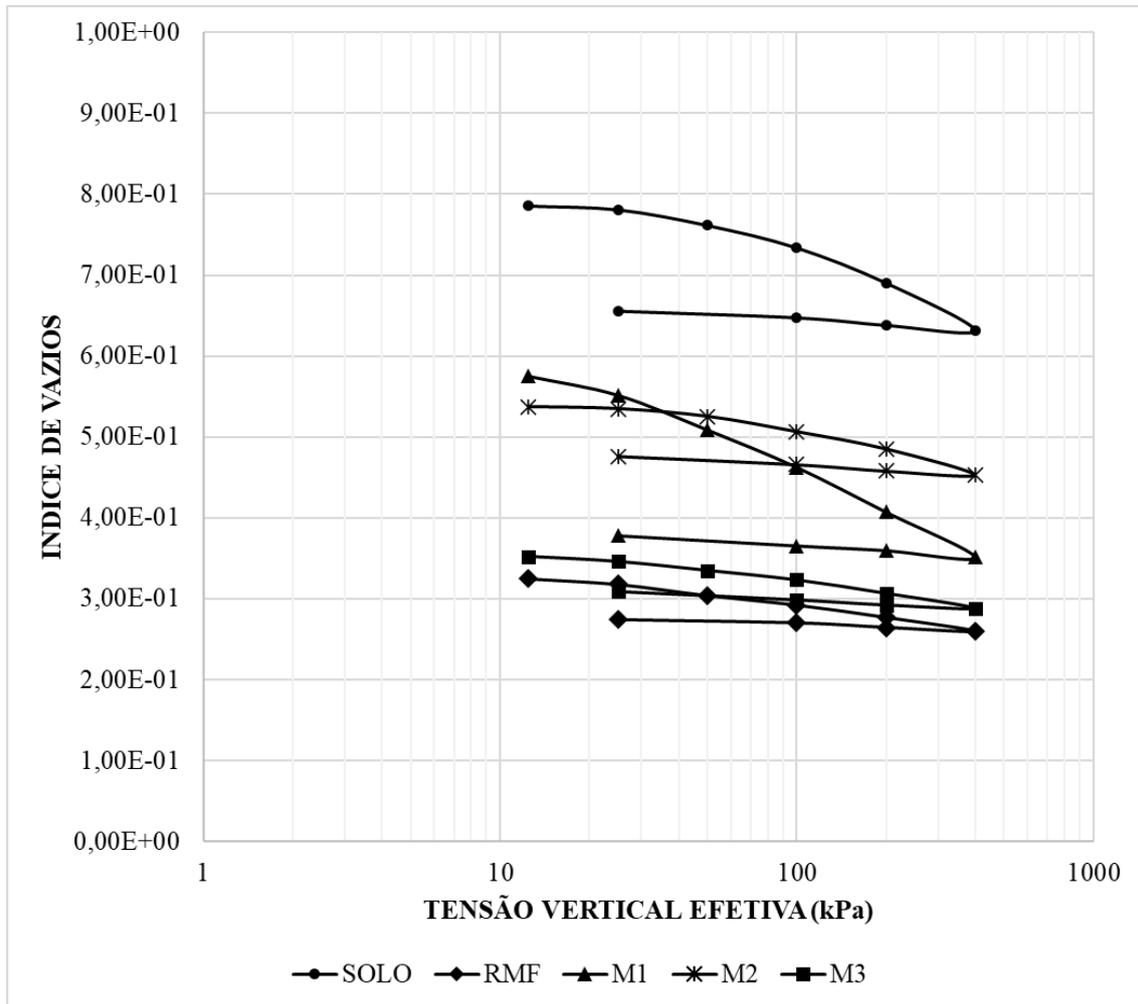
permeabilidade foi a mistura M2 (50% de rejeito, 50% de solo), com valores mais próximos do limite inferior desta faixa (10^{-6} m/s).

O rejeito, embora possua granulometria com predominância de silte (63% silte, 26% areia, 11% argila), possui permeabilidade na mesma faixa do solo residual (56% argila, 33% areia, 10% silte e 1% pedregulho). Já o rejeito de Fonseca e Villar (2014), cujas frações granulométricas eram de 49% silte, 37% areia e 14% argila, manteve-se na faixa de 10^{-7} a 10^{-6} m/s. Por sua vez, Machado (2022), cujas frações granulométricas do RMF eram de 57% silte, 28% areia, 14% argila e 1% pedregulho, obteve a permeabilidade por meio do ensaio com permeâmetro de parede flexível, à carga constante, e obteve faixas de valores de 10^{-6} a 10^{-5} m/s. Percebe-se, assim, que os resultados estão compatíveis com os da Literatura.

Com relação à aplicabilidade, como não há valores recomendados de permeabilidade para os materiais componentes das camadas de cobertura de aterro sanitário, todos os materiais podem ser utilizados para este fim.

Para mais, foi possível também traçar as curvas de variação do índice de vazios pela tensão vertical efetiva (Figura 48), para todos os materiais.

Figura 47 – Variação do índice de vazios por tensão vertical efetiva, para cada material



Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A partir das curvas apresentadas na Figura 48, é possível extrair os índices de compressão (C_c , C_r e C_s) do solo, sendo o C_c um importante parâmetro para a estimativa de recalque (SOUZA PINTO, 2006). Os referidos parâmetros, dados pelos coeficientes angulares de cada trecho da curva, são apresentados na Tabela 11, para cada material.

Tabela 11 – Índices de adensamento

MATERIAL	C_c	C_r	C_s
Solo	0,197	0,0154	0,014
M1	0,185	0,142	0,020
M2	0,107	0,008	0,020
M3	0,059	0,029	0,018
RMF	0,054	0,023	0,007

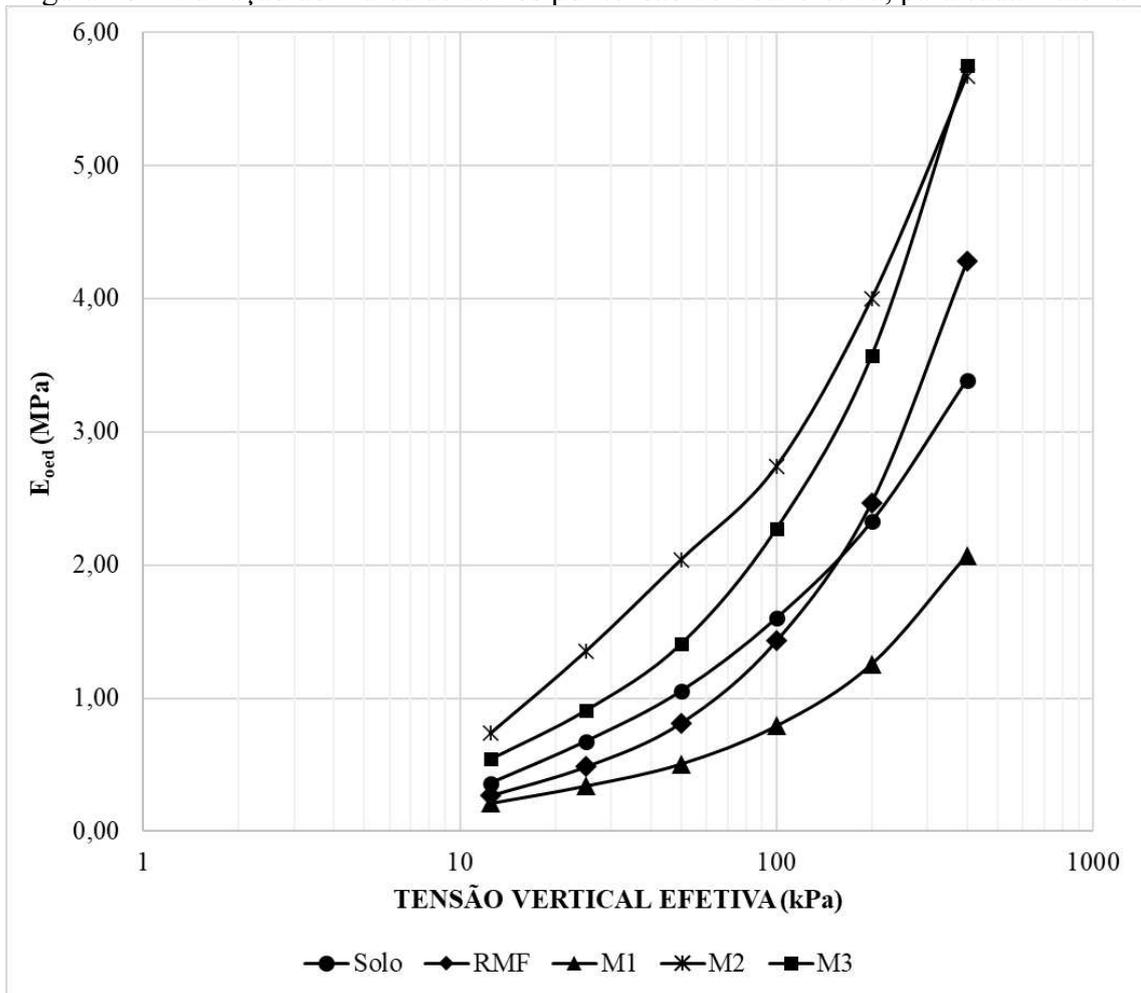
Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Neste caso, a Tabela 11 possibilita verificar que o índice de compressão (C_c) do solo diminuiu progressivamente com o incremento de rejeito. Isto era esperado devido à variação do índice de vazios do solo pela tensão vertical efetiva ser superior ao do rejeito. Devido a isso, as misturas com rejeito tornam o solo menos suscetível a recalques. Em relação aos demais índices, não houve uma variação proporcional do valor com o incremento do rejeito.

Além desses parâmetros, ainda é possível extrair o módulo de elasticidade oedométrico (E_{oed}). De forma análoga, este parâmetro também é utilizado para a estimativa de recalque, por exemplo. Destaca-se que, nesse caso, o cálculo de E_{oed} foi realizado para cada par de tensão. Na Figura 49, é apresentada a variação do E_{oed} em função da tensão vertical efetiva.

Figura 48 – Variação do índice de vazios por tensão vertical efetiva, para cada material



Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

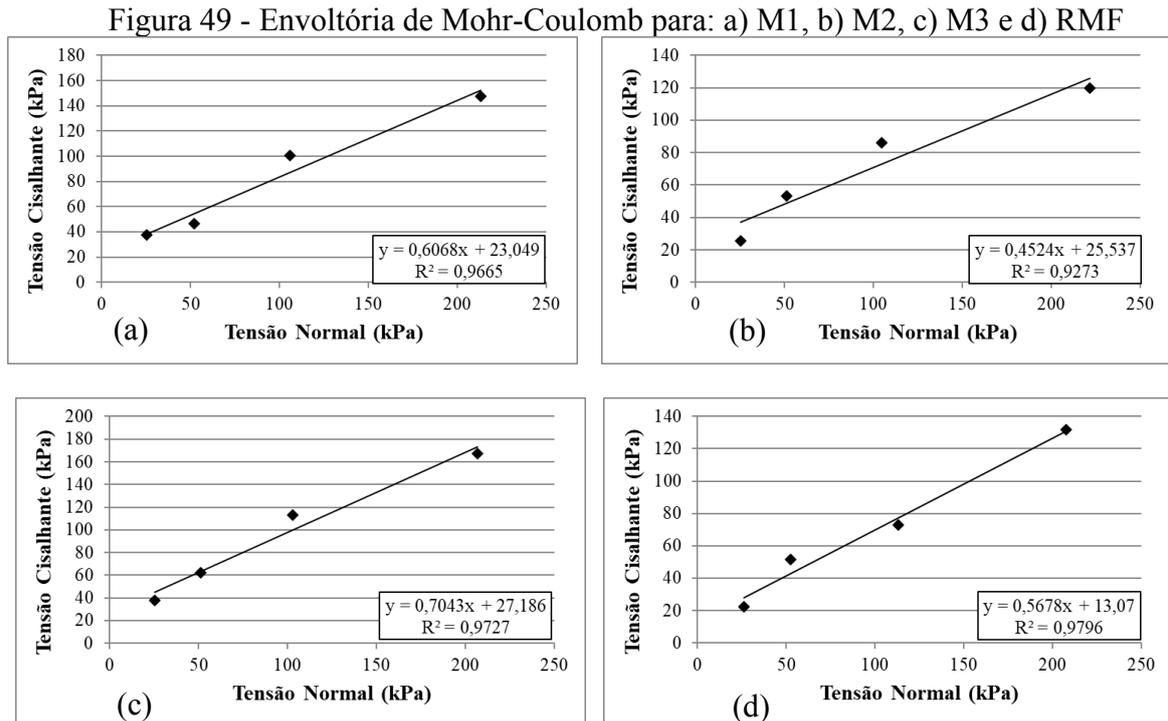
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A partir da Figura 49, percebe-se que o módulo oedométrico (E_{oed}) do rejeito é menor quando comparado ao solo, até as tensões efetivas de 100 kPa. Em relação às misturas, nota-se que não há uma relação direta entre incremento de rejeito e a diminuição ou aumento do E_{oed} quando comparado aos materiais puros. Além disso, nota-se que o material que apresentou valores superiores aos demais foi a mistura M2 (50% de rejeito, 50% de solo).

4.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO, M1, M2, M3 (SEM CIMENTO)

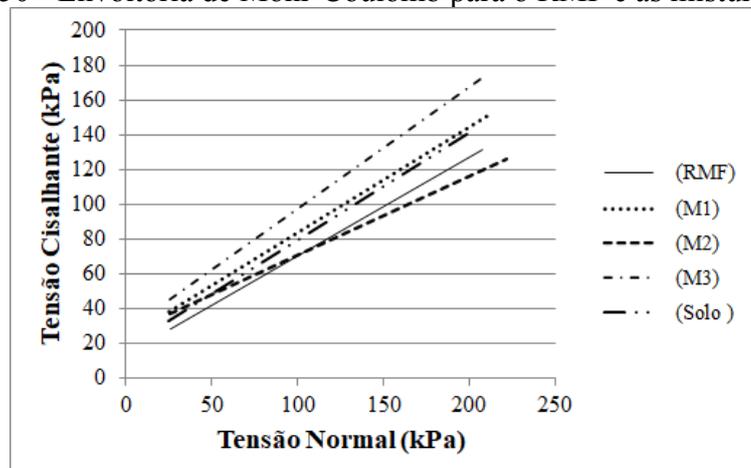
O rejeito e suas misturas foram ensaiados para obtenção do ângulo de atrito efetivo (φ') e da coesão efetiva (c'). As amostras foram submetidas às tensões de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Assim, cada amostra ensaiada para uma das referidas tensões gerou um par de

pontos no gráfico de tensão cisalhante máxima por tensão normal e permitiu traçar a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb. Na Figura 50, é apresentado o traçado das envoltórias para as misturas M1 (25% de rejeito, 75% de solo), M2 (50% de rejeito, 50% de solo), M3 (75% de rejeito, 25% de solo) e RMF. Com o propósito de ilustrar graficamente o comportamento entre as envoltórias, estas foram compiladas e apresentadas na Figura 51. E, ainda, os parâmetros obtidos para todos os materiais encontram-se na Tabela 12.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 50 - Envoltória de Mohr-Coulomb para o RMF e as misturas



Nota: Envoltória do solo obtida por Abrantes (2022).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 12 – Valores de φ' e c' para todos os materiais

Material	φ' (°)	c' (kPa)
SOLO (ABRANTES, 2022)	35,2	17,9
RMF	32,5	13,1
M1	31,2	23
M2	26,0	25,5
M3	40,4	27,2

Nota.: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Ao analisar as envoltórias (Figura 51), observa-se que a mistura M3 apresentou maior inclinação em relação às demais, o que corresponde a um maior valor do parâmetro ângulo de atrito. Além disso, nota-se também maior valor para o intercepto coesivo. Por outro lado, a mistura M2 é aquela que apresenta envoltória com menor inclinação e, conseqüentemente, menor valor para o ângulo de atrito.

Ao comparar os parâmetros obtidos para os demais materiais com aqueles obtidos para o solo (Tabela 12), percebe-se que o incremento de rejeito ocasionou em um aumento do intercepto coesivo, embora este valor para o rejeito puro (RMF) fosse menor que o do solo. Este comportamento pode ser atribuído à capacidade cimentante do óxido de ferro presente no rejeito (CAMAPUM DE CARVALHO, 2015) e ao aumento da fração argilosa nas misturas.

Já em relação ao ângulo de atrito (Tabela 12), este valor não apresentou uma tendência de comportamento com o incremento de rejeito ao solo. Nota-se, porém, que os valores se apresentaram em uma faixa de 26° a 40°.

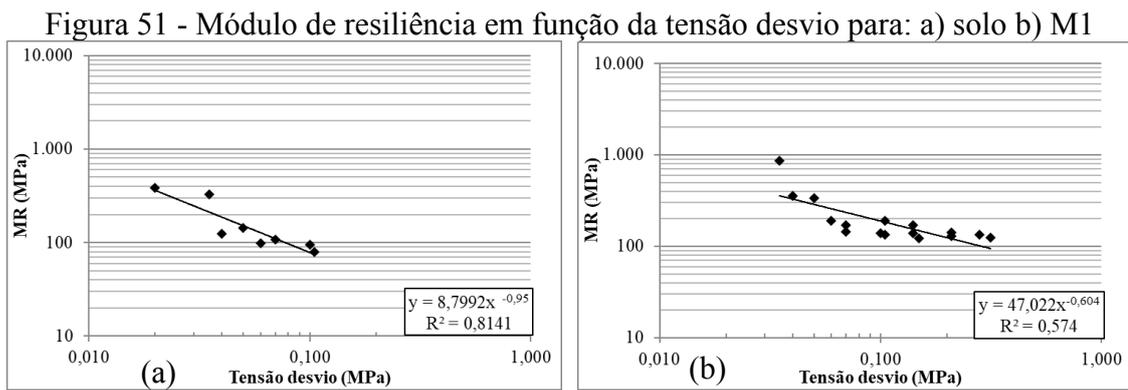
O ângulo de atrito do solo obtido por Abrantes (2022) está de acordo com a faixa de valores apontada por Souza Pinto (2006), de 30 a 38° para solos com índice de plasticidade até 10. Isto também ocorre para o intercepto coesivo, que, para solos argilosos, varia de 5 a 50 kPa (SOUZA PINTO, 2006).

Em relação ao rejeito puro, nota-se que os valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo (Tabela 12) estão próximos àqueles encontrados por Carneiro (2020), que obteve, para o ângulo de atrito, 33,8° e para a coesão, 8,75 kPa, e por Fonseca e Vilar (2014), cujo ângulo de atrito obtido foi de 42 e a coesão, 40 kPa. Os resultados de Machado (2022) foram obtidos por meio do Ensaio Triaxial e também são próximos dos resultados do rejeito em estudo, cujos valores foram de 32,03° e 2,53 kPa. Para as misturas, não foram encontrados trabalhos com condições semelhantes que permitam comparação.

4.6 MÓDULO DE RESILIÊNCIA, M1, M2, M3 (SEM CIMENTO)

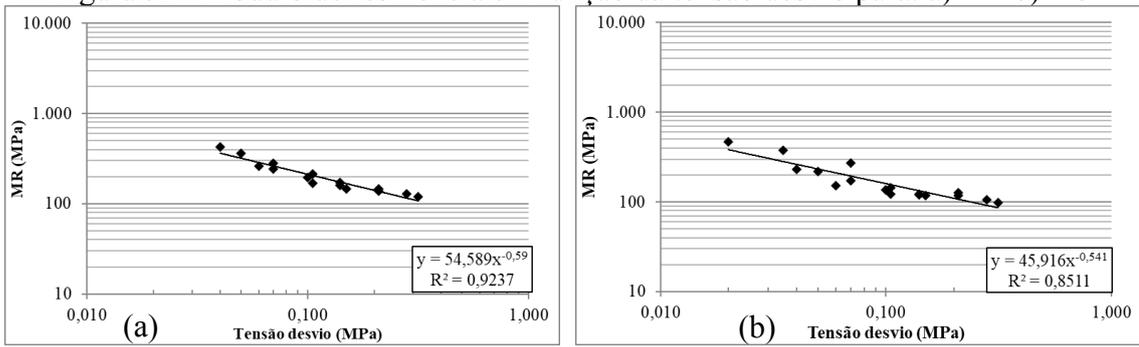
Conforme mencionado, existem diversos modelos matemáticos que descrevem o comportamento do MR em função das tensões solicitantes. O solo, o rejeito e as misturas M1 (25% de rejeito, 75% de solo), M2 (50% de rejeito, 50% de solo), M3 (75% de rejeito, 25% de solo) foram ensaiados para o MR. Como os materiais ensaiados apresentam granulometria de material fino, foi adotado o modelo simples $K-\sigma_d$ (em função da tensão desvio) e o modelo composto para fins de comparação (CUNTO, 1998). As equações do modelo simples $K-\sigma_3$ (em função da tensão confinante) também foram geradas para verificação, e apresentaram R^2 inferior a 1, o que corrobora com a utilização deste modelo, conforme apresentado adiante na Tabela 14.

Assim, foram adotadas como equações representativas de cada material aquelas que apresentaram maior R^2 entre cada repetição. Dessa maneira, as equações do modelo simples $K-\sigma_d$ são apresentadas nas Figuras 52 e 53 para o solo, mistura M1, M2, M3, respectivamente, e na Figura 54, para o rejeito. Os coeficientes das equações e os valores médios de MR estão apresentados na Tabela 13. Já na Figura 55 são apresentadas todas as curvas compiladas em uma mesma área de plotagem no gráfico. Por fim, na Tabela 13 são apresentados os resultados dos coeficientes das equações do modelo simples em função da tensão desvio.



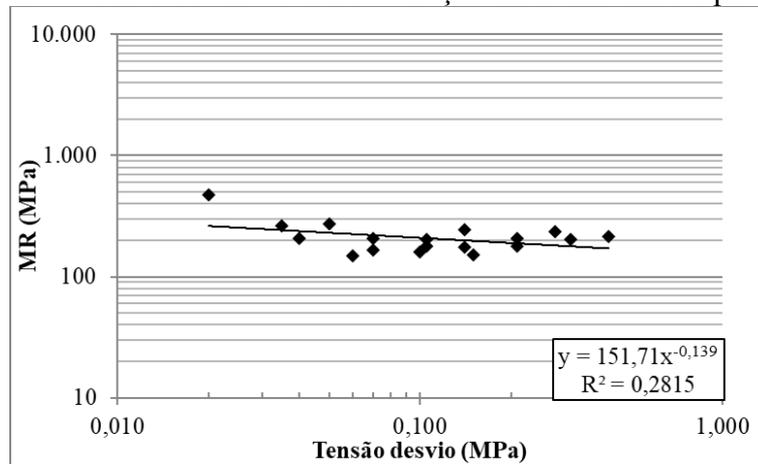
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 52 - Módulo de resiliência em função da tensão desvio para: a) M2 b) M3



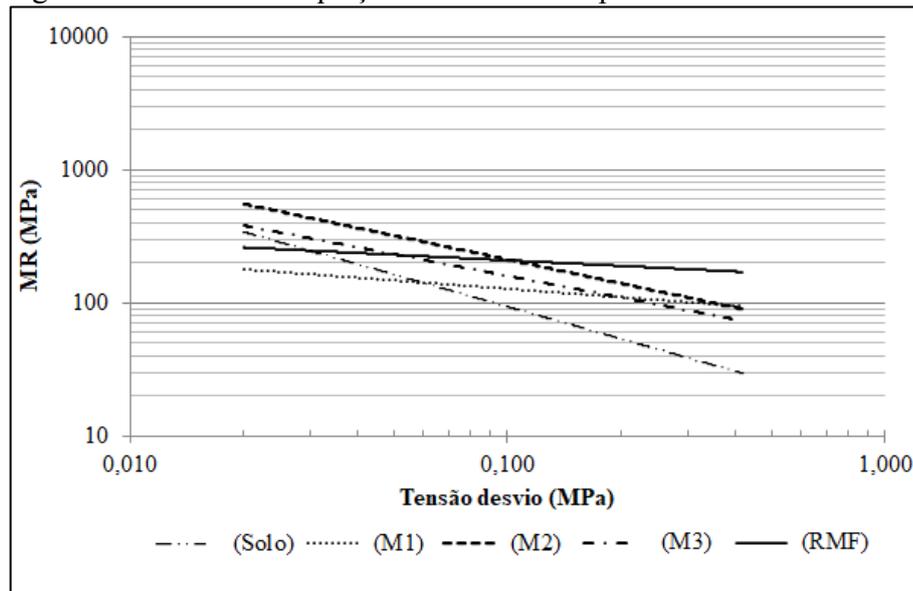
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 53 - Módulo de resiliência em função da tensão desvio para o RMF



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 54 - Curvas da equação do modelo simples de todos os materiais



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 13 – Coeficientes e valores médios de MR pelo modelo simples em função da tensão desvio

MATERIAL	K ₁	K ₂	R ²	MR médio (MPa)
Solo	8,79	-0,95	0,81	170,00
M1	47,02	-0,60	0,57	217,33
M2	54,59	-0,59	0,92	211,00
M3	45,92	-0,54	0,85	182,47
RMF	151,71	-0,13	0,28	216,44

Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 14 – Coeficientes das equações pelo modelo simples em função da tensão confinante

MATERIAL	K ₁	K ₂	R ²
Solo	38,31	-0,38	0,08
M1	61,72	-0,38	0,14
M2	65,96	-0,39	0,41
M3	42,10	-0,47	0,40
RMF	192,65	-0,03	0,04

Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Por meio da comparação entre a Tabela 13 e a Tabela 14, nota-se que a primeira apresenta valores de R² mais próximos a 1 quando comparado à segunda. Isto é esperado, uma vez que o modelo simples em função da tensão desvio é mais representativo para solo finos, conforme afirma Cunto (1998). Desta forma, o modelo simples em função da tensão confinante não representa os materiais em estudo e seus valores não devem ser utilizados.

Sabe-se que, no Brasil, é utilizado o método MeDiNa quando se deseja dimensionar um pavimento através do modelo mecanístico-empírico. Não se utiliza, assim, valores lineares de MR e deformação permanente (DP) para este dimensionamento. Entretanto, o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP) elaborou uma instrução de projeto de pavimentos com valores usuais de MR para determinados tipos de solo. De acordo com o DER/SP (2006), para a camada de base e sub-base, são recomendados valores de MR na faixa de 150 a 300 MPa. Como a presente pesquisa não fará a modelagem de um

pavimento no programa MeDiNa, foram utilizados esses valores para fins de comparação com aqueles obtidos e apresentados na Tabela 13. Nota-se, assim, que todos os materiais possuem potencial para a utilização nessas camadas.

Entretanto, as camadas de base e sub-base apresentam as especificações de serviço que limitam a utilização do rejeito e das misturas devido a granulometria e índice de grupo (I.G.) (DNER, 1981; DNIT, 2010; DNIT, 2022). A porcentagem de material passante na peneira de nº 200 é superior a 60% para todos os materiais. As faixas granulométricas apresentadas na Tabela 3 e que são critério para aplicação do material como camada de base possuem, como máximo permitido de passante, o valor de 25%, o que impossibilita o uso. Em relação ao I.G., embora os valores de LL e LP para as misturas não tenham sido determinados, é possível inferir que os respectivos índices são maiores do que 0 devido à porcentagem de material passante na peneira de nº 200, que já torna o I.G. diferente de 0 e impossibilita o uso para sub-base. Assim, mesmo que os valores de MR atendam à faixa recomendada pelo DER/SP (2006), o que já não aconteceu para as especificações de serviço destacadas anteriormente, a utilização não é possível sem a estabilização granulométrica. Destaca-se ainda que os materiais já não haviam demonstrado potencial para uso em camadas de pavimentos flexíveis quanto à análise dos valores de ISC e expansão.

Para M1, as frações foram dadas por argila (42%), areia (35%) e silte (23%). Já para M2, as frações foram de argila (35%), areia (30%) e silte (35%). Por fim, M3 apresentou frações de argila (28%), areia (25%) e silte (47%).

Além da análise por valores de MR lineares, é possível fazer a comparação entre as equações obtidas nesta pesquisa com aquelas encontradas para outros solos e apresentadas na Literatura. Marangon (2004) estudou diversos solos da Zona da Mata (MG) em relação ao MR. Com o propósito de comparar o solo em estudo com alguns estudados por Marangon (2004), foram então escolhidos um solo que apresentasse apenas granulometria similar (ZM 12) e um solo que apresentasse parâmetros de compactação na energia normal e granulometria semelhantes (ZM 11). O mesmo procedimento foi realizado para a pesquisa de Gomes (2021), cujo solo escolhido (ZM 10') foi retirado na cidade de Juiz de Fora – MG. Ambos os autores utilizaram a Energia Normal de Compactação. Para melhor compreensão, os dados correspondentes aos solos foram compilados na Tabela 15. Na Figura 56, são apresentadas as curvas e as equações de MR em função da tensão desvio para o solo em estudo, ZM 11, ZM 12 e ZM10'.

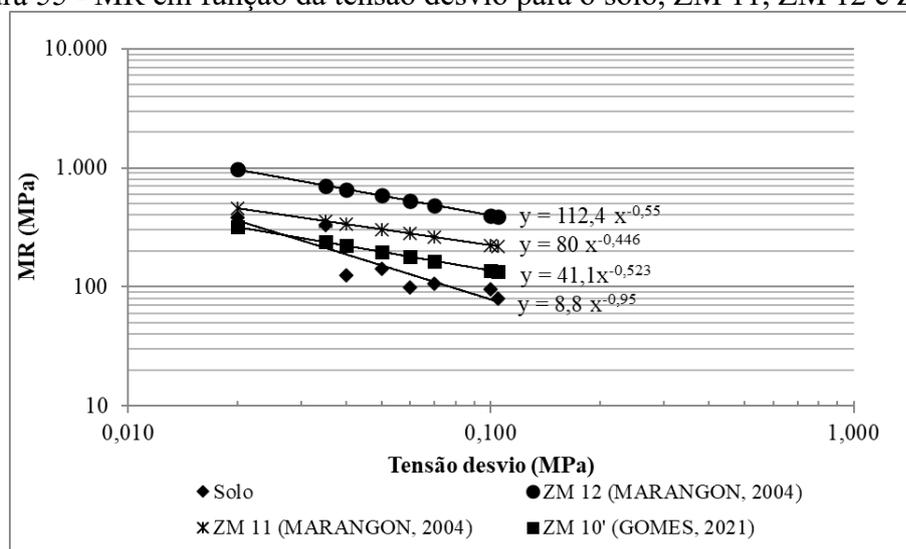
Tabela 15 – Frações granulométricas e parâmetros ótimos de compactação para o solo, ZM 11, ZM 12 e ZM 10'

Material	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$p_{dmáx}$ (g/cm ³)	w_{ot} (%)
Solo Puro	1,0	33,0	10,0	56,0	1,54	26,8
ZM 11	1,3	32,7	5,5	61,0	1,52	27,0
ZM 12	0,6	37,4	8,5	54,5	1,64	21,0
ZM 10'	2,2	28,9	12,6	56,3	1,516	26,0

Nota: ZM 11 = Marangon (2004); ZM 12 = Marangon (2004); ZM 10' = Gomes (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 55 - MR em função da tensão desvio para o solo, ZM 11, ZM 12 e ZM10'



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Dessa forma, a partir da Figura 56 é possível perceber que as retas apresentam uma tendência de comportamento similar, embora os solos ZM 11, ZM 12 e ZM 10' apresentem um valor de MR mais elevado para cada tensão quando comparados ao solo em estudo.

Em relação ao RMF, não foram encontradas informações na Literatura similares àquelas do solo. Adotou-se, então, as equações de rejeitos que foram ensaiados na mesma energia de compactação, o que esteve presente em Campanha (2011) e em Dantas (2019), que utilizaram a Energia Normal. A Tabela 16 apresenta as frações granulométricas e os parâmetros de compactação para os rejeitos.

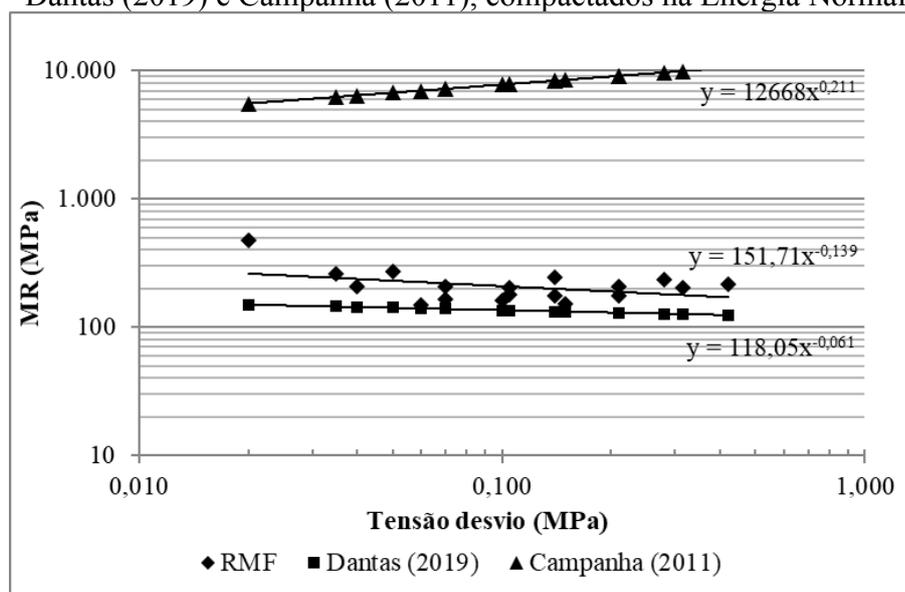
Tabela 16 – Frações granulométricas e parâmetros de compactação para o RMF e para os rejeitos de Campanha (2011) e Dantas (2019)

Material	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$p_{d\text{máx}}$ (g/cm ³)	Wótimo (%)
RMF	0	26	63	11	2,130	10,5
Campanha (2011)	0	59	39	2	2,181	9,2
Dantas (2019)	0	25	9	66	2,621	9,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 57, são apresentadas as curvas e as equações de MR em função da tensão desvio para o rejeito em estudo (RMF) e aqueles estudados por Dantas (2019) e Campanha (2011), compactados na Energia Normal.

Figura 56 - MR em função da tensão desvio para o rejeito (RMF) e aqueles estudados por Dantas (2019) e Campanha (2011), compactados na Energia Normal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com base na Figura 57, é possível identificar semelhança de tendência entre o rejeito desta pesquisa e aquele estudado por Dantas (2019). Já a não similaridade com Campanha (2011) era esperada e foi confirmada, uma vez que os rejeitos apresentaram granulometria e parâmetros de compactação destoantes.

Por meio da comparação entre as curvas de todos os materiais apresentadas na Figura 55, é possível perceber que, à medida que se acrescenta rejeito ao solo, diminui-se a

inclinação das curvas, o que era o esperado, uma vez que a mistura com mais rejeito tenderá a apresentar comportamento mais próximo da forma deste material puro.

Há, ainda, outro aspecto relacionado ao índice de regressão obtido para o rejeito. Nota-se que o R^2 pelo modelo que considera a tensão desvio (Tabela 13) é maior que o que considera a tensão confinante (Tabela 14). Mesmo assim, este valor está distante de 1. Assim, estes modelos simples apresentam baixa confiabilidade. Dantas (2019) percebeu situação similar com o seu rejeito em estudo. O autor concluiu que, embora a granulometria do rejeito seja predominantemente de partículas finas, o material não apresenta comportamento de material fino, já que as sílicas presentes no minério sofreram redução de tamanho durante o processo de beneficiamento. Esta redução de tamanhos de partícula é citada por (LUZ *et al.*, 2018) como uma das fases do processo de beneficiamento.

Por fim, não foram encontradas condições semelhantes na Literatura que permitam a comparação com as curvas obtidas para cada mistura.

Já em relação ao modelo composto, por se tratar de equação com três variáveis, o seu gráfico é tridimensional e, portanto, não foi apresentado. No entanto, os coeficientes das equações e os valores de R^2 estão mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficientes e valores de R^2 pelo modelo composto

Material	K_1	K_2	K_3	R^2
Solo	29	0,5086	-1,1476	0,892
M1	113	0,2707	-0,3927	0,674
M2	63	0,1232	-0,6818	0,938
M3	53	0,1086	-0,6149	0,865
RMF	266	0,3066	-0,1589	0,835

Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com vistas à comparação, optou-se por sintetizar os resultados encontrados para o modelo composto por Marangon (2004), Campanha (2011) e Dantas (2019). A Tabela 18 mostra os coeficientes das equações e os valores de R^2 do modelo composto obtidos pelos referidos autores.

Tabela 18 – Coeficientes e valores de R² do modelo composto, para os outros autores

MATERIAL	K ₁	K ₂	K ₃	R ²
ZM 11 (MARANGON, 2004)	92	0,108	-0,518	0,996
ZM 12 (MARANGON, 2004)	132	0,117	-0,626	0,997
RMF (CAMPANHA, 2011)	13280	0,211	-0,0147	0,89
RMF (DANTAS, 2019)	113,658	0,111	0,313	0,865

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Assim, os valores obtidos de R² para os materiais em estudo (Tabela 18) mostraram que o modelo composto teve uma boa representação dos MR's. Isso já era esperado, uma vez que tanto o solo quanto o rejeito apresentam em sua granulometria um percentual considerável da fração de areia, o que pode ter influenciado na parcela relativa a σ_3 , que não foi considerada pelo modelo simples (MACEDO, 1996). Em relação aos materiais estudados por Marangon (2004), Campanha (2011) e Dantas (2019), nota-se que o modelo composto também apresentou uma boa representação destes materiais.

Ao substituir os pares de tensão do ensaio na equação do modelo composto de cada material, pode-se verificar o comportamento da variação do MR pela tensão aplicada. Dessa maneira, é possível visualizar que o valor de MR de um material em relação ao outro pode ser maior para um certo par de tensão, mas esse comportamento pode não ser seguido para um outro par de tensão. Na Tabela 19 são mostrados os valores de MR dos materiais após as referidas substituições.

Tabela 19 – Valores de MR para cada material e para cada par de tensões utilizadas no ensaio

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)				
		SOLO	M1	M2	M3	RMF
0,020	0,020	353	182	560	384	149
0,020	0,040	159	139	349	251	134
0,020	0,060	100	118	265	195	125
0,035	0,035	247	170	410	289	162
0,035	0,070	112	130	255	189	145
0,035	0,105	70	110	194	147	136
0,050	0,050	197	163	336	242	171
0,050	0,100	89	124	209	158	153
0,050	0,150	56	106	159	123	144
0,070	0,070	159	156	278	204	180
0,070	0,140	72	119	173	133	161
0,070	0,210	45	102	132	104	151

0,105	0,105	122	149	222	166	191
0,105	0,210	55	113	138	108	171
0,105	0,315	35	97	105	84	160
0,140	0,140	102	144	189	143	199
0,140	0,280	46	109	118	94	178
0,140	0,420	29	93	89	73	167

Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Nota-se na Tabela 19, por exemplo, que os valores de MR para M2 são sempre maiores que o do rejeito até o 12º ponto ($\sigma_3=0,07$ MPa e $\sigma_d=0,21$ MPa), a partir do qual os valores são maiores para o RMF. De um modo geral, a mistura M2 apresentou os melhores valores de MR até o ponto mencionado.

Por meio da análise das faixas de valores recomendadas por DER/SP (2006) (de 150 MPa a 300 MPa para sub-bases e bases), e de acordo com o que foi realizado por Andalicio *et al.* (2020), nota-se que todos os materiais se enquadram nesta faixa, conforme apontado na Tabela 13. Já pela Tabela 19, vê-se que muitos pares de tensão apresentam valores de MR abaixo do recomendado. Nestes casos, deve-se analisar à qual solicitação o material estará submetido e se os pares de tensão correspondentes estão dentro deste intervalo.

Por fim, ao se comparar os resultados obtidos de MR pelo modelo simples em função da tensão desvio com aqueles apresentados no item de ISC e expansão (tópico 4.3), percebe-se que, pelo método do critério do ISC do DNIT, os materiais não foram aceitos (DNER, 1981; DNIT, 2010; DNIT, 2022).

Como o objetivo da pesquisa em relação ao parâmetro MR foi verificar a influência na rigidez do solo com a adição de rejeito e compará-lo com os valores recomendados por DER/SP (2006), não foi realizado o ensaio de deformação permanente. Caso este fosse realizado, o que é uma sugestão para pesquisas futuras, um pavimento flexível poderia ser dimensionado pelo programa MeDiNa, por exemplo, possibilitando assim a verificação destes materiais quanto ao uso em alguma camada estrutural.

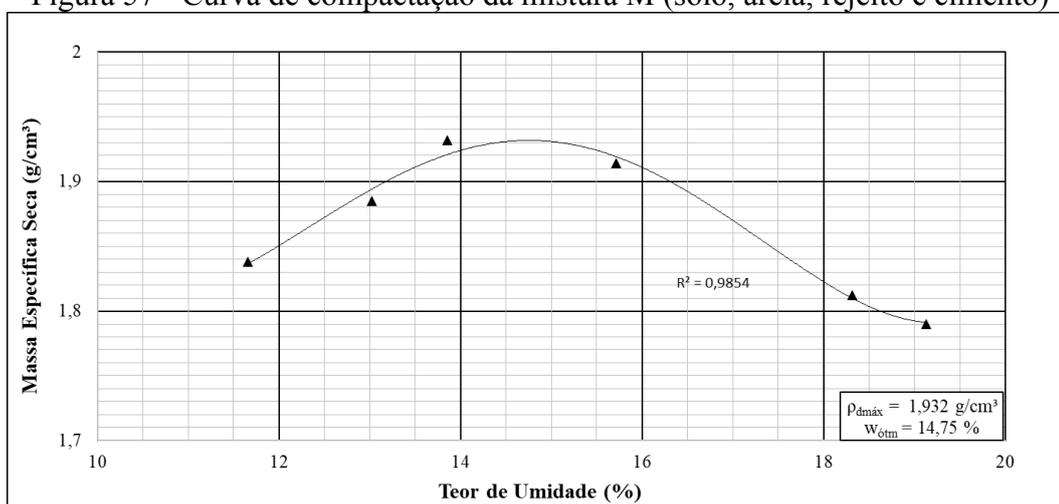
4.7 MISTURA SOLO-AREIA-REJEITO-CIMENTO

Neste tópico, são apresentados os resultados e discussões obtidos para a mistura de solo-areia-rejeito-cimento. Para isto, foram realizados os ensaios laboratoriais (compactação e resistência à compressão simples) e a modelagem computacional.

4.7.1 COMPACTAÇÃO – MISTURA MC (SOLO, AREIA, REJEITO E CIMENTO)

A partir do procedimento estabelecido na norma NBR 12023 (ABNT, 2012), foi gerada uma curva de compactação da mistura MC para a obtenção da umidade ótima e massa específica aparente seca máximo, na Energia Normal. A partir da massa específica aparente seca e do teor de umidade ótima, obteve-se a massa específica aparente natural (ou peso específico aparente, γ , equação 8) utilizada na modelagem apresentada mais adiante. A Figura 45 apresenta a curva de compactação. Dessa forma, foi obtido um teor de umidade ótimo de 14,75% e uma massa específica seca máxima de 1,932 g/cm³.

Figura 57 - Curva de compactação da mistura M (solo, areia, rejeito e cimento)



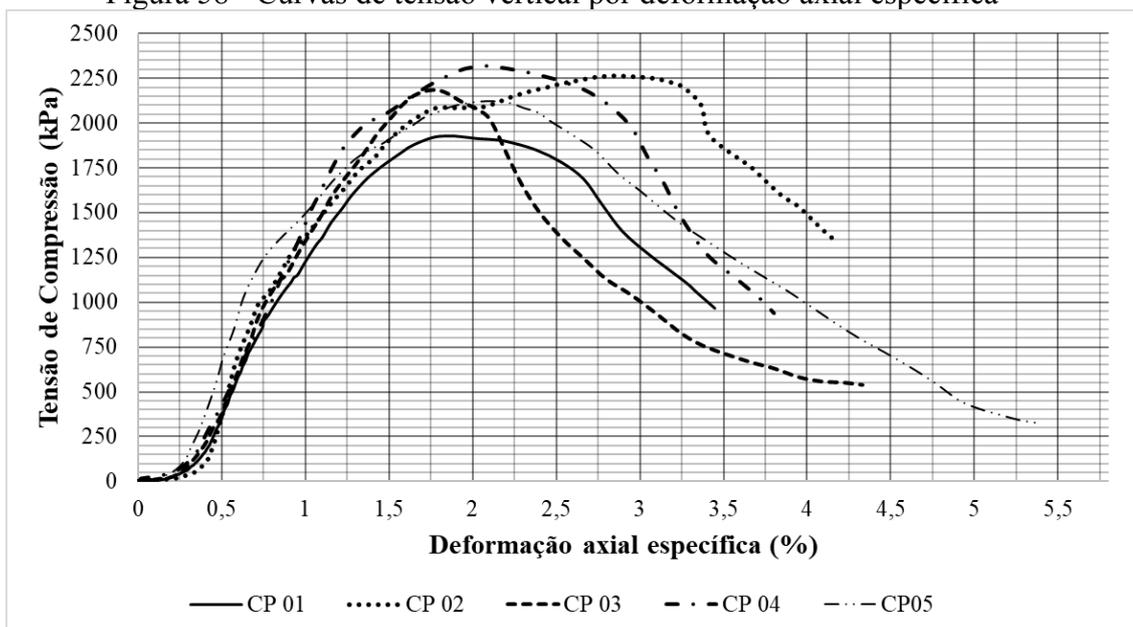
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com base na curva de compactação, foram compactadas amostras da Mistura MC (solo, areia, rejeito e cimento) na umidade ótima obtida previamente e igual a 14,75% destinados ao ensaio de resistência à compressão simples (RCS).

4.7.2 RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Com os dados de força axial aplicada e deslocamento vertical correspondente, foram traçadas as curvas de tensão vertical por deformação axial específica, como pode ser visto na Figura 58. Destaca-se que entre os dez corpos de prova ensaiados, cinco apresentaram resultados acima do desvio padrão e foram descartados. Através das curvas, foi possível a determinação dos parâmetros deste ensaio, os quais são mostrados na Tabela 20.

Figura 58 - Curvas de tensão vertical por deformação axial específica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 20 – Valores dos parâmetros do ensaio de RCS

Material	RCS (kPa)	W _{ótimo} (%)	W _{ruptura} (%)	ε (%)	E _{50%} (MPa)
CP 01	1928,30	14,72	12,96	1,87	120,00
CP 02	2261,11	14,74	13,39	2,84	136,00
CP 03	2180,80	14,71	13,42	1,74	131,00
CP 04	2316,91	14,73	13,14	2,07	146,00
CP 05	2121,22	14,75	12,98	2,08	163,00
<i>Média Aritmética</i>	<i>2161,67</i>	<i>14,73</i>	<i>13,18</i>	<i>2,12</i>	<i>139,20</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>150,38</i>	<i>0,02</i>	<i>0,22</i>	<i>0,43</i>	<i>16,27</i>
<i>Coefficiente de variação</i>	<i>6,96%</i>	<i>0,11</i>	<i>1,66</i>	<i>20,14</i>	<i>11,69%</i>

Nota: RCS = Resistência à Compressão Simples no instante do rompimento; E_{50%} = Módulo de Elasticidade 50%;

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A norma NBR 8491 (ABNT, 2012) determina que o valor mínimo de RCS do conjunto não deve ser inferior à 2,0 MPa, além de que cada valor individual não pode ser inferior à 1,7 MPa. Nota-se na Tabela 20 que os valores de RCS para os CPs estão, portanto, acima do limite recomendado. Em relação a esta avaliação, pode-se inferir que a mistura apresenta uma utilização potencial para confecção de tijolos de solo-cimento. Por meio do coeficiente de variação, pode-se perceber que os valores de RCS de cada corpo de prova diferem menos do que 10% do valor da média aritmética, o que foi considerado aceitável. Rolin (1999) obteve, para uma mistura de solo com adição de 8% de cimento, moldado em formato cilíndrico, 3,2

MPa de resistência à compressão simples. Já Assis *et al.* (2018) obteve, para um tijolo com 50% de rejeito, uma RCS de 7,58 MPa.

Em relação ao módulo de elasticidade $E_{50\%}$, o coeficiente de variação se apresentou próximo a 12%, mas também foi considerado aceitável devido a sua obtenção ter sido de forma gráfica. Para um tijolo de solo-cimento com 8% de adição de cimento, Rolin (1999) obteve um valor $E_{50\%}$ de 120 MPa, o que está coerente com o valor de 139,20 MPa obtido.

Desta forma, o parâmetro $E_{50\%}$ retirado do ensaio é utilizado como alimentação do *software* utilizado na modelagem. Além deste, a RCS é utilizada para comparação com o resultado obtido ao final da modelagem. Assim, ambos os parâmetros são de interesse para o programa.

4.7.3 Modelagem no *software* PLAXIS 2D

A modelagem no *software* PLAXIS 2D foi a ferramenta utilizada nesta pesquisa para demonstrar se os resultados obtidos por ensaios de laboratório estão próximos da resistência à compressão que o mesmo CP resistiria com o simulado por meio das análises matemáticas. Assim, a partir da inserção da deformação axial obtida no ensaio, é calculada numericamente uma resistência à compressão, que serve como comparativo com o obtido por meio do ensaio laboratorial. Havendo boa concordância entre a resistência à compressão de ensaio e obtida pelo modelo numérico pode-se dizer que os parâmetros de resistência da mistura, calculados pela metodologia de elementos finitos, são válidos para outras modelagens.

Como as dimensões dos cinco CP's moldados para o ensaio de RCS apresentaram pouca diferença entre si, adotou-se o valor médio e arredondado mais próximo para construir o modelo a ser simulado no PAXIS 2. Desta forma, a Tabela 21 apresenta os dados de entrada para o PLAXIS 2D, que são comuns aos cinco CPs.

Tabela 21 - Dados de entrada para o PLAXIS 2D

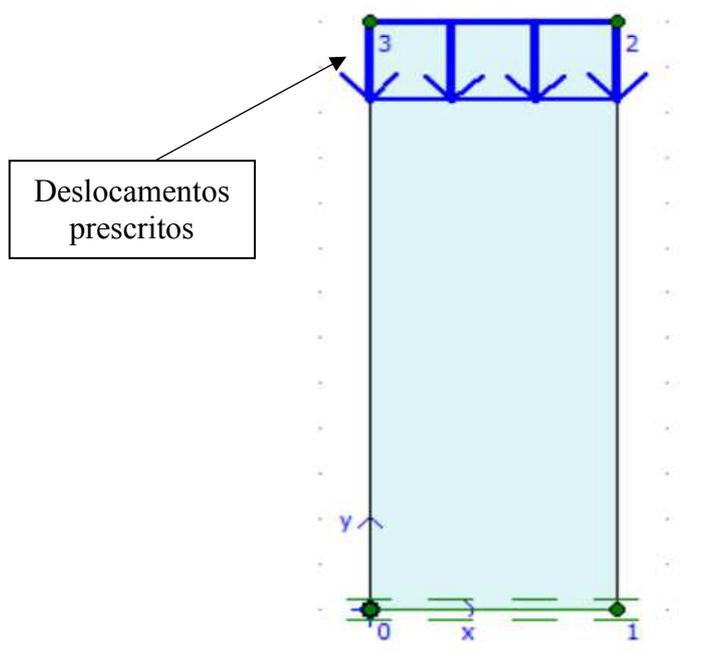
Diâmetro (\emptyset)	100 mm
Altura (h)	120 mm
γ_{sat}	22 kN/m ³
γ	22 kN/m ³
Modelo	Axissimétrico

Elementos	15 nós
Tipo de material	Drenado
Critério de ruptura	Mohr-Coulomb
Modelo Constitutivo	Elasto-plástico

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Dessa forma, na Figura 59 é apresentado o modelo adotado. Nota-se que o eixo das ordenadas se encontra na metade do diâmetro do CP, de acordo com o perfil axissimétrico. Além disso, as setas apresentadas na Figura 58 indicam os deslocamentos prescritos, que foram os deslocamentos relativos ao momento em que se atingiu a tensão axial máxima no ensaio. Estes deslocamentos provêm dos ensaios de compressão simples. As condições de contorno fixam apenas o deslocamento na base, conforme ocorre no Ensaio de Resistência à Compressão Simples.

Figura 59 – Modelo proposto para a simulação no PLAXIS 2D



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Além de especificar as condições geométricas e de contorno, é preciso inserir as propriedades do material. A Tabela 22 apresenta os valores aplicados para a definição dos materiais. Conforme mencionado, o valor de $E_{50\%}$ foi obtido pelo ensaio de RCS da mistura M (solo-areia-rejeito-cimento), o valor do coeficiente de Poisson foi adotado com base na

Literatura ($\nu=0,20$, $\nu=0,25$, $\nu=0,30$) (DELGADO, 2013; MONTE, 2012; JAE, 1995) e os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto coesivo e ângulo de atrito) foram calculados conforme as expressões apresentadas por Piratheepan *et al.* (2012), com base no valor de RCS obtido em cada ensaio de compressão não confinada.

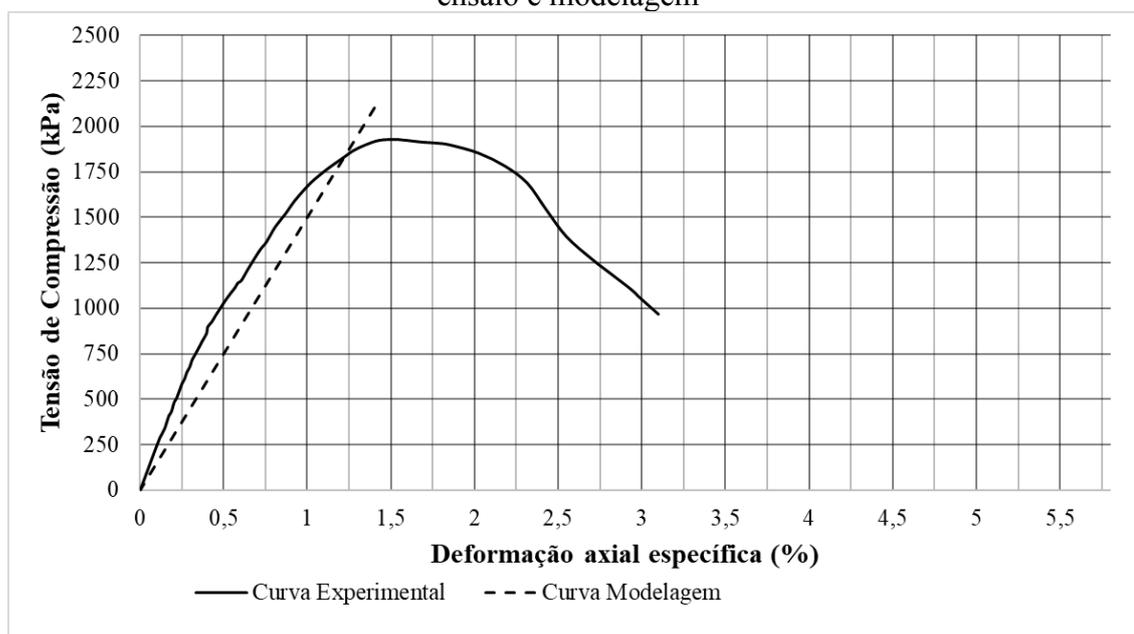
Tabela 22 - Dados de entrada para o *software* PLAXIS 2D para cada CP

CP	E _{50%} (MPa)	c (kPa)	Φ (°)	RCS (kPa)	Deslocamento prescrito (mm)
01	120	364	48,7°	1928	2,41
02	136	427	48,7°	2261	3,64
03	131	412	48,7°	2181	2,51
04	146	437	48,7°	2317	2,64
05	163	400	48,7°	2121	2,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

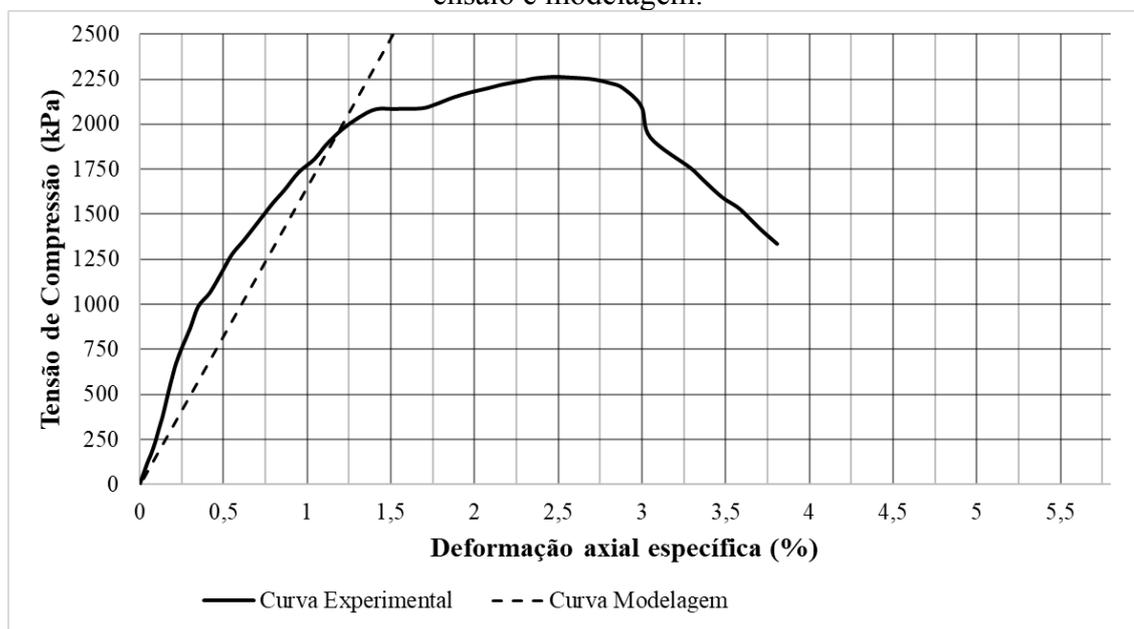
Por fim, antes de seguir os procedimentos para os cálculos dos esforços, foi definido o deslocamento prescrito para cada CP, de acordo com o deslocamento real obtido em cada ensaio no instante da ruptura. Assim, nas Figuras 60 a 64 são apresentadas as curvas de tensão vertical por deformação axial específica para os CP's 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, e para $\nu = 0,25$. No Anexo 1, são apresentadas as Figuras 65 a 69, com a malha de deformação do corpo de prova, o diagrama de tensões efetivas e dos pontos plásticos ao longo do CP's.

Figura 60 – Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 01 – ensaio e modelagem



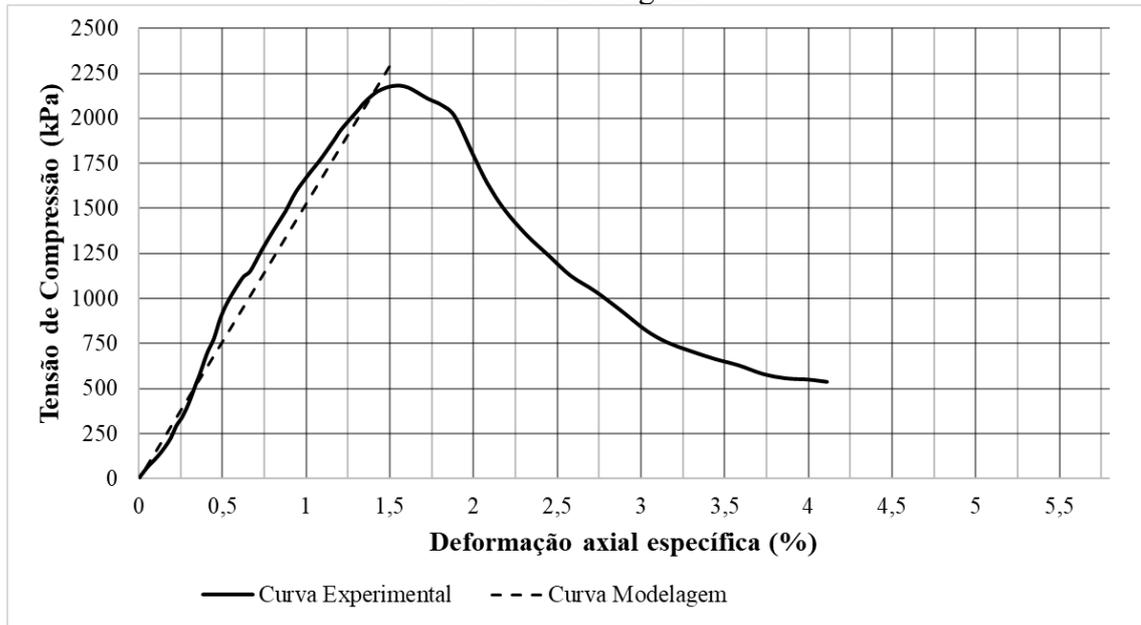
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 61 - Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 02 – ensaio e modelagem.



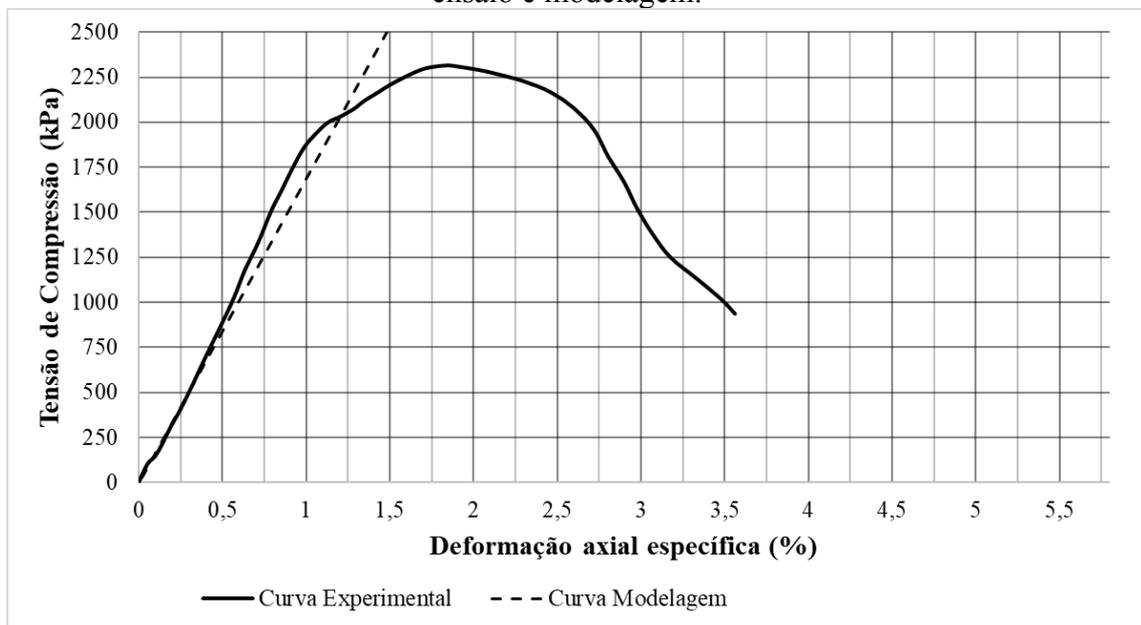
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 62 – Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 03 – ensaio e modelagem.



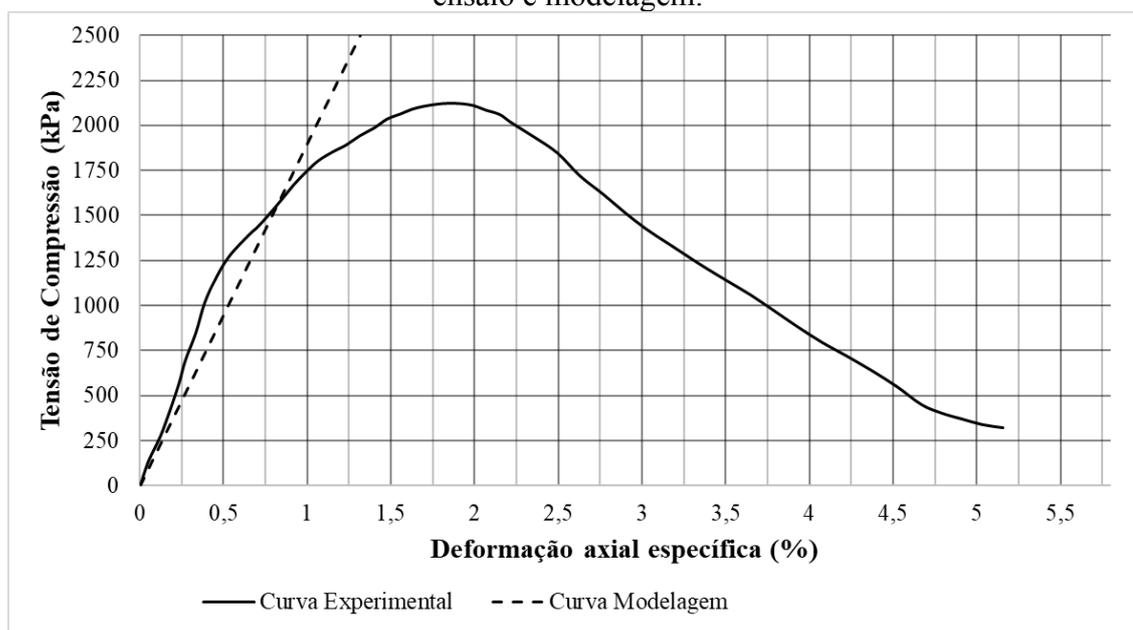
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 63 – Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 04 – ensaio e modelagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 64 – Curvas de tensão vertical efetiva por deformação axial para a simulação CP 05 – ensaio e modelagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

De posse do apresentado nas Figuras 60 a 64, foi construída a Tabela 23, que apresenta os principais resultados obtidos nas modelagens com o PLAXIS 2D em comparação com os obtidos no ensaio laboratorial de compressão não confinada em termos de tensão axial máxima atingida no ensaio. Já a Tabela 24 apresenta os valores de $E_{50\%}$ para esta mesma comparação.

Tabela 23 - Resultados do PLAXIS 2D e ensaio de compressão não confinada, em relação à tensão axial máxima e à deformação

Amostra	Ensaio		Simulação PLAXIS 2D					
	σ_{1E}	Deformação axial específica	σ_{1P}	Deformação axial específica	σ_{1P}	Deformação axial específica	σ_{1P}	Deformação axial específica
	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
CP 01	1928	1,87	2054	1,5	2103	1,4	1987	1,2
CP 02	2261	2,84	3515	2,3	3468	2,1	3040	1,9
CP 03	2181	1,74	2332	1,6	2288	1,5	2278	1,3
CP 04	2317	2,07	2724	1,7	2700	1,6	2668	1,4
CP 05	2121	2,08	3063	1,7	3038	1,6	3222	1,6

Nota: σ_{1E} = tensão axial máxima do ensaio na ruptura; σ_{1P} = tensão axial máxima obtida na modelagem no PLAXIS 2D; ν = Coeficiente de Poisson.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 24 - Resultados do PLAXIS 2D e ensaio de compressão não confinada, em relação à $E_{50\%}$

Amostra	Ensaio	Simulação PLAXIS 2D		
		$\nu = 0,20$	$\nu = 0,25$	$\nu = 0,30$
	$E_{50\%E}$	$E_{50\%P}$	$E_{50\%P}$	$E_{50\%P}$
CP 01	120	137	150	166
CP 02	136	153	165	160
CP 03	131	146	153	175
CP 04	146	160	169	191
CP 05	163	180	190	201

Nota: $E_{50\%E}$ = módulo de elasticidade 50% do ensaio; $E_{50\%P}$ = módulo de elasticidade 50% obtido na modelagem no PLAXIS 2D; ν = Coeficiente de Poisson.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Pelas Tabelas 23 e 24, é possível perceber que os resultados de tensão axial máxima e deformação axial específica, além do módulo de elasticidade 50%, da modelagem computacional estão coerentes com os resultados obtidos pelo ensaio de laboratório. Para cada deslocamento prescrito e com os parâmetros inseridos do material, foi necessária uma tensão superior à tensão obtida no ensaio de laboratório. Entretanto, esta força obtida pelo *software* está acima do valor normativo de 2,0 MPa, o que permite o uso como tijolos de solo-cimento.

Mais ainda, observa-se na Tabela 23 que o valor do coeficiente de Poisson de $\nu = 0,25$ se apresentou satisfatório, uma vez que os valores de 0,20 e 0,30 mostraram resultados similares em relação aos parâmetros analisados. A maior discrepância da tensão axial máxima entre o valor de laboratório e da modelagem foi notada no CP 02. Ainda assim, a modelagem apresentou valores maiores do que aqueles obtidos em laboratório.

Em relação ao $E_{50\%}$ (Tabela 24), nota-se que na modelagem foram obtidos valores superiores àqueles do experimento. Neste caso, o CP que apresentou maior discrepância foi o CP 01. Isto pode ser devido à fatores como possível heterogeneidade e anisotropia do corpo de prova, por exemplo. No modelo numérico o material é perfeitamente homogêneo e isotrópico. Por este motivo, ao se modelar objetos com as propriedades das misturas ensaiadas é recomendado o uso de um fator de segurança com relação à tensão de ruptura.

Desta forma, pode-se concluir que os parâmetros de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, ângulo de atrito, intercepto coesivo e peso específico são representativos para análises com outras geometrias. A norma NBR 8491 (ABNT, 2012)

apresenta relações entre altura e largura de tijolos maciços e prismáticos, que podem também ser adotadas como aquela desta pesquisa.

Por fim, salienta-se que em relação ao mínimo normativo especificado pela 8491 (ABNT, 2012), a mistura de solo-areia-rejeito-cimento atende aos requisitos de Resistência à Compressão Não Confinada e pode ser utilizada para a fabricação dos tijolos, caso apresente resultados satisfatórios também para os demais ensaios solicitados por esta norma.

4.8 RESUMO DAS POTENCIAIS APLICAÇÕES DO RMF EM OBRAS GEOTÉCNICAS

Com base nos resultados apresentados, o Quadro 1 apresenta um resumo das aplicações geotécnicas avaliadas e o potencial de uso do RMF e misturas com solo.

Quadro 1 – Resumo das aplicações geotécnicas avaliadas e o potencial uso dos materiais estudados

Obra Geotécnica	Material com potencial utilização	Comentários	Principal referência correspondente
Filtro de barragens	Nenhum	Não atendeu à granulometria.	ANA (2016)
Camada de pavimentação	Solo, RMF, M1, M2, M3	Potencial aplicação como material de reforço de subleito.	DNER (1981), DNIT 141 (DNIT, 2010), DNIT ES 129 (DNIT, 2022)
Camada de aterro rodoviário	Solo, RMF, M1, M2, M3	Potencial aplicação em corpo de aterro rodoviário. Com o aumento da energia de compactação, há um potencial uso para a camada final.	DNIT 108 (DNIT, 2009)
Camada cobertura de aterro sanitário	Solo, RMF, M1, M2, M3	Não há limite normativo. Potencial aplicação como camada de cobertura.	-
Tijolo solo-cimento	MC	Parâmetros apresentaram potencial uso, é necessário moldagem e teste em prensa.	NBR 8491 (ABNT, 2012), NBR 10833 (ABNT, 2012),

Nota: M1 = 25% de rejeito, 75% de solo; M2 = 50% de rejeito, 50% de solo; M3 = 75% de rejeito, 25% de solo; MC=mistura rejeito-areia-solo-cimento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa tem como objetivo o estudo do comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro e de misturas com um solo residual, na proporção de 25%, 50% e 75% em relação à massa seca total. Assim, verificou-se o potencial de aproveitamento em obras geotécnicas.

Conforme exposto, o processo de extração e beneficiamento do minério de ferro gera uma quantidade de rejeito na proporção de 2/1 entre produto final e rejeito. Este material constitui um passivo ambiental, uma vez que não tem sido aproveitado para outros fins e a sua principal destinação é em barragens e pilhas. Com isso, é necessário que haja grandes áreas para disposição do rejeito e controle tecnológico que garanta a estabilidade das estruturas de contenção.

Além disso, as barragens de rejeito alteadas a montante deverão passar por descaracterização e descomissionamento. Torna-se mais necessário, portanto, que sejam estudadas novas formas de aproveitamento deste material.

Dessa forma, após realizado o procedimento experimental proposto e feitas as devidas análises, é possível concluir que:

- a) o rejeito de minério de ferro estudado apresentou características físicas, químicas e mecânicas compatíveis com os resultados encontrados na Literatura. Como se trata de um material que tem suas características influenciadas, principalmente, pelo método de extração, beneficiamento e disposição, é necessário que parte dos estudos, como granulometria, análise química e compactação, sejam repetidos à medida que se verifique alterações no padrão de obtenção. Os resultados mostram, contudo, que há uma similaridade nestas características;
- b) a mineralogia apontou predominância de hematita e quartzo, o que estava em conformidade com as concentrações de óxidos de ferro e sílica apresentadas na análise química.
- c) as altas concentrações de óxido de ferro na constituição química do rejeito e a predominância de hematita na constituição mineralógica favoreceram para uma densidade real dos grãos superior àquela do solo residual, o que também influenciou na massa específica seca máxima obtida pelo ensaio de compactação. Além disso, estes óxidos podem ter sido responsáveis por gerar um efeito cimentante nas misturas com solo, o que tornou alguns parâmetros mecânicos das

misturas, como ISC e intercepto coesivo, superior ao obtido pelas amostras na forma pura de rejeito e solo.

- d) em relação à granulometria, o rejeito apresentou frações finas de silte, areia fina e argila. As misturas permaneceram, então, na faixa correspondente à solos finos. As curvas granulométricas das misturas estavam de acordo com o esperado, aumentando-se o percentual da fração silte com a adição de rejeito. Isto também pode ter favorecido o preenchimento dos vazios das misturas com as partículas de argila do solo, o que resultou em parâmetros de ISC, intercepto coesivo, e alguns valores de MR superiores ao dos materiais na forma pura;
- e) os valores de ISC e Expansão do solo, rejeito e das misturas permitem as suas aplicações como corpo de aterro e como material de reforço de subleito. Para a camada de sub-base, é necessário que o material seja compactado em energias superiores à Normal e apresente índice de grupo $IG=0$. Já para a camada de base, os materiais não se adequaram às faixas granulométricas recomendadas;
- f) os valores de Expansão dos materiais (solo, M1, M2, M3 e rejeito) estão abaixo de 1%. Ainda que o rejeito tenha contribuído para o aumento da expansão nas misturas com solo, seu uso não seria desqualificado por este parâmetro;
- g) RMF e M3 não permitiram moldagem de CP's para o ensaio de compressão não confinada com os recursos disponíveis. Estes materiais não apresentaram coesão suficiente para resistir ao processo de moldagem e cura ao ar, sem apresentar trincas. Assim, em relação aos demais materiais (solo, M1 e M2), foi visto que a adição de rejeito ao solo trouxe ganhos de RCS e módulo de elasticidade;
- h) os materiais (solo, M1, M2, M3 e rejeito) apresentaram faixas de valores de permeabilidade próximas entre si, na ordem de 10^{-6} a 10^{-5} m/s. Ainda que o rejeito apresente granulometria predominante de silte, sua permeabilidade foi inferior ao do solo residual argiloso. Como não há limite normativo, todos os materiais têm potencial uso como camada de cobertura de aterro sanitário;
- i) o acréscimo de rejeito ao solo o tornou menos suscetível a recalques, de acordo com os índices de compressibilidade;
- j) o incremento de rejeito também permitiu ganhos nos valores do intercepto coesivo, embora não se tenha visto comportamento similar para o ângulo de atrito;
- k) ao comparar os resultados com aqueles de Machado (2022), que retirou o rejeito da mesma área de exploração daquele da presente pesquisa, nota-se que os valores de ângulo de atrito, coesão e permeabilidade estão compatíveis. A granulometria se

apresentou similar, mas a densidade real dos grãos do rejeito de Machado (2022) foi superior. Além disso, os parâmetros de compactação também apresentaram diferença, embora não tão apreciável. Nota-se, assim, a importância de repetir os ensaios de caracterização física quando há alteração de período e no local de extração do rejeito;

- l) em relação ao MR, foi visto que o modelo composto representou adequadamente os materiais em estudo;
- m) a mistura MC (solo, areia, rejeito e cimento) cumpriu os requisitos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012). A modelagem computacional mostrou que os resultados obtidos pelos ensaios experimentais são confiáveis e representativos dos materiais. Além disso, o coeficiente de Poisson de 0,25, único parâmetro obtido por estimativa, foi representativo e apresentou pouca variação quando comparados aos valores de 0,2 e 0,3;
- n) através da modelagem computacional, foi também possível verificar que o material pode ser moldado com as dimensões de norma e irá atender aos requisitos normativos.

Como sugestões para pesquisas futuras, apontam-se:

- a) verificar a classificação ambiental com base na NBR 10004 (ABNT, 2004) do rejeito para observar a existência ou não de metais pesados e se reage com água;
- b) obter os valores de resistência à compressão simples para o rejeito e mistura M3, por meio de processo de moldagem diferente daquele utilizado nesta pesquisa;
- c) realizar o ensaio de ISC e Expansão com a Energia Proctor Intermediária, a fim de avaliar a possibilidade de uso dos materiais como camada de sub-base;
- d) mais ainda, avaliar a influência do aumento da energia de compactação nos demais parâmetros mecânicos;
- e) realizar as análises microscópicas, como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para o rejeito, o solo e as misturas após compactação, para auxiliar nas análises do efeito da adição de rejeito ao solo;
- f) verificar o comportamento laterítico do solo e do rejeito através da metodologia MCT para, junto aos resultados de MEV, auxiliar na compreensão do comportamento das misturas;
- g) para fins de compreensão do comportamento mecânico, realizar os mesmos ensaios desta pesquisa, para as mesmas proporções de mistura, com um solo granular, para

verificar se enquadra nos critérios para as camadas de sub-base e base de pavimentos e para filtro de barragem;

- h) analisar a viabilidade econômica decorrente da utilização do rejeito em obras geotécnicas;
- i) realizar o ensaio de Deformação Permanente para os materiais puros e misturas e simular camadas de pavimento no *software* MeDiNa;
- j) simular condições de estabilidade de talude de aterro rodoviário compactado para o rejeito e misturas com os parâmetros obtidos nesta pesquisa (intercepto coesivo, ângulo de atrito e peso específico seco máximo).

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures**, 17 edição. Washington: Transportation Research Board (TRB), 2002. 740p.
- ABRÃO, P.C. **Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil**. *In*: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, 1987, Rio de Janeiro.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, 2016. 156 p. PDF.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Anuário mineral brasileiro: Principais substâncias metálicas**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 17 abr 2022.
- ANDALICIO, A. F. *et al.* Estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeitos de minério de ferro em pavimentos rodoviários. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: ABMS, 2020. 8 p. PDF.
- ANM. **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2022**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Diário oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 de ago. 2022.
- ANM. **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 de fev. 2022.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. 136 p. Disponível em: [www.coc.ufrj.br> component>docman](http://www.coc.ufrj.br/component/docman). Acesso: 11 mar 2022.
- ASSIS, D. M; QUEIROGA, F. O. C. MENDES, J. C. M. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços**. Revista Ágora, ano II, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro. ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023**: Solo-cimento — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, ABNT, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024**: Solo-cimento — Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro. ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16853**: Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro. ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostra de solo: Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro. ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro. ABNT, 2016^a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491**: Tijolo de solo cimento – Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento. Rio de Janeiro. ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: Projetos e Restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARATI, S; SHOURIJEH, P. T. Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: a case study on Golgohar mine. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01843-6>.

BARLETTA, V. F. **Estudos Mecânicos de Misturas Solo-Composto para Fins Geotécnicos**. 2021. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/13718>. Acesso em: 10 mar 2022.

BASTOS, L. A. C; SILVA, G. C; MENDES, J. C; PEIXOTO, R. A. F. **Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, 2016. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001613>. Acesso em: 07 set. 2022.

BASTOS, Lucas Augusto de Castro. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013. Dissertação de Mestrado (Mestre em Geotecnia) - Universidade Federal De Ouro Preto, Ouro Preto, 2013, 97 p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6523>. Acesso em: 10 mar 2022.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. 2010. 207 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, 2010. 210 p.

BESSA, S.; MENDONÇA, I.; VIMIEIRO, J.; GURGEL, G.; MAGALHÃES, L.; BEZERRA, A.; LOURA, R. Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: ANTAC, 2018. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/article/download>. Acesso em: 14 abr. 2022.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC, UFRJ, Rio de Janeiro, 149 p.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF. 2010.

BRASIL. **Lei nº 12334, de 20 de set de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 set. 2010.

BRASIL. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 19 de jul. de 2023.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377-7:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes**. London, UK.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2015). **Notas de aula: Geotecnia de solos tropicais**. Universidade de Brasília. 217 Brasília.

CAMPANHA, Â. **Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro para Uso em Pavimentação**. 2011. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011, 86 p. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3752>. Acesso em: 10 mar 2022.

CÂNDIDO, V. B. R. **Estudo do rejeito de minério de ferro e misturas com solo residual**. 2021. Monografia (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021. PDF.

CÂNDIDO, V. B. R.; MONTEIRO, P. R. MARTINS, C. P. JERONYMO, L. L. Caracterização e Compactação de Mistura de Solo com Resíduo de Minério de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: ABMS, 2020. 8 p. PDF.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume 1: fundamentos. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015, 272 p.

CARNEIRO, A. A. **Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno**. 2020. Tese de Doutorado -Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020, 146p. Disponível em: [71TTP71://repositorio.unb.br/handle/10482/39772](https://repositorio.unb.br/handle/10482/39772). Acesso em: 12 mar 2022.

CARVALHO, P. S. L. de; SILVA, M. M. da; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ, J. **Minério de Ferro**. Rio de Janeiro: BNDES, 2014. 38p. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4802/1/BS%2039%20min%20a9rio%20de%20ferro_P.pdf. Acesso em: 10 mar 2022.

CARVALHO, W. D. S. de. **Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho**. 2017. 163 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. 161 p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/9803>. Acesso em: 31 mar. 2023.

CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO – CEPED. **Manual de construção com solo e cimento**. Camaçari: CEPED, 1894. 116 p. Disponível em: http://redeterrabrasil.net.br/wp-content/uploads/2021/09/1_Manual-de-solo-cimento_2020.pdf. Acesso em 15 mai. 2022.

CHIOSSI, N. J. **Geologia Aplicada à Engenharia**. 2. ed. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1975, 472 p.

COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. 2008. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008, 83 p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3154>. Acesso em: 12 mar 2022.
compactado. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020, 71p.

CONCIANI, W; BURGOS, P. C; BEZERRA, R. L. **Origem e formação dos solos, perfis de intemperismo**. In: CARVALHO et al. (Org.). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: ABMS, 2015, p. 33-35.

COSTA, Magdalena Duarte. **Estudos de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas de Solos**. 2015. Tese de doutorado (Doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/14242>. Acesso em: 17 mar 2022.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro.** 2022. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo: São Carlos, 1998, 178 p. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-28022018-142425/publico/Dissert_Cunto_FlavioJC.pdf. Acesso em 21 set. 2022.

DANTAS, A. A. N. **Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários.** 2020. Tese de Doutorado (Doutor em Geotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019, 226p. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37720>. Acesso em: 15 mar 2022.

DANTAS, A. A. N. **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação.** 2015. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015, 107p. Disponível em: arquivos.info.ufrn.br/DissertaoficialAndreAugusto. Acesso em: 15 mar 2022.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER/SP. **Projeto de pavimentação.** Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf. Acesso em: 17 de outubro de 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3ed. Rio de Janeiro, 1981. 34 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Especificação de Serviço – **ES 108:** Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2009. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Especificação de Serviço – **ES 139:** Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2022. 8 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Especificação de Serviço – **ES 141:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Instrução de Serviço – **IS-247:** Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. Rio de Janeiro, 2021. 22 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT **134/2018- ME:** Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018. 18p.

ECHEVERRI VERGARA, J. **Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens.** 2012. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 112 p. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/13648>. Acesso em 25 mar 2022.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FERREIRA, J. P.; SANTOS, F. M. A.; TAVARES, S. G.; AGUILAR, M. T. P. **Obtenção de geopolímero a partir do metacaulim com adição de rejeito de mineração depositado na Barragem de Córrego do Feijão (Brumadinho – MG, Brasil)**. In: CONRESOL – CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 3., 2020, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado, 2020. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/V-005.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

FONSECA, R. F.; VILLAR, L. F. S. **Caracterização Geotécnica e Reológica de um Rejeito de Minério de Ferro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. Anais eletrônicos... Goiânia: ABMS, 2014. 8 p. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/3250?guid=1622989504842&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1622989504842%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d3250%233250&i=7>. Acesso em: 12 mar 2022.

FONTES, W. C. **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento**. 2013. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. 2013. 112 p. PDF.

FONTES, W. C. *et al.* **Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability**. Ambiente construído, vol. 18, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400312>.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://docplayer.com.br/9753233-Metodo-de-dimensionamento-mecanistico-empirico-de-pavimentos-asfalticos-sispav-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco.html>. Acesso em: 15 mar 2022.

FREITAS *et al.* **Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva**. Cad. Saúde Pública, vol.35, no.5, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/40393>. Acesso em: 15 mar 2022.

G1. Há 3 anos, rompimento de barragem de Mariana causou maior desastre ambiental do país e matou 19 pessoas. G1, São Paulo, 25 mar 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/ha-3-anos-rompimento-de-barragem-de-mariana-causou-maior-desastre-ambiental-do-pais-e-matou-19-pessoas.ghtml>. Acesso em 15 mar 2022.

GERALDES, F. **Planejamento da Construção de Barragens de Terra**. Dissertação de Mestrado (Mestre em Vias de Comunicação) - Cidade do Porto, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia (FEUP), 2002. 176 p.

GHANIZADEH, A. R; YARMAHMOUNDI, A; ABBASLOU H. **Mechanical Properties of Low Plasticity Clay Soil Stabilized with Iron Ore Mine Tailing and Portland Cement.** Journal of Mining and Environment, vol. 11, 2020. 6 p. DOI: 10.22044/jme.2020.9304.1860.

GOMES, A. C. F; MOURA, C. C; SANTOS, R. A. dos. Caracterização Mineralógica e Geotécnica de Rejeito Estocado em Barragem de Minério de Ferro. *In: Congresso Brasileiro De Geotecnia Ambiental, 9., 2019, São Carlos. Anais eletrônicos...* São Carlos: ABMS, 2019. p 33 – 39. Disponível em: http://www.regeossinteticos2019.com.br/?page_id=1979. Acesso em: 12 mar 2022.

GOMES, M. S. **Análise da influência do teor de umidade na deformação permanente de solos argilosos lateríticos para uso em estruturas de pavimentos.** 2021. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021. PDF.

GOMES, R. C. **Caracterização tecnológica e sistemas de disposição de resíduos de mineração. Publicação Técnica.** 2004. UFOP, 185 p.

GRASSE, B. P. *et al.* Avaliação do comportamento geotécnico de um solo laterítico estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro. *In: CONGRESSO EM PESQUISA E ENSINO DA ANPET, 32., 2019, Gramado. Anais eletrônicos ...* Gramado: ANPET, 2019. 12 p. Disponível em: https://anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20III/2_660_AC.pdf. Acesso em: 12 mar 2022.

GUERRA, A. N. L. P. ; A.G., GUMIERI ; BRANDAO, P. R. G. . Caracterização do rejeito de minério de ferro gerado na produção de pellet feed. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., 2015, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos* Rio de Janeiro: ABES, 2015. PDF.

HAMDI, N.; SRASRA, E. **Hydraulic Conductivity Study of Compacted Clay Soil Used as Landfill Liners for an Acidic Waste.** Waste Management, v.33, n.1, p.60- 66, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.012>. Acesso em: 17 mar 2022.

HERMENERGILDO, G; CARNEIRO, G; NOGUEIRA, J. A; BEZERRA, A. C; BESSA, S. A. L. Carbonatação de argamassas mistas produzidas com rejeito de minério de ferro. *In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 7., 2021, Porto Alegre. Anais ...* Porto Alegre: ENARC, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355046888>. Acesso em: 01 abr 2022.

HU, L. et al. **Geotechnical properties of mine tailings.** Journal Hoff Materials in Civil Engineering (ASCE), v. 29, n. 2. 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001736](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736). Acesso em: 10 mar. 2023.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design.** 2 ed, New Jersey: Prentice Hall, 2004. PDF.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração.** Org: IBRAM, 1.ed. Brasília: IBRAM, 2017. 128 p. ISBN: 978-85-61993-10-8.

JEDARI, C.; PALOMINO, A. M.; CYR, H.; DRUMM, E. C.; BOLES, D. **Grain and FlocSize Distribution Analysis of Fine Coal Refuse Slurry**. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017.

JESUS, Carlos Antônio Gonçalves. **Ferro/Aço**. Agência Nacional de Mineração, 2008. 18 p. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?idbancoarquivoarquivo=3974. Acesso em: 18 mar. 2023.

JIANZHU, L. **Research on application of iron tailings on road base**. Advanced Materials Research, vol. 743, 2013. 5 p. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.743.54.

LARA, Lorena Lemos Dias *et al.* Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos. *In: CONGRESSO EM PESQUISA E ENSINO DA ANPET, 32., 2018, Gramado. Anais eletrônicos ...* Gramado: ANPET, 2019. 12 p. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Infraestrutura/Materiais%20Granulares%20e%20Concreto%20I/5_386_AC.pdf. Acesso em: 12 mar 2022.

LI, W.; COOP, M. R. **Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings**. Canadian Geotechnical Journal, v. 56, n. 3, p. 420-435. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0032>. Acesso em: 10 mar. 2023.

LUZ, A. B. *et al.* **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2018.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis**. 1996. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MACHADO, Willian Gladstone Freitas. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 2007. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 155p. PDF.

MACHADO, L. da S. **Estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados com uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas (dry stacking)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. 289 f. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/30592>. Acesso em: 02 abr. 2023.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. 2002. 38 p.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MARSAL, R. J; RESÉNDIZ, D.R. **Earth and Earth-Rock Dam**. Limusa, Ciudad de Mexico, Mexico, 1975. 38 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G. ; FONTES, M. P. F. ; RIBEIRO, J. C. L. ; VIEIRA, C. M. F. ; PACHECO, A. A. ; AZEVEDO, A. R. G. . **Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks**. *Construction and Building Materials* , v. 227, p. 1-13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>. Acesso em 06 set. 2022.

MG. **Resolução CONJUNTA SEMAD/ FEAM nº 2784, de 21 de mar. de 2019**. Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e das outras providências. Diário do Executivo: Belo Horizonte, MG, 21 de mar. de 2019.

MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE. **Study of tailings management technologies**. 2017. 164 p.

NASCIMENTO, A. C. S. do. **Tilojo solo cimento com adição de rejeito de manganês do sudeste paraense**. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2015. 83 p. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/7901>. Acesso em 15 mai 2022.

NOCITI, D. M. *et al.* Análise comparativa da adição de dois tipos de rejeitos, provenientes da extração de minério de ferro, na produção de blocos cerâmicos. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 58., 2014, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** Bento Gonçalves: ABCERAM, 2014. 12 p. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/58/PDF/03-077.pdf. Acesso em: 15 mai. 2022.

NOGAMI, J. S., & VILLIBOR, D. F. **Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses**. *Geotechnical and Geological Engineering*, 9(3/4), p. 167–182, 1991.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1991. 171 p. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/151325/000062524.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 out. 2022.

OLIVEIRA, T. M.; GENEROSO, F. J.; SILVA, T. O.; SANT'ANNA, G. L.; SILVA, C. H. C.; PITANGA, H. N. **Geomechanical properties of mixtures of iron ore tailings improved with Portland cement**. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 41, p. 7, mai. 2019. DOI: 10.4025/actascitechnol.v41i1.38038

OSINUBI, K. J; YOHANNA, P; EBEREMU, A. O. **Cement modification of tropical black clay using iron ore tailings as admixture**. *Transportation Geotechnics*, vol. 5, 2015. 15 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.001>. PDF.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. 2013. 181 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, 181 p.

RIBEIRO, L. F. M. **Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados a Barragens de Rejeitos**. 2000. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2000. 232p. PDF.

RODRIGUES, K. H. de P.; FERNANDES, G. Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 19., 2018, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: ABMS, 2018. 13 p. Disponível em: https://www.dropbox.com/sh/qqw8mytwyi1l2yk/AAAvqqjUwz11E3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=34671.pdf&subfolder_nav_tracking=1. Acesso em: 12 mar 2022.

ROLI, M. M; FREIRE, W. J; BERALDO, A. L. **Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos-de-prova, tijolos e painéis de solo-cimento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.1, p.89-92, 1999.

SALGADO, L. de M. **Blocos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de mineração e cinzas de bagaço de cana de açúcar**. 2018. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018, 88 p. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/32353>. Acesso em: 6 abr 2021.

SANTOS, Taisa Ferreira Lopes. **Estudo Experimental da Camada de Cobertura do Aterro Morro do Céu, Niterói - RJ**. 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental: controle da poluição urbana e industrial) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/10987>. Acesso em: 17 mar 2022.

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

SILVA *et al.* Avaliação da Adição de Resíduos de Construção Civil (RCC) para Estabilização de Solos Colapsíveis. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. 8 p. PDF.

SILVA, I. S; MARTINS, C. P; RODRIGUEZ, T. T; MONTEIRO, P. R; CANDIDO, V. B. R. Influência da Adição De Cinza de Cavaco de Eucalipto na Capacidade de Suporte de Solo Residual para Aplicação em Camadas de Pavimentos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 20., 2020, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: ABMS, 2020. 8 p. PDF.

SILVEIRA, V. L.; NETTO, Q. M.; GUIMARÃES, A. C. R. Caracterização de agregado oriundo de mineração para uso em pavimentação. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 19., 2018, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: ABMS, 2018. 10 p. Disponível em: https://www.dropbox.com/sh/9uwxgoy239q92ij/AACRNtolrgx7_jkc5GjS9xWza?dl=0. Acesso em: 12 mar 2022.

SOUSA PINTO, Carlos. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries**. 2023.

VICK, S.G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

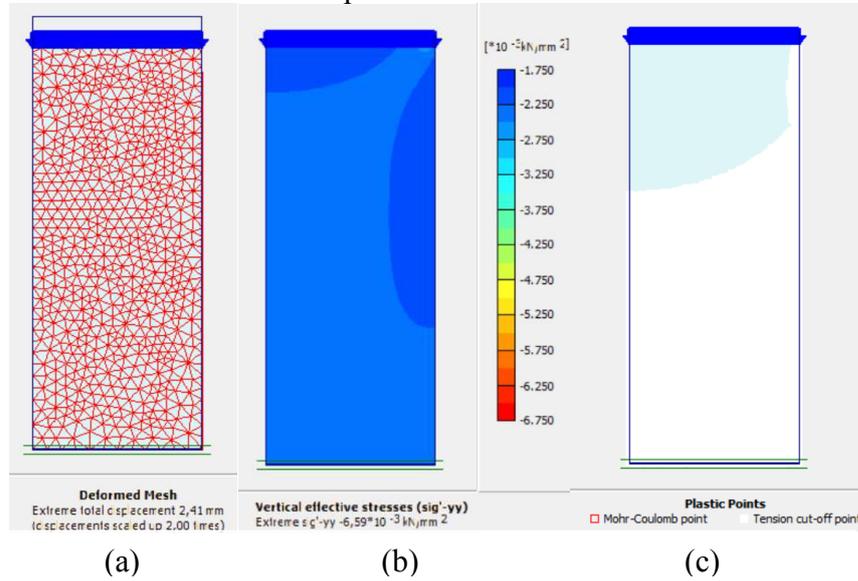
VILLIBOR, Do. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. São Carlos, 1982.

WINTERKORN, H. F.; PAMUKCU, S. **Soil stabilization and grouting**. In: FANG, Hsai-Yang (org). *Foundation engineering handbook*. 2 ed., Berlim: Springer, 1991. p. 317-378.

ZUQUETTE, Lázaro. **Geotecnia Ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, 384 p

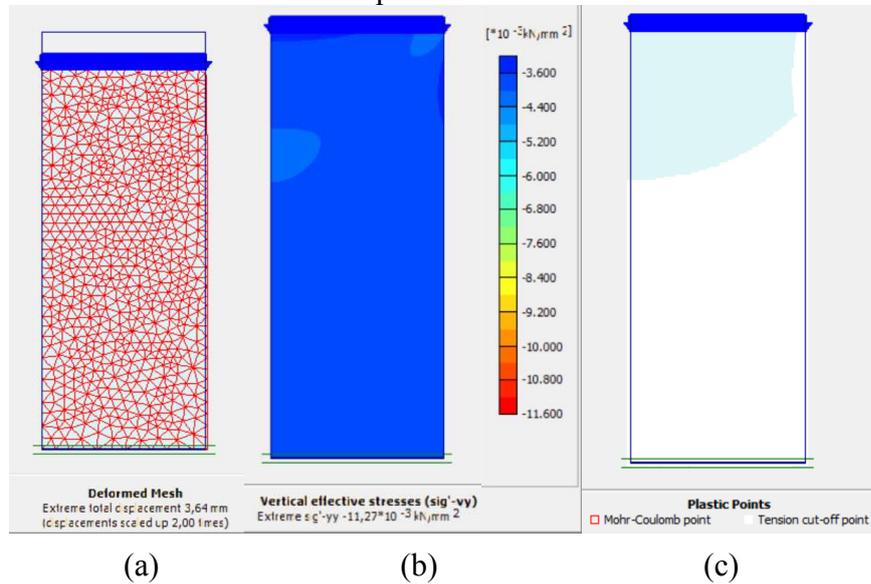
ANEXO 1

Figura 65 - Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 01



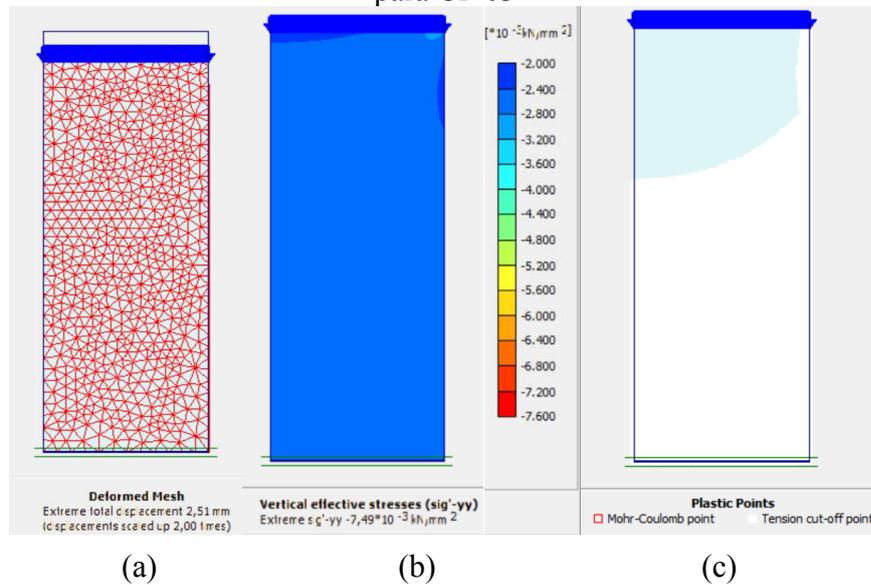
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 66 - Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 02



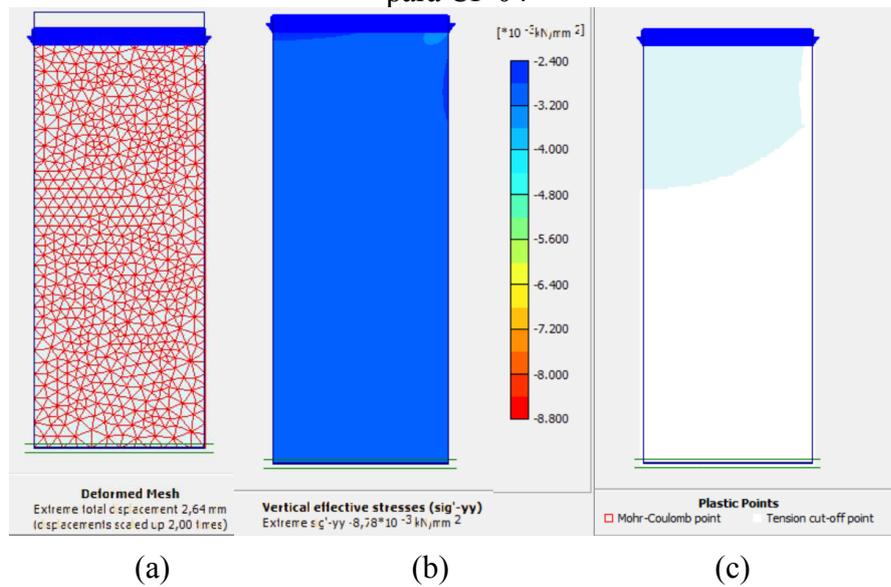
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 67 – Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 03



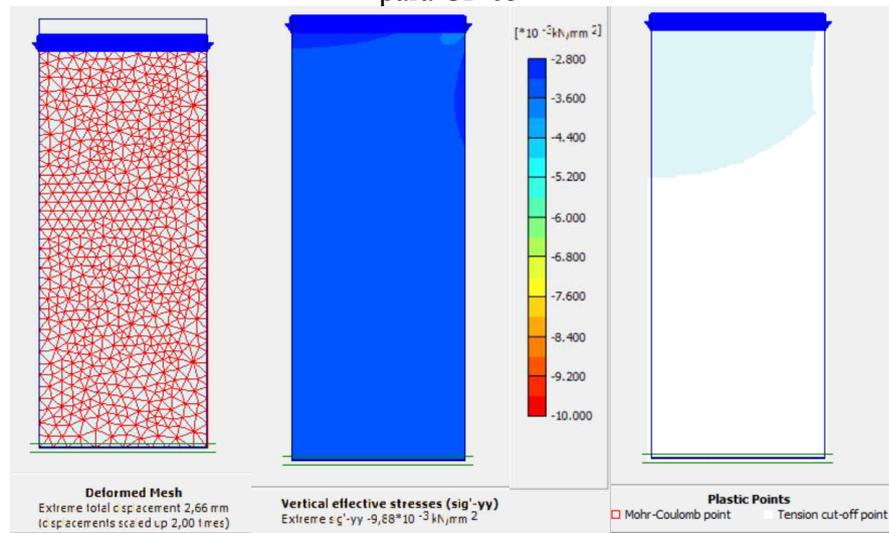
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 68 – Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 04



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 69 – Diagramas de: (a) deformação, (b) tensão verticais efetivas, (c) pontos plásticos para CP 05



(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)