



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE SOLO COM  
CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO E CIMENTO PORTLAND PARA USO EM  
CAMADA DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Lucila Costa Sales

São Cristóvão

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE SOLO COM  
CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO E CIMENTO PORTLAND PARA USO EM  
CAMADA DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Lucila Costa Sales

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil como requisito  
parcial à obtenção do título de MESTRE EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida

Coorientador: Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante

São Cristóvão

2022

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Sales, Lucila Costa  
S163a Análise de propriedades geotécnicas de misturas de solo com concreto asfáltico fresado e cimento portland para uso em camada de pavimento rodoviário / Lucila Costa Sales ; orientador Guilherme Bravo de Oliveira Almeida. - São Cristóvão, 2022.  
141 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Pavimentos – Manutenção e reparos. 2. Rodovias – Manutenção e reparos. 3. Mecânica do solo. 4. Química do solo. I. Almeida, Guilherme Bravo de Oliveira. Orient. II. Título.

CDU 625.04

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUCILA COSTA SALES

---

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 29 DE JULHO DE 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida  
Orientador

Erinaldo Hilário Cavalcante  
Coorientador

1º Examinador  
Gisélia Cardoso  
Universidade Federal de Sergipe

2º Examinador  
Patrício José Moreira Pires  
Universidade Federal do Espírito Santo



**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Aos 29 (vinte e nove) dias do mês de julho de 2022, às 14h30min (catorze horas e trinta minutos), reuniram-se, por Webconferência, os membros da Comissão Examinadora, formada pelos professores doutores GUILHERME BRAVO DE OLIVEIRA ALMEIDA (orientador – PROEC/UFS), GISÉLIA CARDOSO (examinadora interna ao Programa/UFS), ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE (examinador interno ao Programa/UFS), e PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES (examinador externo à Instituição/UFES), para a realização da Defesa de Dissertação ao Mestrado do trabalho intitulado “Análise de propriedades geotécnicas de misturas de solo com concreto asfáltico fresado e cimento Portland para uso em camada de pavimento rodoviário” da mestranda LUCILA COSTA SALES. Após a apresentação da candidata e a arguição dos membros da supracitada Comissão, a candidata foi considerada **APROVADA**. Não havendo nada mais a tratar, eu, GUILHERME BRAVO DE OLIVEIRA ALMEIDA, presidente da Comissão, lavrei e assinei a presente ata. As assinaturas dos demais membros da Comissão Examinadora ficam dispensadas nesta ata, uma vez que vêm anexadas a este documento suas declarações de participação nesta banca de defesa de dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Universidade Federal de Sergipe, 29 de julho de 2022.



Documento assinado digitalmente  
Guilherme Bravo de Oliveira Almeida  
Data: 02/08/2022 15:39:55-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. GUILHERME BRAVO DE OLIVEIRA  
ALMEIDA  
(participação a distância por webconferência)  
(Presidente - Orientador)

Prof. Dr. PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES  
(participação a distância por webconferência)  
(Examinador externo à Instituição)

Prof. Dr. GISÉLIA CARDOSO  
(participação a distância por webconferência)  
(Examinadora interna ao Programa)

Prof. Dr. ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE  
(participação a distância por webconferência)  
(Examinadora interna ao Programa)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANEXO I  
DECLARAÇÃO DE PARTICIPAÇÃO REMOTA EM BANCA  
EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Declaro que, no dia 29/07/2022, às 14:30horas, participei, de forma remota com os demais membros deste ato público, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado da discente LUCILA COSTA SALES do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe– UFS. Considerando o trabalho avaliado, as arguições de todos os membros da banca e as respostas dadas pela discente, formalizo para fins de registro, minha decisão de que a discente está Aprovada.

Atenciosamente,

  
Doutora GISÉLIA CARDOSO  
PROEC/UFS



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANEXO I  
DECLARAÇÃO DE PARTICIPAÇÃO REMOTA EM BANCA  
EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Declaro que, no dia 29/07/2022, às 14:30horas, participei, de forma remota com os demais membros deste ato público, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado da discente LUCILA COSTA SALES do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe– UFS. Considerando o trabalho avaliado, as arguições de todos os membros da banca e as respostas dadas pela discente, formalizo para fins de registro, minha decisão de que a discente está Aprovada.

Atenciosamente,

Documento assinado digitalmente  
PATRICIO JOSE MOREIRA PIRES  
Data: 01/08/2022 14:30:45-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Doutor PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES  
PPGEC/UFES

## AGRADECIMENTOS

Se me fosse revelado, de antemão, todos os obstáculos que eu teria que superar durante o desenvolvimento desta pesquisa, talvez eu não tivesse coragem para começar. Assim, agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido saúde e por ter me permitido encontrar pessoas que não me deixaram desistir de ir até o fim.

Por mais que eu procure, não consigo encontrar palavras para descrever minha gratidão aos meus pais, Angela e Marcos, ao meu irmão, Daniel, e ao meu esposo, Wilber. Vocês são meu porto seguro e minha fonte de inspiração. Amo muito vocês. Por tornarem minha vida mais alegre, agradeço, também, aos meus amores de quatro patas, Bia (*in memoriam*) e Moqueca, que me fizeram companhia nos longos dias e noites de estudo, além de Choco. Agradeço ao meu primo-irmão Fabiano, que, sempre solícito, ajudou com a coleta do solo.

Por fazerem parte de quem eu sou, por, às vezes, acreditarem mais em mim do que eu mesma, por todo o carinho, torcida, orações e por compreenderem minha ausência nos últimos meses, agradeço à toda a minha família, aos meus sogros, Lucia e José Carlos, e aos meus amigos.

Agradeço ao Prof. Guilherme que, para além da orientação, trabalhou duro na execução ensaios. Sou grata aos Professores Erinaldo, Gisélia Cardoso e Patrício Pires pela avaliação e sugestões de melhoria do trabalho. Minha imensa gratidão a todos que fazem parte e que passaram pelo GeoPav enquanto estive por lá: Willami, Luiza, Mariana, Silmara, Larissa, Leandro e Marcelo. Agradeço também a Matheus, do Lamce, por toda a ajuda. Com vocês aprendi não apenas sobre a pesquisa em laboratório, mas sobre solidariedade, amizade e dedicação.

Agradeço também ao Prof. Fernando e a Bruno, do LTT, além de todos os professores, colegas e funcionários do PROEC. Meu muito obrigada a Maria, por seu carinho de sempre e sua boa vontade em esperar que eu saísse do laboratório para fechar o DEC.

Aos amigos do DNIT/SE sou grata pelo apoio e incentivo para conclusão desta pesquisa. Em especial agradeço a Alexandre, Gustavo Henrique, Herika, Otávio e Wedmy. Agradeço também a Emilly por sua amizade e torcida

Agradeço à EMURB pelo fornecimento do resíduo de fresagem e pela ajuda com a execução do ensaio de extração de betume e à Jazida Cajueiro pelo fornecimento do solo utilizado na pesquisa.

## RESUMO

Devido ao uso, os pavimentos podem migrar de uma condição ótima para uma condição ruim, caso não haja manutenção. A fresagem é uma das alternativas técnicas empregadas para a restauração de pavimentos e consiste no desbaste de camadas deterioradas do pavimento para sua recuperação. O resíduo resultante da fresagem da camada de revestimento asfáltico é composto de fragmentos deste em condição envelhecida, que podem ser reciclados, resultando em otimização dos recursos naturais e redução de custos na construção. Sabe-se, também, que o solo é um material heterogêneo e, muitas vezes, pode se mostrar inadequado para determinado uso na Engenharia, sendo necessário alterar suas propriedades para que se adeque às especificações técnicas. Dentre as formas de promover alteração das propriedades do solo estão a estabilização mecânica, através de compactação e correção granulométrica, e a estabilização química, sendo o cimento Portland o agente estabilizante mais comumente utilizado. Estudos indicam que avaliar o comportamento de misturas de solo natural com resíduo de fresagem é relevante para o projeto de pavimentos. Nesta pesquisa foram misturados resíduo de fresagem de revestimento asfáltico, solo fino argiloso e cimento Portland do tipo CP V - ARI. Através de ensaios de laboratório, avaliou-se propriedades físicas, mecânicas e hidráulica das misturas, além da viabilidade do uso destas misturas em camadas de pavimento. Avaliou-se a granulometria, massa específica, densidade seca e saturada superfície seca, teor de betume, absorção de água e abrasão *Los Angeles* do resíduo de fresagem. Para o solo e as misturas do solo com 20%, 30% e 50% de fresado foram realizados os ensaios de granulometria, limites de Atterberg, compactação, índice de suporte Califórnia (ISC) e permeabilidade. Foram, também, realizadas misturas de solo, resíduo de fresagem nos teores já indicados e 5% de cimento, sendo executados os ensaios de granulometria, limites de Atterberg, compactação, ISC, resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), durabilidade e permeabilidade. Então, foi avaliada a viabilidade de utilização do resíduo de fresagem incorporado ao solo e cimento em camadas do pavimento. Ficou constatado que o aumento do teor de resíduo de fresagem até 50% acarreta melhora na granulometria, reduz a plasticidade, aumenta a massa específica seca máxima, reduz a umidade ótima, aumenta o ISC, reduz a expansão e aumenta a permeabilidade das misturas com o solo. A adição de 5% de cimento provocou fortes alterações na granulometria das misturas, tornando-as mais granulares e menos plásticas. Ainda, aumentou o ISC, reduziu a expansão e a permeabilidade. As misturas com cimento apresentaram RCS aquém do exigido para base de solo-cimento, boa RTCD e boa durabilidade. As misturas com e sem cimento não atenderam aos requisitos para utilização em camadas de base e sub-base estabilizadas granulometricamente, de solo melhorado com cimento ou para base de solo-cimento devido à quantidade de finos e à alta plasticidade do solo puro. No entanto, verificou-se que o uso de resíduo de fresagem é promissor na melhoria das propriedades do solo e das misturas e como material a ser utilizado em pavimentação.

Palavras-chave: Resíduo de Fresagem; Estabilização de Solos; Pavimentação.

# ANALYSIS OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SOIL MIXING WITH MILLED ASPHALT CONCRETE AND PORTLAND CEMENT FOR USE IN ROAD PAVEMENT LAYER

## ABSTRACT

Due to use, pavements may migrate from optimum to bad condition if not maintained. Milling is one of the technical alternatives used for pavement rehabilitation and consists of thinning deteriorated pavement layers for its recovery. The residue resulting from the asphalt coating layer milling is composed of fragments of it in a aged condition, which can be recycled, resulting in optimization of natural resources and reduction of construction costs. It is also known that soil is a heterogeneous material and may often prove to be unsuitable for a particular use in Engineering, making it necessary to change its properties so that it adapts to technical specifications. Among the ways to promote changes in soil properties there are mechanical stabilization, through compaction and granulometric correction, and chemical stabilization, being Portland cement the most commonly used stabilizing agent. Studies indicate that evaluating the behavior of mixtures of natural soil with milling residue is relevant for pavement design. In this research, asphalt coating milling residue, fine clayed soil and CP V – ARI Portland cement were mixed. Through laboratory tests, physical, mechanical and hydraulic properties of the mixtures were evaluated, in addition to the feasibility of using these mixtures in pavement layers. The granulometry, specific mass, dry and dry surface saturated density, bitumen content, water absorption and Los Angeles abrasion of the milling residue were evaluated. For soil and mixtures of soil with 20%, 30% and 50% of milling residue, granulometry, Atterberg limits, compaction, California bearing ratio (CBR) and permeability tests were carried out. Mixtures of soil, milling residue at the contents already indicated and 5% of cement were also carried out and granulometry, Atterberg limits, compaction, CBR, unconfined compression strength (UCS), indirect tensile strength (ITS), durability and permeability tests were performed. Then, the feasibility of using the milling residue incorporated to the soil and cement in pavement layers was evaluated. It was found that increasing the milling content up to 50% leads to an improvement in granulometry, reduces plasticity, increases the maximum dry density, reduces the optimum moisture, increases de CBR, reduces the expansion and increases the permeability of the mixes with the soil. The addition of 5% of cement caused strong changes in the granulometry of the mixtures, making them more granular and less plastic. Still, it increased the CBR, reduced the expansion and the permeability. Mixtures with cement presented UCS below the required for soil-cement bases, good ITS and good durability. The mixtures with and without cement did not meet the requirements for use in granulometrically stabilized or cement improved soil base and sub-base layers, nether for soil-cement base, due to the amount of fines and the high plasticity of pure soil. However, it was found that the use of milling residue is promising in improving soil and mixtures properties and as a material to be used in paving.

Key words: Milling Residue; Soil Stabilization; Pavement.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	7
RESUMO .....	8
ABSTRACT .....	9
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE FIGURAS .....	14
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	18
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	24
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>25</b>
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	25
2.2 FRESAGEM.....	27
2.3 RESÍDUO DE FRESAGEM.....	30
<b>2.3.1 Características do resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.2 Efeitos da adição de material fresado sobre as propriedades das misturas com solo</b> <b>39</b>	
2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	54
<b>2.4.1 Estabilização mecânica .....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.2 Estabilização de solo com cimento Portland.....</b>	<b>57</b>
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>65</b>
3.1 MATERIAIS .....	65
3.2 MÉTODOS.....	69
<b>3.2.1 Caracterização do solo e do resíduo de fresagem.....</b>	<b>70</b>
<b>3.2.2 Caracterização das misturas solo-resíduo de fresagem.....</b>	<b>74</b>
<b>3.2.3 Caracterização das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento Portland.....</b>	<b>75</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	79
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE FRESAGEM.....	81
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-RESÍDUO DE FRESAGEM.....	84

4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-RESÍDUO DE FRESAGEM-CIMENTO	91
4.5	COMPACTAÇÃO .....	94
4.5.1	Compactação do solo puro .....	94
4.5.2	Compactação das misturas solo-resíduo de fresagem .....	95
4.5.3	Compactação das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento.....	101
4.6	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA .....	104
4.6.1	Índice de Suporte Califórnia do solo puro.....	104
4.6.2	Índice de Suporte Califórnia das misturas solo-resíduo de fresagem .....	105
4.6.3	Índice de Suporte Califórnia das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	110
4.7	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	114
4.8	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	117
4.9	DURABILIDADE.....	119
4.10	PERMEABILIDADE.....	120
4.11	AValiação da Viabilidade Técnica do uso das misturas em camadas de pavimento .....	123
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações da fresagem.....	29
Tabela 2: Densidade real dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores.....	35
Tabela 3: Teor de asfalto dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores .....	36
Tabela 4: Valores de absorção de água do resíduo de fresagem obtidos por diferentes autores .....	37
Tabela 5: Valores de abrasão Los Angeles dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores.....	38
Tabela 6: Densidade real dos grãos dos resíduos de fresagem e solo ou agregado obtidos por diferentes autores.....	39
Tabela 7: Resultados dos ensaios de compactação.....	43
Tabela 8: Resultados de ensaios de ISC para misturas de solo e diferentes teores de material fresado .....	45
Tabela 9: Resultados dos ensaios de ISC .....	46
Tabela 10: Resultados dos ensaios de RCS obtidos por Maciel et al. (2018).....	48
Tabela 11: Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados.....	54
Tabela 12: Classes de solos quanto a permeabilidade.....	54
Tabela 13: Designação normalizada, sigla e classe de cimento Portland.....	60
Tabela 14: Principais compostos do cimento Portland.....	60
Tabela 15: Coordenadas do ponto de coleta na Jazida Cajueiro .....	66
Tabela 16: Ensaios realizados na pesquisa .....	69
Tabela 17: Resultados da análise granulométrica do solo puro.....	79
Tabela 18: Limites de Atterberg para o solo puro .....	80
Tabela 19: Especificação da granulometria do material de base estabilizada granulometricamente .....	81
Tabela 20: Especificação da granulometria do solo ou mistura solo e material granular a ser usado em base de solo-cimento .....	81
Tabela 21: Resultado da análise granulométrica do resíduo de fresagem.....	82
Tabela 22: Resultados da análise granulométrica das misturas solo-resíduo de fresagem .....	85
Tabela 23: Limites de consistência para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem .....	87
Tabela 24: Classificação do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem .....	87

Tabela 25: Classificação do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem originais e submetidas a ensaios de compactação .....	91
Tabela 26: Resultados da análise granulométrica das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	92
Tabela 27: Limites de consistência para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	93
Tabela 28: Classificação das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento.....	94
Tabela 29: Resultados dos ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem .....	96
Tabela 30: Resultados dos ensaios de compactação com amostras não trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento.....	101
Tabela 31: Valores de ISC e de expansão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem .....	106
Tabela 32: Valores de ISC e de expansão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento.....	111
Tabela 33: Resistência à compressão simples das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	114
Tabela 34: Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	117
Tabela 35: Perda de massa dos corpos de prova das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	119
Tabela 36: Coeficiente de permeabilidade do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	121
Tabela 37: Faixas granulométricas para seleção inicial de solo e/ou material granular para compor mistura de solo melhorado com cimento.....	126

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estruturas de pavimentos .....	26
Figura 2: Fresagem a frio: (a) equipamento e (b) superfície fresada.....	28
Figura 3: Curvas granulométricas referentes à amostra 2 .....	34
Figura 4: Curvas granulométricas referentes à amostra 3 .....	34
Figura 5: Variação dos parâmetros de compactação com o teor de material fresado. ....	41
Figura 6: Variação dos parâmetros de compactação: (a) massa específica seca máxima e (b) umidade ótima. ....	41
Figura 7: Efeito da adição de material fresado na massa específica aparente seca e na umidade ótima.....	42
Figura 8: Variação no ISC com o teor de material fresado. ....	44
Figura 9: Variação do ISC em relação ao teor de material fresado.....	45
Figura 10: Relação aproximada da classificação de solos AASHTO com o ISC .....	47
Figura 11: Variação da tensão de ruptura com o teor de material fresado .....	48
Figura 12: RTCD para diferentes teores de resíduo de fresagem após 28 dias.....	51
Figura 13: Variação da durabilidade através da perda de resistência por imersão.....	52
Figura 14: Estados de misturas solo-agregados.....	57
Figura 15: Diagrama esquemático de misturas de solo com cimento .....	63
Figura 16: Representação dos cristais de CSH envolvendo os grãos do solo .....	64
Figura 17: Visão parcial da Jazida Cajueiro.....	65
Figura 18: Localização da Jazida Cajueiro.....	66
Figura 19: Solo puro (a) secagem ao ar (b) destorroamento (c) mistura e repartição .....	66
Figura 20: Resíduo de fresagem estocado na usina de asfalto da EMURB .....	67
Figura 21: Máquina fresadora utilizada nas operações de fresagem em Aracaju/SE.....	67
Figura 22: Trituração (a), mistura e repartição (b) do resíduo de fresagem.....	68
Figura 23: Resíduo de fresagem triturado .....	68
Figura 24: Determinação da massa específica do resíduo de fresagem por meio do frasco de Chapman.....	70
Figura 25: Determinação das densidades e absorção do agregado miúdo (a) secagem até a condição saturada superfície seca (b) determinação das densidades.....	71
Figura 26: Determinação das densidades e absorção do agregado graúdo (a) secagem até a condição saturada superfície seca (b) pesagem na balança hidrostática .....	71
Figura 27: Extração de betume.....	72

Figura 28: Determinação da abrasão Los Angeles .....	72
Figura 29: Compactação do solo puro .....	73
Figura 30: Ensaio de ISC como solo puro (a) imersão dos corpos de prova (b) execução do ensaio .....	73
Figura 31: Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade do solo puro .....	74
Figura 32: Ensaio de sedimentação com amostras das misturas (a) 30F70S (b) 50F50S.....	75
Figura 33: Ensaio de permeabilidade de amostras da mistura 95(20F80S)5C.....	76
Figura 34: Ensaio de sedimentação de amostra da mistura 95(30F70S)5C .....	76
Figura 35: Ensaio de resistência à compressão simples (a) corpo de prova de mistura 95(20F80S)5C na prensa (b) corpo de prova de mistura 95(50F50S)5C rompido .....	77
Figura 36: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	77
Figura 37: Ensaio de durabilidade .....	78
Figura 38: Corpo de prova da mistura 30F70S que não resistiu à imersão em água.....	78
Figura 39: Curva granulométrica do solo puro.....	79
Figura 40: Curva granulométrica do resíduo de fresagem .....	82
Figura 41: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro.....	85
Figura 42: Histograma da granulometria do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem ....	86
Figura 43: Relação entre a densidade real dos grãos e o teor de resíduo de fresagem das misturas solo-resíduo de fresagem .....	86
Figura 44: Curvas granulométricas da mistura 20F80S .....	88
Figura 45: Curvas granulométricas da mistura 30F70S .....	89
Figura 46: Curvas granulométricas da mistura 50F50S .....	90
Figura 47: Histograma da granulometria das amostras de misturas solo-resíduo de fresagem originais e submetidas a ensaios de compactação .....	90
Figura 48: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro.....	92
Figura 49: Histograma da granulometria do solo, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	93
Figura 50: Curvas de compactação para o solo puro.....	95
Figura 51: Curvas de compactação com amostras trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem.....	96
Figura 52: Curvas de compactação com amostras não trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem .....	97

Figura 53: Curvas de compactação para a mistura 20F80S.....	100
Figura 54: Curvas de compactação para a mistura 30F70S.....	100
Figura 55: Curvas de compactação para a mistura 50F50S.....	101
Figura 56: Curvas de compactação com amostras não trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento .....	102
Figura 57: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para o solo puro.....	105
Figura 58: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 20F80S.....	106
Figura 59: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 30F70S.....	107
Figura 60: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 50F50S.....	108
Figura 61: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 95(20F80S)5C .....	111
Figura 62: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 95(30F70S)5C .....	112
Figura 63: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 95(50F50S)5C .....	113
Figura 64: Aparência dos corpos de prova submetidos a ensaio de resistência à compressão simples: (a) mistura 95(20F80S)5C (b) mistura 95(30F70S)5C (c) mistura 95(50F50S)5C .	116
Figura 65: Corpos de prova do ensaio de RTCD rompidos (a) mistura 95(20F80S)5C (b) mistura 95(30F70S)5C (c) mistura 95(50F50S)5C .....	117
Figura 66: Aparência dos corpos de prova submetidos a ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) mistura 95(20F80S)5C (b) mistura 95(30F70S)5C (c) mistura 95(50F50S)5C .....	119
Figura 67: Corpos de prova após submetidos ao ensaio de durabilidade.....	119
Figura 68: Execução dos ensaios de permeabilidade com amostras das misturas (a) 95(20F80S)5C (b) 95(30F70S)5C (c) 95(50F50S)5C.....	122
Figura 69: Interior dos corpos de prova das amostras das misturas (a) 95(20F80S)5C (b) 95(30F70S)5C após ensaio de permeabilidade .....	123
Figura 70: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa F da norma DNIT 141/2010 – ES 125	

Figura 71: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa D da norma DNIT 142/2022 – ES .....	126
Figura 72: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa granulométrica da norma DNIT 143/2022 - ES .....	129
Figura 73: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa F da norma DNIT 141/2010 - ES .....	130
Figura 74: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa D da norma DNIT 142/2022 - ES .....	131
Figura 75: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa granulométrica da norma DNIT 143/2022 - ES .....	131

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

20F80S	- Mistura contendo 20% de resíduo de fresagem e 80% de solo
30F70S	- Mistura contendo 30% de resíduo de fresagem e 70% de solo
50F50S	- Mistura contendo 50% de resíduo de fresagem e 50% de solo
95(20F80S)5C	- Mistura contendo 95% da mistura 20F80S e 5% de cimento Portland
95(30F70S)5C	- Mistura contendo 95% da mistura 30F70S e 5% de cimento Portland
95(50F50S)5C	- Mistura contendo 95% da mistura 50F50S e 5% de cimento Portland
$\rho_{dm\acute{a}x}$	- Massa específica seca máxima
$h_{\acute{o}t}$	- Teor de umidade ótimo
AASHTO	- <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AN	- Agregado natural
ARI	- Alta resistência inicial
ARRA	- <i>Asphalt Recycling &amp; Reclaiming Association</i>
BC	- Baixo calor de hidratação
BCS	- <i>Black Cotton Soil</i>
C <sub>3</sub> A	- Aluminato tricálcico
C <sub>a</sub> AF	- Ferroaluminato tetracálcico
C <sub>3</sub> S	- Silicato tricálcico
CAP	- Cimento asfáltico de petróleo
CBR	- <i>California bearing ratio</i>
CBUQ	- Concreto betuminoso usinado a quente
CL-CH	- Argila de baixa compressibilidade – argila de alta compressibilidade
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CP I	- Cimento Portland comum
CP I-S	- Cimento Portland comum com adição
CP II-E	- Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno
CP II-F	- Cimento Portland composto com material carbonático
CP II-Z	- Cimento Portland composto com material pozolânico
CP III	- Cimento Portland de alto-forno
CP IV	- Cimento Portland pozolânico
CP V	- Cimento Portland de alta resistência inicial
CPB	- Cimento Portland branco

CSH	- Silicato de cálcio hidratado
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOD	- <i>Department of Defense</i>
EAP	- Emulsão asfáltica de petróleo
EMURB	- Empresa Municipal de Obras e Urbanização
FHWA	- <i>Federal Highway Administration</i>
GC	- Pedregulho argiloso
GeoPav	- Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
IG	- Índice de grupo
IP	- Índice de plasticidade
ISC	- Índice de Suporte Califórnia
ITS	- <i>Indirect tensile strenght</i>
Lamce	- Laboratório de Materiais de Construção
LL	- Limite de liquidez
LP	- Limite de plasticidade
LTT	- Laboratório de Topografia e Transportes
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
MF	- Material fresado
MORTH	- <i>Ministry of Road Transport &amp; Highways</i>
NBR	- Norma Brasileira
RCS	- Resistência à compressão simples
RS	- Resistente a sulfatos
RTCD	- Resistência à tração por compressão diametral
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UCS	- <i>Unconfined compression strenght</i>
UFS	- Universidade Federal de Sergipe
UTM	- Universal Transversa de Mercator

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pavimentação tem, como propósito, permitir a trafegabilidade com economia, conforto e segurança aos usuários, independentemente de época do ano ou condições climáticas. No entanto, devido a sua intensa utilização, os pavimentos sofrem desgaste, podendo migrar de uma condição ótima para uma condição ruim, caso não haja intervenções. Nesse contexto, o papel da manutenção de rodovias se faz importante, sendo requisito indispensável para a existência de um bom pavimento.

No Brasil, os pavimentos flexíveis, que compõem mais de 99% das rodovias pavimentadas do país, possuem vida útil, considerando sua manutenção, de 8 a 12 anos, sendo que, para esse tipo de pavimento, as intervenções de manutenção são mais frequentes, quando se compara com as intervenções em pavimentos rígidos (CNT, 2017).

Dentre as atividades de manutenção, há diversas alternativas técnicas para a restauração do pavimento, sendo a fresagem e a reciclagem apenas duas delas. Para a escolha da técnica de restauração é necessário conhecer os defeitos do pavimento, as informações de projeto, o histórico de intervenções, além de avaliar, em campo e em laboratório, as propriedades dos materiais existentes. Ainda, fatores econômicos, operacionais e ambientais devem ser analisados.

A operação de fresagem é realizada com certa frequência quando da manutenção de pavimentos asfálticos e consiste no desbaste de camadas deterioradas do mesmo para sua recuperação. O resíduo resultante da fresagem da camada de revestimento asfáltico consiste em fragmentos do mesmo em condição envelhecida, que podem ser reciclados, resultando em otimização dos recursos naturais.

Nos últimos anos, aspectos econômicos e relacionados aos suprimentos de petróleo e agregados naturais de boa qualidade elevaram a necessidade por materiais alternativos com melhor relação custo-benefício (FHWA, 2018). Conforme citam Bernucci *et al.* (2008), é crescente o uso, na pavimentação, de agregados provenientes do reuso de materiais diversos, destacando-se o resíduo de construção civil e a reciclagem de revestimentos asfálticos, que, em alguns países, já é a fonte principal de agregados.

No Novo México, é permitido misturar agregados virgens com até 50% de material fresado para utilização de base de pavimentos. Além disso, um máximo de 35% de material fresado pode ser misturado a agregados para produção de concreto asfáltico (HASAN; ISLAM;

TAREFDER, 2018). Na Índia, de 40% a 50% do material fresado produzido é reciclado e utilizado nas usinas de concreto asfáltico, sendo o restante descartado em aterros (RUKNUDDIN *et al.*, 2019). Segundo Mishra (2015), a reciclagem do material fresado tem ganhado popularidade na Índia devido a várias tentativas bem-sucedidas em projetos selecionados.

A Confederação Nacional do Transporte (CNT), através de entrevistas com especialistas de universidades, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e de concessionárias, constatou que reciclagem de pavimentos existentes foi apontada como a melhor solução para o cenário brasileiro, em que a maior parte dos pavimentos ultrapassou o tempo de vida para os quais foram projetados e não tiveram a manutenção adequada, devendo ser observada a particularidade de cada caso (CNT, 2017).

Segundo Kandhal e Mallick (1997), a utilização de pavimentos asfálticos reciclados teve sua origem em 1915 e foi reestabelecida a partir de meados dos anos de 1970, quando se deu o embargo do petróleo árabe que elevou os custos da construção. De acordo com a Federal Highway Administration (FHWA), ainda nos anos 1970, outro fator reascendeu o interesse na reciclagem de pavimentos asfálticos, qual seja, o advento dos equipamentos de fresagem de larga escala com dentes de corte facilmente ajustáveis (FHWA, 2018).

Alhaji e Alhassan (2018) afirmam que, enquanto em países desenvolvidos, o material fresado é reutilizado de forma adequada, nos países em desenvolvimento, esse material é descartado indiscriminadamente, causando danos ao meio ambiente. Para Alhaji *et al.* (2019), o material fresado é tratado como material de descarte devido à tecnologia limitada para sua reciclagem.

Nas últimas décadas, começou-se a perceber o impacto negativo que o consumo desenfreado e insustentável de recursos naturais gera ao meio ambiente. A reutilização do material fresado contribui com a proteção do meio ambiente, uma vez que garante a utilização adequada de recursos, e promove redução de custos na construção (ALHAJI *et al.*, 2019).

Mishra (2015) também cita, como vantagens da reutilização do material fresado, a redução nos danos provocados nas rodovias devido ao transporte de materiais das pedreiras, a economia de energia e a diminuição do consumo de diesel, uma vez que o transporte é minimizado.

A experiência com reciclagem de pavimentos asfálticos, adquirida ao longo dos anos, tem mostrado se tratar de uma técnica viável para a restauração de pavimentos. O método se apresenta, então, como alternativa de engenharia econômica e sustentável, providenciando uma destinação adequada ao material fresado, reaproveitamento dos agregados e do ligante e conservação de energia.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Com o passar do tempo, todos os pavimentos se deterioram devido ao tráfego e fatores climáticos. A malha rodoviária brasileira apresenta, atualmente, muitas rodovias com revestimento asfáltico comprometido, sendo rotineiras as atividades de manutenção e reconstrução de pavimentos. A fresagem é um dos serviços comuns na manutenção e reconstrução de rodovias e gera grande quantidade de resíduo que, a princípio, seria descartado, muitas vezes de forma inadequada.

Por outro lado, em muitas ocasiões, é verificada a escassez de materiais adequados para pavimentação disponíveis em locais próximos às obras, o que eleva o custo da construção devido à necessidade de transporte de agregados provenientes de locais mais distantes. Atualmente, diante dos apertados orçamentos e da elevação dos custos de materiais, as vantagens econômicas da reutilização de materiais são ainda mais relevantes.

Diante desses dois cenários, a reutilização dos resíduos gerados nas operações de fresagem se mostra, então, vantajosa não só do ponto de vista econômico, mas, também, do ponto de vista ambiental, uma vez que permite a conservação de fontes de recursos novos, contribui com a resolução de problemas relacionados ao descarte do resíduo e com a conservação de energia.

Diferentemente de outros materiais alternativos aos agregados naturais convencionais, como a escória de aciaria e resíduo da construção civil, não há, no Brasil, conhecimento o suficiente que norteie o uso do resíduo de fresagem de forma padronizada em camadas de pavimentos. Essa insuficiência de conhecimento técnico e científico inibe uma reciclagem eficiente do mesmo para emprego na pavimentação e na estabilização de solos.

Devido à variabilidade do material removido na operação de fresagem, existem incertezas relacionadas ao seu desempenho. À medida em que se adquire experiência e há aumento da utilização, problemas de controle de qualidade vão sendo sanados, aumentando a confiança na reciclagem de pavimentos (DNIT, 2006b). Segundo a FHWA (2018), apesar da evolução da tecnologia, ainda há resistência no uso da reciclagem de pavimentos e o motivo frequentemente alegado para tal é a falta de informação relacionada à seleção de projetos.

Autores como Hasan, Islam e Tarefder (2018), Alhaji e Alhassan (2018), Alhaji *et al.* (2019), Ruknuddin *et al.* (2019), Mahasneh (2016), Mishra (2015) e Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016), dentre outros, estudaram o uso de resíduo de fresagem em pavimentação e na estabilização de solos, concluindo pela viabilidade de sua utilização, seja em camadas de base, sub-base ou mesmo para a adequação das propriedades do subleito. No entanto, conforme será apresentado na revisão bibliográfica, percebe-se que não há uniformidade nos resultados

encontrados pelos autores e nos métodos adotados, o que demonstra a necessidade de se obter mais informação sobre as propriedades físicas e mecânicas do material fresado e das misturas com o solo, visando consolidar o conhecimento e assegurar estabilidade das construções.

É comum a reciclagem do resíduo de fresagem para produção de novas misturas asfálticas, sendo o assunto amplamente abordado tanto em estudos (e.g. WANG *et al.*, 2018; ZHANG, MUHUNTHAN, 2017; BAŃKOWSKI, 2018; NOFERINI *et al.*, 2017), quanto em manuais de órgãos públicos no Brasil e em outros países (DNIT, 2005; DNIT, 2006b; FHWA, 2018; KANDHAL; MALLICK, 1997). No entanto, a técnica para utilização de material fresado em outras camadas do pavimento ainda não está consolidada. Assim, a pesquisa em questão se propõe a contribuir para o entendimento dos efeitos da reutilização do resíduo de fresagem no comportamento de propriedades geotécnicas quando utilizado misturado com solo natural em camadas de pavimento.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar, em laboratório, as propriedades físicas, mecânicas e hidráulica de misturas de solo com resíduo de fresagem de revestimento asfáltico e cimento Portland para fins de uso em camadas de pavimento.

A partir do objetivo geral, estruturam-se os seguintes objetivos específicos:

- verificar o comportamento granulométrico das misturas solo-resíduo de fresagem e solo-resíduo de fresagem-cimento;
- analisar o comportamento mecânico do solo, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento, quanto à compactação e ao Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- analisar o comportamento mecânico das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento, quanto à resistência à compressão simples (RCS) e à resistência à tração por compressão diametral (RTCD);
- analisar o comportamento hidráulico do solo, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento, no que diz respeito à permeabilidade;
- analisar a durabilidade das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento;
- avaliar a viabilidade do uso de misturas solo-resíduo de fresagem e solo-resíduo de fresagem-cimento para uso em camadas de pavimento, por meio da comparação dos resultados obtidos.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta a seguinte estrutura:

- Capítulo 2, em que é apresentada a revisão bibliográfica sobre operação de fresagem, aplicações e estudos que utilizaram o resíduo de fresagem em uma série de ensaios. Buscou-se, também, abordar a estabilização de solos, com ênfase na estabilização mecânica e química com cimento Portland;
- Capítulo 3, que descreve o procedimento experimental da pesquisa. Nesse capítulo, são descritos os materiais utilizados, bem como os métodos de ensaios para atingir os objetivos propostos;
- Capítulo 4, em que são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a pesquisa;
- Capítulo 5, em que são descritas as constatações observadas no programa experimental, as principais contribuições da pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras.
- Referências Bibliográficas, em que são relacionadas as fontes consultadas que embasam a teoria e o procedimento experimental.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

De uma maneira geral, o pavimento pode ser definido como uma estrutura composta por camadas dimensionadas para resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos, proporcionando segurança e conforto aos usuários da rodovia.

Segundo Yoder e Witzak (1975), tradicionalmente, os pavimentos são divididos em duas categorias: a dos pavimentos flexíveis e a dos pavimentos rígidos. Os pavimentos rígidos são aqueles compostos por concreto de cimento Portland, podendo apresentar, ou não, uma camada de sub-base entre o pavimento e o subleito. Já os pavimentos flexíveis são compostos por camada de revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito que se apoiam no subleito compactado, podendo haver ausência de alguma camada a depender da situação.

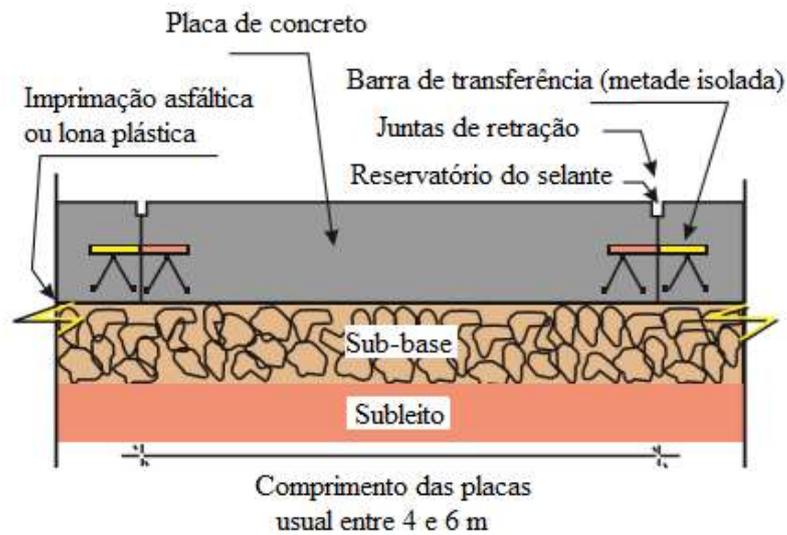
Há, ainda, uma terceira categoria de pavimentos: a categoria dos pavimentos semirrígidos, que, conforme descreve Huang (2004), é composto por revestimento asfáltico, responsável por proporcionar uma superfície macia e confortável, e possui uma base cimentada mais resistente.

Yoder e Witzak (1975) esclarecem que a diferença essencial entre o pavimento rígido e o flexível está na forma como o carregamento é distribuído. Por apresentar maior módulo de elasticidade, o pavimento rígido distribui o carregamento em uma área de solo mais ampla e a placa de concreto é responsável pela maior parte da capacidade de suporte do pavimento. Já a resistência do pavimento flexível resulta da combinação de camadas, as quais distribuem o carregamento para o subleito. Assim, DNIT (2006a) explica que todas as camadas do pavimento flexível sofrem deformação elástica significativa, enquanto Huang (2004) elucida que, nos pavimentos flexíveis, as camadas apresentam materiais mais resistentes na superfície, onde as tensões são maiores.

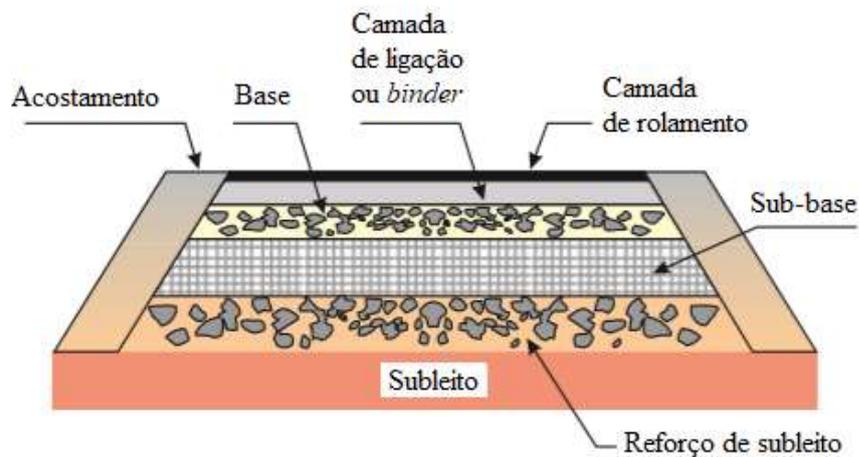
Yoder e Witzak (1975) argumentam que, uma vez que pavimentos asfálticos podem apresentar rigidez tanto quanto os pavimentos de concreto, a depender dos materiais utilizados e do seu dimensionamento, essa classificação é considerada arbitrária e limitada. Assim, conforme cita Bernucci *et al.* (2008), há uma tendência a usar a nomenclatura “pavimentos de concreto de cimento Portland” e “pavimentos asfálticos” no lugar de “pavimentos rígidos” e “pavimentos flexíveis”.

Na Figura 1, a seguir, são apresentados esquemas das estruturas de pavimento de concreto de cimento Portland e de pavimento asfáltico.

Figura 1: Estruturas de pavimentos



(a) Concreto-cimento (corte longitudinal)



(b) Asfáltico (corte transversal)

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Tratando especificamente das camadas de pavimentos asfálticos, tem-se que o revestimento asfáltico tem como função promover uma superfície de rolamento segura e confortável ao usuário. Segundo Bernucci *et al.* (2008), na maioria dos pavimentos brasileiros, o revestimento consiste em uma mistura de agregados minerais com ligantes asfálticos.

A base é a camada do pavimento que se encontra imediatamente abaixo do revestimento asfáltico. Segundo Yoder e Witczak (1975), a base do pavimento asfáltico pode ser constituída de fragmentos de rocha adequadamente graduado, pedregulho, escória ou material estabilizado como misturas solo-agregado, materiais granulares tratados com cimento ou misturas betume-agregado. A base está próxima à superfície e, por isso, deve apresentar alta resistência à deformação.

A sub-base como é uma camada complementar à base, com as mesmas funções, executada sobre o subleito ou reforço do subleito (DNIT, 2010a). Segundo Yoder e Witzak (1975), uma vez que a sub-base se encontra mais distante da superfície, pode ser constituída de materiais selecionados estáveis, mas cujas características não são adequadas para camada de base; solo estabilizado; empréstimo selecionado ou material de qualidade inferior disponível localmente. A camada de sub-base permite que sejam construídos pavimentos relativamente espessos a um custo menor.

Já o reforço do subleito é uma camada, posta por circunstâncias técnico-econômicas, que possui características geotécnicas melhores que o material do subleito, porém inferiores ao material da camada que lhe for superior.

## 2.2 FRESAGEM

Quando um pavimento asfáltico se torna deteriorado, é necessário restaurá-lo, o que pode ser feito através da execução de espessuras adicionais de camadas ou através de corte de todo ou parte do revestimento deteriorado e execução de nova camada. O corte de todo ou parte do revestimento deteriorado pode ser realizado através de máquina fresadora, que utiliza rolos especiais munidos de pontas diamantadas cortantes para realizar o desbaste (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Bonfim (2007) define fresagem como sendo o desbaste de uma ou mais camadas do pavimento a uma espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a frio ou a quente, visando sua restauração. No processo mecânico a frio, o corte da estrutura é efetuado por abrasão, ocorrendo quebra de parte dos agregados na profundidade de corte e alteração da granulometria do material. Já no processo mecânico a quente, a estrutura é pré-aquecida para facilitar o desbaste e, assim, a camada oferece pouca resistência ao corte, não havendo alteração significativa na granulometria do material.

A Figura 2 se refere à fresagem realizada a frio. Na Figura 2 (a), é apresentado um exemplar de fresadora a frio, enquanto a Figura 2 (b) ilustra uma superfície fresada a frio, em que se observa a quebra dos agregados.

Figura 2: Fresagem a frio: (a) equipamento e (b) superfície fresada



(a)

Fonte: WIRTGEN, 2020



(b)

Fonte: Bonfim (2007)

Após a operação de fresagem, a superfície de rolamento deve apresentar textura adequada ao tráfego ou permitir recapeamento imediato. É importante garantir que a superfície final não favoreça o acúmulo de água e que a sinalização horizontal eventualmente removida seja restaurada antes da liberação do tráfego (ARRA, 2016). Conforme destaca Wirtgen (2020), o estado da superfície fresada impacta na qualidade e na performance das novas camadas.

Segundo Bonfim (2007), os tipos de fresagem podem ser classificados quanto à espessura de corte e quanto à rugosidade resultante na pista. Quanto à espessura de corte, a fresagem pode ser superficial, rasa ou profunda. A fresagem superficial se dirige apenas à correção de defeitos na superfície do pavimento, como exsudação e deformações plásticas, resultando em textura que confere segurança ao rolamento, porém não muito confortável, podendo ser dispensado um posterior recapeamento. Já a fresagem rasa apresenta profundidade média de corte de, aproximadamente, 5 cm e atinge camadas superiores do pavimento, podendo alcançar a camada de ligação, sendo utilizada na correção de defeitos funcionais e em remendo superficiais. A fresagem profunda, por sua vez, atinge camadas mais profundas no pavimento, podendo alcançar, inclusive, as camadas de base e sub-base. É uma operação utilizada na correção de defeitos estruturais, na correção do greide das rodovias, na execução de serviços de pequenos remendos, entre outros (BONFIM, 2007). De acordo com a *Asphalt Recycling & Reclaiming Association* - ARRA (2016), as espessuras de corte típicas se situam entre 25 e 300 mm.

Ainda, a depender do tipo de cilindro utilizado e da velocidade da operação, pode-se classificar a fresagem como padrão, fina ou microfresagem. Na fresagem padrão, introduzida inicialmente no mercado, a distância lateral entre os dentes de corte do cilindro utilizado é de, aproximadamente, 15 mm. Para a fresagem fina, essa distância corresponde a, aproximadamente, 8 mm, resultado numa rugosidade menor na pista, podendo ser dispensado o posterior recapeamento em alguns casos. Já na microfresagem, os dentes de corte do cilindro utilizado distam lateralmente entre 2 e 3 mm, removendo uma camada muito fina do

revestimento, dispensando-se a posterior aplicação de nova camada. Pode ser utilizada para adequação do perfil longitudinal ou retirada de sinalização horizontal das pistas (BONFIM, 2007).

Dentre as numerosas formas de aplicação da técnica de fresagem, Bonfim (2007) cita a fresagem de áreas descontínuas, a fresagem contínua, a fresagem em cunha, a fresagem de arremate, a fresagem para sonorização, além da utilização da fresagem na correção de defeitos superficiais e na correção da inclinação do pavimento. A Tabela 1, a seguir, apresenta uma síntese das diversas aplicações da operação de fresagem extraídas do autor citado.

Tabela 1: Aplicações da fresagem

<b>Tipo</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Observações</b>
Fresagem de áreas descontínuas	Áreas que apresentam variações de comprimento e largura	Atentar para o aparecimento de degraus no pavimento. Para áreas maiores, pode-se utilizar qualquer fresadora; para áreas menores, as fresadoras de pequeno porte são mais produtivas.
Fresagem contínua	Quando se pretende manter ou restaurar o greide da pista, solucionar problemas de pavimentos oxidados e desgastados, atenuar a propagação de trincas, corrigir exsudações e deformações plásticas, aliviar o peso sobre obras de arte especiais	Ocorre na largura total da pista. São utilizadas fresadoras de grande porte.
Fresagem em cunha	Realizada junto às sarjetas	Requer verificação prévia do abaulamento do pavimento.
Fresagem de arremate	Realizada junto às interferências existentes no pavimento	Complementar aos serviços realizados com fresadoras de grande porte. São utilizadas fresadoras de pequeno porte.
Fresagem para sonorização	Alerta aos condutores quanto aos limites das faixas de rolamento	Profundidade de cerca de 10 mm. São utilizadas fresadoras de pequeno porte.
Fresagem para correção de defeitos superficiais	Correção de exsudações e deformações plásticas	Pode ser dispensado o recapeamento. São utilizados equipamentos com cilindros fresadores mais largos e para fresagem fina.
Fresagem para correção da inclinação do pavimento	Correção da inclinação do pavimento	Necessita de auxílio de levantamento topográfico e diretrizes de projeto.

Fonte: Bonfim (2007)

Verifica-se que o emprego de fresagem na manutenção de pavimentos apresenta muitas vantagens. Como um primeiro benefício dessa técnica, Bonfim (2007) cita a manutenção do greide do pavimento, uma vez que sucessivos recapeamentos sem a retirada do revestimento anterior trazem prejuízos estéticos, funcionais e de segurança, como cotas da pista superiores

as das guias, problemas de drenagem pela alteração da seção transversal, diminuição do gabarito de obras de arte especiais, inclinação excessiva da pista, entre outros.

### 2.3 RESÍDUO DE FRESAGEM

O material gerado na operação de fresagem nada mais é do que o revestimento asfáltico removido de estradas deterioradas quando da sua manutenção, reconstrução ou restauração. Trata-se, portanto, de fragmentos de revestimento asfáltico envelhecido.

O revestimento asfáltico constitui uma das camadas dos pavimentos flexíveis, sendo aquela que se destina a receber as cargas dos veículos e a que está mais exposta às intempéries. Na maioria dos pavimentos brasileiros, o revestimento asfáltico é composto por mistura de agregados minerais e ligantes asfálticos. Os revestimentos podem ser fabricados em usina ou na própria pista e são, também, identificados pelo tipo de ligante, que podem ser cimento asfáltico de petróleo (CAP), misturado a quente, ou emulsão asfáltica de petróleo (EAP), misturada a frio (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As misturas a quente se distinguem de acordo com o padrão granulométrico e características mecânicas. O chamado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), um dos tipos de mistura usinada a quente mais utilizados no Brasil, é constituído de agregados, com curva granulométrica contínua e bem graduada, filer e CAP (BALBO, 2010). A faixa de teor de asfalto requerido pelo CBUQ, em peso, se encontra normalmente entre 4,5% e 6,0% (BERNUCCI *et al.*, 2008). A norma DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006c), que estabelece a sistemática da produção de CBUQ para construção de camadas de pavimento, apresenta, dentre outros, requisitos relacionados à granulometria e teor de asfalto para composição do concreto asfáltico.

De acordo com Balbo (2010), as misturas asfálticas densas, como CBUQ, são empregadas em revestimentos de vias urbanas, estradas, portos aeroportos, estacionamentos, garagens, dentre outras áreas, e, no Brasil, está presente em 98% das rodovias em extensão.

Segundo Bonfim (2007), o material resultante da fresagem de revestimentos asfálticos possui características nobres e, por isso, pode ser reutilizado como material de pavimentação. Para tanto, ARRA (2016) indica que o resíduo de fresagem deve estar limpo e livre de materiais deletérios, podendo ser necessário adequar suas dimensões para que atenda a requerimentos específicos.

Ainda, com relação ao armazenamento do resíduo de fresagem, recomenda-se que o material não seja empilhado a uma altura superior a três metros, esteja protegido da água e que as pilhas sejam gerenciadas de forma a evitar degradação, segregação e reconsolidação (ARRA, 2016).

Alguns estudos têm sido realizados sobre a utilização de material fresado como agregado em camadas de pavimento asfáltico. Mishra (2015) informa que o material fresado pode ser reutilizado em misturas de asfalto a quente e nas camadas de base e sub-base, observando-se critérios de resistência e granulometria, e ressalta que a granulometria requerida para reutilização do material fresado pode ser obtida através da utilização de um triturador.

Alhaji e Alhassan (2018) afirmam que os agregados do material fresado podem melhorar a estabilidade de solos, enquanto o betume proporciona adesão às partículas do solo, contribuindo com o ganho de resistência das misturas. Segundo Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016), o resíduo de fresagem também contém agregados triturados, o que pode ser útil para estabilização mecânica.

Nos últimos tempos, pesquisadores têm se dedicado a explorar o comportamento de misturas contendo resíduo de fresagem e solo. Hasan, Islam e Tarefder (2018) estudaram, em laboratório, o efeito do material fresado no módulo de resiliência de um subleito constituído de solo classificado como A-2-6, bem como a influência do teor de umidade, para diferentes níveis de tensão, concluindo que o material fresado pode ser utilizado para estabilização de solos e que as misturas de solo e material fresado podem ser utilizados como material de subleito.

Alhaji e Alhassan (2018) estudaram a microestrutura e a resistência de misturas compactadas de material fresado e *Black Cotton Soil* (BCS), uma argila muito mole e expansiva encontrada em muitas regiões do mundo, inclusive na Nigéria e na Índia, com o objetivo de utilizar o material, que seria descartado, para estabilização do solo. Em seu trabalho, o material asfáltico foi aquecido de forma a promover a fusão do betume, possibilitando revolver as partículas da argila quando da mistura. Do estudo realizado, concluíram que o BCS estabilizado com material fresado pode ser usado como material de sub-base para pavimentos com baixo tráfego, de acordo com as especificações da *Nigerian General Specification for Roads and Bridge Works*.

Alhaji *et al.* (2019) avaliaram, em laboratório e em campo, características relacionadas à resistência de misturas contendo material fresado e argila laterítica altamente plástica de baixa compressibilidade, além de misturas contendo material fresado, solo laterítico e cimento. Dos resultados obtidos, foi indicado que o material fresado incorporado ao solo promoveu ganho de resistência, a qual se mostrou ainda maior com a adição de cimento, tornando as misturas passíveis de serem utilizadas em camadas de pavimento, de acordo com a *Nigerian General Specification for Roads and Bridge Works*.

Ruknuddin *et al.* (2019) estudaram a estabilização de solo de subleito (a curva granulométrica apresentada pelos autores indica que o solo possui características de uma areia) com material fresado em teores iguais a 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Na pesquisa, também se observou que a incorporação de material fresado ao solo promoveu ganho de resistência em relação ao solo puro, sendo o resultado considerado satisfatório para estabilização do solo de subleito.

Mahasneh (2016) estudou as alterações provocados nas propriedades físicas de uma argila siltosa ao se misturar, separadamente, resíduo de alumínio e material fresado com o solo. Os resultados de sua investigação mostraram que a adição tanto de resíduo de alumínio, quanto de material fresado na argila siltosa, com a devida compactação, ocasionou em aumento na capacidade de suporte, na massa específica seca máxima da mistura, na resistência ao cisalhamento e uma redução na expansão da argila.

Mishra (2015) analisou a adequabilidade de se usar mistura de agregado natural e resíduo de fresagem corrigidos granulometricamente na construção de pavimentos flexíveis. Foram analisadas amostras com 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 100% de material fresado, concluindo que o resíduo de fresagem pode ser usado em sub-base granular de pavimentos flexíveis após mistura de modo a atender às especificações do *Ministry of Road Transport & Highways* (MORTH), da Índia. Ainda, concluiu que o material fresado combinado com o agregado natural em várias proporções pode ser usado para camadas de base de modo a atender às especificações do MORTH.

Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) investigaram a adequabilidade de utilizar material fresado em camada de sub-base. Para tanto, realizou misturas contendo 0%, 10%, 50%, 90% e 100% de material fresado e recomendou o uso de misturas do solo granular de subleito e resíduo de fresagem para camada de sub-base.

Moura *et al.* (2018) buscaram estabilizar granulometricamente, um solo A-4 siltoso e moderadamente plástico, através de misturas contendo 50% e 70% de material fresado, e quimicamente, com a adição de 2% e 4% de cimento Portland. Através de ensaios de caracterização, compactação e ISC, concluíram que as misturas melhoradas com cimento apresentaram potencial para serem empregadas como camada de base de pavimento rodoviário. Por sua vez, Paiva, Oliveira e Peixoto (2017) avaliaram a resistência à tração na flexão de misturas contendo 30%, 50% e 70% de material fresado em massa, solo de base classificado como A-1-b e 3% de cimento Portland. Estes autores verificaram que o aumento do teor de material fresado provocou redução na resistência das amostras.

### 2.3.1 Características do resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos

Sabe-se que as camadas de revestimento asfáltico rodoviário podem ser constituídas de diferentes tipos de misturas de agregados e materiais betuminosos, com especificações e tecnologias próprias. Dessa forma, os diferentes tipos de revestimentos asfálticos podem gerar resíduos de fresagem com características distintas. A seguir, são apresentadas algumas características do resíduo de fresagem verificadas em estudos de diferentes autores.

#### 2.3.1.1 Granulometria

Conforme explica o DNIT (2006b), o tamanho das partículas do resíduo de fresagem depende da espessura de corte, da velocidade e direção de rotação do cilindro fresador, da quantidade e do espaçamento entre os dentes do cilindro e da velocidade de operação do equipamento. Se o revestimento é fresado a frio, ocorre uma modificação na granulometria devido ao acréscimo de finos.

As informações obtidas de estudos já realizados com o resíduo de fresagem confirmam que a granulometria do material pode variar com a fonte e com o modo de obtenção. Segundo DNIT (2006b), problemas com a utilização desse resíduo podem ocorrer quando se desconhece a sua origem ou quando materiais de diferentes fontes são misturados, o que requer considerações diferenciadas na fase de preparação para reutilização.

Bonfim (2007) verificou que, comparando-se as curvas granulométricas do material fresado sem a extração do betume com as curvas do material original, ocorreu um deslocamento da curva para baixo. Justificou tal fato pela ocorrência de grumos resultantes do processo de fresagem a frio, que fizeram com que a percentagem de material passante em cada peneira fosse menor. Por outro lado, ao comparar as curvas granulométricas do material fresado com a extração do betume às curvas do material original, observou um deslocamento das curvas para cima e justificou o observado ao fato da fresagem provocar quebra de parte dos agregados na altura da linha de corte.

Além disso, Bonfim (2007) afirma ter verificado que as curvas analisadas com grumos, quando plotadas em faixas granulométricas empregadas na pavimentação, extrapolaram os limites inferiores das citadas faixas nas duas extremidades, o que justificou pela redução da quantidade de finos e pelo acréscimo do tamanho dos grumos, fato que verificou se acentuar com o aumento da velocidade de avanço da fresadora.

Bonfim (2007) verificou que a quantidade de finos para todas as curvas, considerando os grumos, se encontrava entre 0,7% e 1,3% passante em peso na peneira nº 200. Além disso, observou curvas granulométricas bem graduadas e passíveis de estudos adicionais para análise do comportamento mecânico para fins de reciclagem. As Figuras 3 e 4 mostram as variações na curva granulométrica original, com e sem extração do betume, para duas das nove amostras coletadas e analisadas pelo autor.

Figura 3: Curvas granulométricas referentes à amostra 2

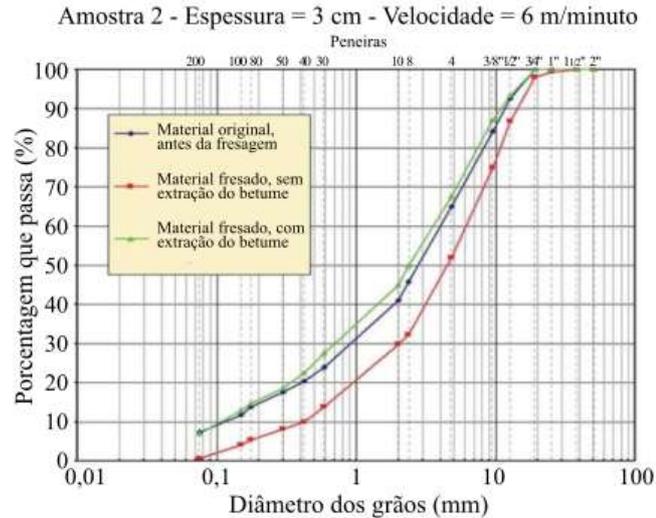
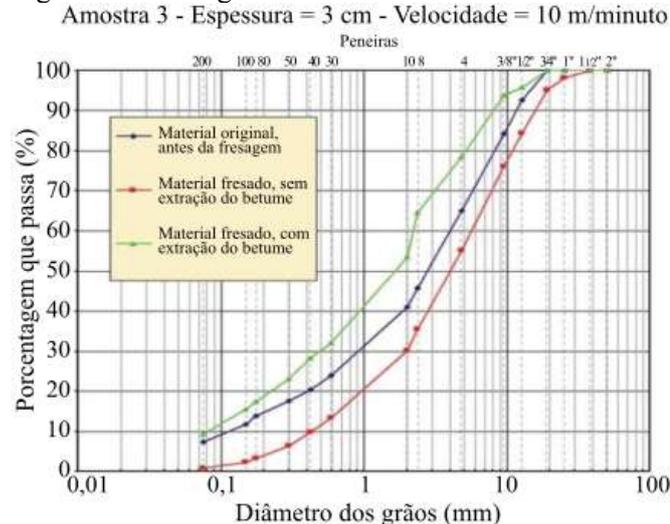


Figura 4: Curvas granulométricas referentes à amostra 3



Das curvas apresentadas nas Figuras 3 e 4, percebe-se que o material fresado, sem extração do betume, utilizado na pesquisa de Bonfim (2007) é de granulação grosseira e com baixo teor de finos.

O resíduo de fresagem estudado por Alhaji *et al.* (2019) foi classificado como A-1-a, pelo sistema de classificação de solos da *American Association of State Highway and Transportation*

*Officials* (AASHTO), e como pedregulho mal graduado, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Alhaji e Alhassan (2018) verificaram que o material utilizado em sua pesquisa se apresentou uniformemente graduado e composto, principalmente, de material mais grosseiro, podendo ser classificado como A-1-a, pelo sistema de classificação de solos da AASHTO, e como areia mal graduada, de acordo com SUCS. O resíduo de fresagem utilizado apresentou um percentual de finos igual a 6,4%. Os autores atribuíram essa ocorrência ao método manual de coleta do material, que permitiu que finos da base do pavimento se fixasse ao mesmo.

Mahasneh (2016), por sua vez, em seu estudo sobre o uso de resíduo de alumínio e material fresado para estabilização de argila siltosa, verificou que o material fresado utilizado era considerado um material grosso, não apresentou granulometria uniforme e, ainda, apresentou uma distribuição de grãos considerada bem graduada.

Segundo o DNIT (2006b), no que diz respeito ao reaproveitamento do resíduo de fresagem, a análise granulométrica do material removido do pavimento pode indicar a necessidade de adição de novos agregados de modo que permita o enquadramento numa faixa específica.

Percebe-se que, embora haja variação das características granulométricas dos resíduos de fresagem utilizados nas diferentes pesquisas, trata-se de um material grosso, o que é esperado quando se tem em mente que o resíduo de fresagem em questão provém de revestimentos asfálticos, compostos basicamente de ligante asfáltico e agregados minerais. Por sua vez, os agregados minerais podem ser de vários tamanhos e ter origem em fontes diversas, o que justifica as diferenças nas classificações observadas pelos autores.

### 2.3.1.2 Densidade real dos grãos

A Tabela 2 apresenta as densidades reais dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores, onde se verifica uma grande variabilidade nos resultados obtidos.

Tabela 2: Densidade real dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores

<b>Autor</b>	<b>Densidade real do resíduo de fresagem</b>
Alhaji e Alhassan (2018)	2,01
Taha <i>et al.</i> (2002)	2,12
Mousa <i>et al.</i> (2017)	2,245
Mahasneh (2016)	2,56
Chhabra, Ransinchung e Islam (2021)	2,57
Paluri (2019)	2,60
Mishra (2015)	2,63

Verçosa (1985) e Petrucci (2007) indicam que a densidade dos materiais betuminosos varia de 0,9 a 1,4, enquanto Petrucci (2005) aponta valores iguais a 2,65 para a densidade real de agregados miúdos. Segundo Neville (2016), a maioria dos agregados naturais possui massa específica real entre 2,6 e 2,7 g/cm<sup>3</sup>.

Nota-se, portanto, que os materiais betuminosos são mais leves que os agregados e, por isso, a densidade de resíduos de fresagem de diferentes fontes é variável. Dessa forma, uma das explicações para a discrepância observada nos valores de densidade do resíduo de fresagem obtidos por diferentes autores pode estar relacionado ao teor de asfalto do material.

### 2.3.1.3 Teor de asfalto

Segundo a Norma DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006c), os concretos asfálticos, em geral, são dosados com teores de asfalto entre 4,0% e 9,0%, sendo que, para camadas de rolamento, esses teores se situariam entre 4,5% e 9,0%. Considerando que o resíduo de fresagem de revestimento asfáltico nada mais é que fragmentos de concreto asfáltico em condição envelhecida, infere-se que o teor de asfalto desses resíduos não divirja muito daquele intervalo.

Mishra (2015), por sua vez, comenta que o teor de asfalto do resíduo de fresagem se encontra, tipicamente, no intervalo compreendido entre 5% e 6%. Já Chesner, Collins e MacKay (1998) apud Paluri (2019) indicam valores compreendidos entre 3% e 7%.

Há que se levar em consideração que os concretos asfálticos são dosados de maneira experimental, buscando-se encontrar a proporção ideal de agregados, material de enchimento e cimento asfáltico para que sejam atendidos os critérios de desempenho. Assim, é esperada variabilidade entre resíduos de fresagem de diferentes fontes.

A Tabela 3 apresenta os teores de asfalto dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores.

Tabela 3: Teor de asfalto dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores

<b>Autor</b>	<b>Teor de asfalto (%)</b>
Chhabra, Ransinchung e Islam (2021)	2,8
Paluri (2019)	4
Paiva, Oliveira e Peixoto (2017)	4,7
Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016)	5,09
Mousa <i>et al.</i> (2017)	5,2
Taha <i>et al.</i> (2002)	5,5
Alhaji e Alhassan (2018)	5,99

### 2.3.1.4 Absorção de água

Segundo Mishra (2015), Debbarma, Ransinchung R.N. e Singh (2019) e Okafor (2010), devido à capa de betume que envolve os agregados, a absorção de água do material fresado é reduzida. A Tabela 4 apresenta valores de absorção de água do resíduo de fresagem obtidos por diferentes autores.

Tabela 4: Valores de absorção de água do resíduo de fresagem obtidos por diferentes autores

<b>Autor</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
Okafor (2010)	2,9 (fração graúda)
Paluri (2019)	1,04
Debbarma, Ransinchung R.N. e Singh (2019)	0,70 (fração graúda) e 2,03 (fração miúda)
Mahasneh (2016)	0,88
Araújo Júnior, Ferreira e Silva (2018)	1,86 (fração graúda)
Mishra (2015)	1,42
Chhabra, Ransinchung e Islam (2021)	1,67
Taha <i>et al.</i> (2002)	1,0
Ghanidazeh, Rahrovan e Bafghui (2018)	2,34 (fração graúda)
Mousa <i>et al.</i> (2017)	1,1 (fração graúda)

Considerando que o resíduo de fresagem é constituído de material betuminoso e agregados, torna-se relevante observar a influência que esses materiais podem ter sobre a absorção do resíduo.

Petrucci (2005) indica que a absorção de agregados naturais é muito baixa, podendo atingir o máximo de 2% para agregados miúdos e girar em torno de 0,1% a 0,2% para agregados graúdos. Segundo Farias e Palmeira (2010), as rochas ígneas e metamórficas geralmente apresentam absorção inferior a 0,5% e raramente excedem 1,0%, sendo que as rochas sedimentares têm maior capacidade de absorção. Newman (1959) apud Neville (2016) apresenta valores típicos de absorção de diferentes agregados britânicos, que variam de 0,20%, para uma areia padrão de ensaio Leighton Buzzard de formato arredondado e dimensão de 600 a 850 µm, a 4,53%, para um seixo de rio para ensaio de formato irregular e dimensão de 9,5 mm a 4,8 mm.

Alguns dos autores listados na Tabela 4 também investigaram a absorção de água de agregados naturais: Okafor (2010) obteve a absorção de água de agregados naturais graúdos igual a 3,2%; Paluri (2019) obteve valores de absorção iguais a 1,2% para o agregado natural; Debbarma, Ransinchung R.N. e Singh (2019) verificaram que o agregado natural graúdo apresentou absorção igual a 0,65%, o agregado natural miúdo apresentou absorção igual a

0,60%. Ou seja, percebe-se uma grande variabilidade de valores obtidos para absorção de agregados.

Já os materiais betuminosos são hidrófugos, ou seja, repelem água, sendo amplamente utilizados como material de estanqueidade nos processos de impermeabilização (PETRUCCI, 2007). Dessa forma, há coerência em dizer que a presença do material betuminoso tende a reduzir a absorção do resíduo de fresagem quando se compara à absorção do agregado natural. No entanto, essa comparação pode não ser válida quando se compara a absorção do resíduo de fresagem à absorção de agregado natural diverso do que o constitui ou quando se considera que, na fresagem a frio, pode haver quebra e exposição da parte interna de agregados ou mesmo contaminação com material de outras camadas do pavimento.

Percebe-se, então, que a absorção do resíduo de fresagem tem influência de diversos fatores, tais como tipo e tamanho do agregado que o constitui, teor de asfalto e técnica utilizada na fresagem.

### 2.3.1.5 Abrasão *Los Angeles*

A Tabela 5 apresenta valores de desgaste à abrasão *Los Angeles* dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores.

Tabela 5: Valores de abrasão *Los Angeles* dos resíduos de fresagem estudados por diferentes autores

<b>Autor</b>	<b>Desgaste à abrasão <i>Los Angeles</i> (%)</b>
Taha <i>et al.</i> (2002)	33,6
Mousa <i>et al.</i> (2017)	31,6
Mishra (2015)	21,80

Os autores listados, em suas pesquisas, também avaliaram a abrasão *Los Angeles* de agregados naturais, obtendo valores menores que os obtidos para o resíduo de fresagem. Taha *et al.* (2002), Mousa *et al.* (2017) e Mishra (2015) obtiveram valores abrasão para os agregados naturais iguais a 18,8%, 25,5% e 19,55%, respectivamente.

É fácil perceber que o resíduo de fresagem normalmente apresentará valores de abrasão *Los Angeles* mais elevados que os agregados naturais devido à capa de betume oxidada que o circunda, que desprende fragmentos durante a realização do ensaio. Apesar disso, os valores de abrasão *Los Angeles* obtidos pelos autores satisfazem o critério da norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), que estabelece, como condição para utilização em camadas de base estabilizadas granulometricamente, o desgaste máximo de 55%.

### 2.3.2 Efeitos da adição de material fresado sobre as propriedades das misturas com solo

A seguir, são apresentados alguns resultados obtidos em estudos já realizados envolvendo misturas de material fresado e solo para fins de pavimentação. Verifica-se que o resíduo de fresagem apresentará benefícios ou prejuízos às misturas a depender do tipo de solo ou agregados naturais aos quais será adicionado. Por ser um material grosseiro e não plástico, tende a apresentar benefícios em misturas com solos finos e plásticos, mas, em mistura com outros materiais mais granulares, eventualmente podem ser observados prejuízos nas propriedades.

#### 2.3.2.1 Propriedades físicas

É natural que, em misturas contendo diferentes tipos de materiais, suas características granulométricas sejam influenciadas pelas características de cada material. Como já discutido, o resíduo de fresagem normalmente se apresenta como um material de granulometria grossa, de modo que, se for utilizado em misturas com materiais mais finos que ele, a graduação das misturas tenderá a ser mais granular à medida que se aumenta o teor de resíduo de fresagem. Esta ocorrência foi verificada em trabalhos como os de Oliveira (2018), Moura *et al.* (2018), Maciel *et al.* (2018) e Hasan, Islam e Tarefder (2018).

Alhaji e Alhassan (2018), Mahasneh (2016), Mousa *et al.* (2017) constataram alterações nas densidades reais dos grãos das misturas constituídas de resíduo de fresagem e solo ou agregado natural: à medida que se aumentou o teor de resíduo de fresagem das misturas, foram verificadas reduções nas densidades reais dos grãos das misturas. Verificou-se que nas pesquisas desses autores o resíduo de fresagem apresenta densidade menor que a do solo ou do agregado com os quais são misturados, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Densidade real dos grãos dos resíduos de fresagem e solo ou agregado obtidos por diferentes autores

Autor	Densidade real dos grãos	
	Resíduo de fresagem	Solo ou agregado
Alhaji e Alhassan (2018)	2,01	2,49
Mahasneh (2016)	2,56	2,67
Mousa <i>et al.</i> (2017)	2,245	2,541

Mishra (2015), por outro lado, estudou misturas de resíduo de fresagem com agregados naturais, mas não verificou grande alterações na densidade real dos grãos das misturas, uma vez que obteve densidades reais semelhantes para o resíduo (2,63) e para o agregado (2,65).

Percebe-se, que, no que diz respeito às densidades reais dos grãos, o comportamento das misturas depende das densidades dos materiais misturados. Tendo em vista que a densidade

real dos grãos do resíduo de fresagem costuma ser menor que a densidade real dos grãos do solo ou agregados naturais, ao misturar os materiais, é esperado que haja alguma redução na densidade real dos grãos das misturas com o aumento do teor de resíduo de fresagem.

No que diz respeito aos limites de Atterberg, autores como Alhaji *et al.* (2019), Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016), Mousa *et al.* (2017) e Taha *et al.* (2002), verificaram que os resíduos de fresagem utilizados em suas pesquisas eram não plásticos, o que é coerente com a característica granular apresentada pelo material. Assim, é de se esperar que o resíduo de fresagem venha a reduzir a plasticidade das misturas, como foi verificado por Mahasneh (2016), que misturou o resíduo com uma argila siltosa, e Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016), que misturaram o resíduo com um solo de baixa plasticidade. Os autores verificaram que os limites de liquidez (LL) e os índices de plasticidade (IP) das misturas diminuíram com o aumento do teor de resíduo de fresagem. Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) chegaram a obter misturas não plásticas para misturas com teores de resíduo a partir de 50%.

### 2.3.2.2 Compactação

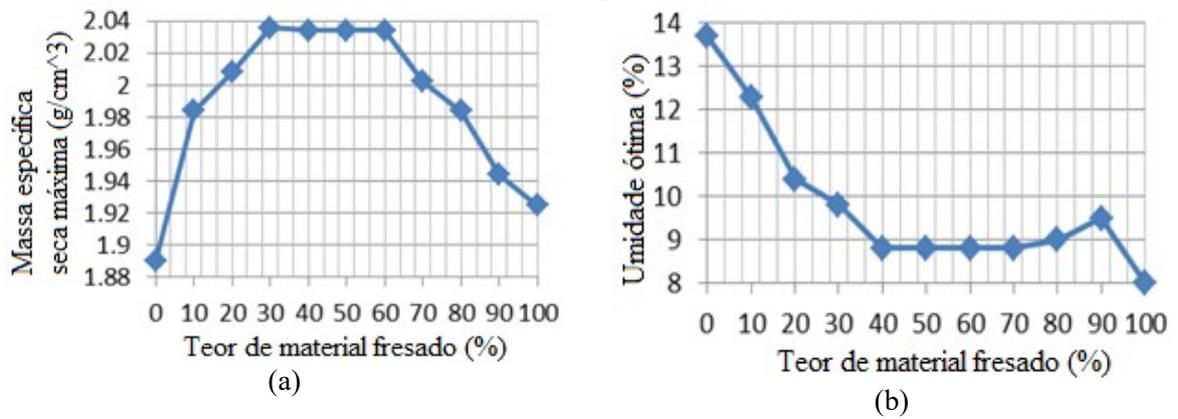
Com relação aos resultados de compactação, Alhaji e Alhassan (2018), utilizando a energia modificada para o ensaio, verificaram um aumento na massa específica seca máxima das misturas BCS e material fresado com o aumento do teor de material fresado até um percentual de 30%. A partir daí, verificou-se um decréscimo da massa específica seca máxima das misturas com o aumento do teor de material fresado. Atribuíram a ocorrência à densidade dos materiais, uma vez que, enquanto o agregado do material fresado tende a aumentar a massa específica máxima seca da mistura, o betume tende a diminuir. Até um teor de 30% de material fresado na mistura, o efeito do alto peso específico do agregado predomina. A partir de então, a baixa massa específica do betume se torna substancial. Ainda, confrontando os resultados obtidos com imagens de microscópio eletrônica de varredura (MEV), percebeu-se que o intertravamento observado para as misturas com 30% de material fresado também justifica o fato de a maior massa específica seca máxima se dar nessa proporção.

Com relação à umidade ótima, Alhaji e Alhassan (2018) verificaram que a umidade ótima das misturas diminuiu com o aumento do teor de material fresado até 40%, permanecendo praticamente constante até um teor de 70% de material fresado, aumentando até 90% de material fresado e tornando a cair para 100% de material fresado. Como, na pesquisa, o material fresado foi aquecido antes de ser misturado ao solo, a queda inicial na umidade ótima até um teor de 40% de material fresado foi justificada pelo aumento da cobertura do BCS pelo betume.

A partir de 40% de material fresado, toda a argila estaria coberta por betume e, por isso, o valor da umidade ótima permanece praticamente constante até o teor de 70% de material fresado. O aumento da umidade ótima a partir daí foi justificada por uma possível queda na qualidade da graduação da mistura.

A Figura 5 mostra a variação dos parâmetros de compactação em relação ao teor de material fresado misturado à argila utilizada na pesquisa de Alhaji e Alhassan (2018). A Figura 5 (a) apresenta a variação da massa específica seca máxima em relação ao teor de material fresado das misturas, enquanto a Figura 5 (b) apresenta a variação do teor de umidade ótima.

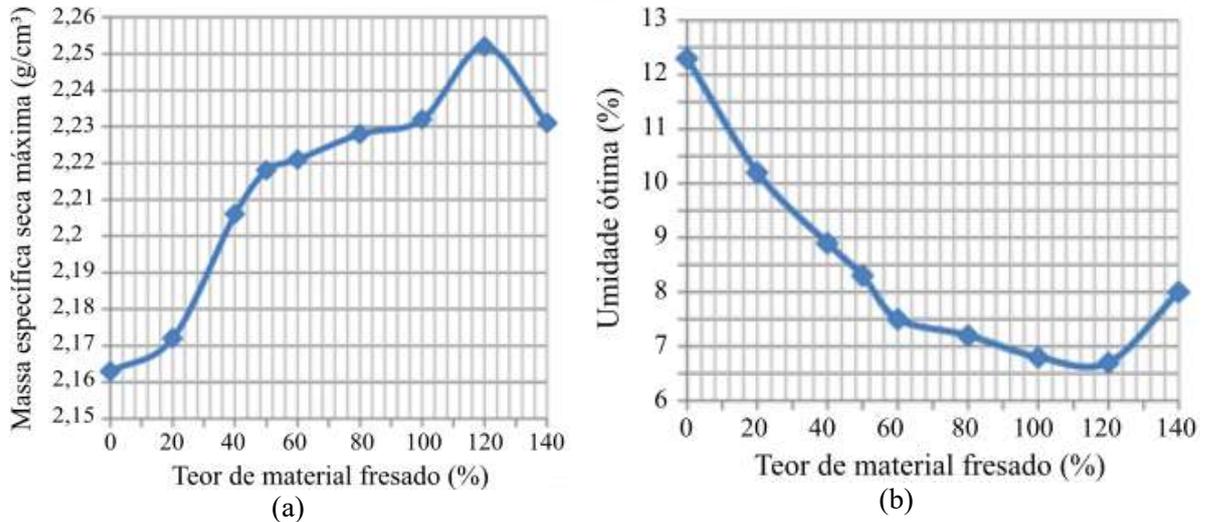
Figura 5: Variação dos parâmetros de compactação com o teor de material fresado.



Fonte: Extraído de Alhaji e Alhassan (2018)

Nos estudos com uma argila laterítica altamente plástica e material fresado, Alhaji *et al.* (2019) observaram uma tendência de aumento da massa específica seca máxima com o aumento do teor de material fresado até 120% por massa de solo. Também foi verificada diminuição da umidade ótima até o mesmo teor de fresado. A Figura 6 mostra a variação para ambos os parâmetros da compactação.

Figura 6: Variação dos parâmetros de compactação: (a) massa específica seca máxima e (b) umidade ótima.



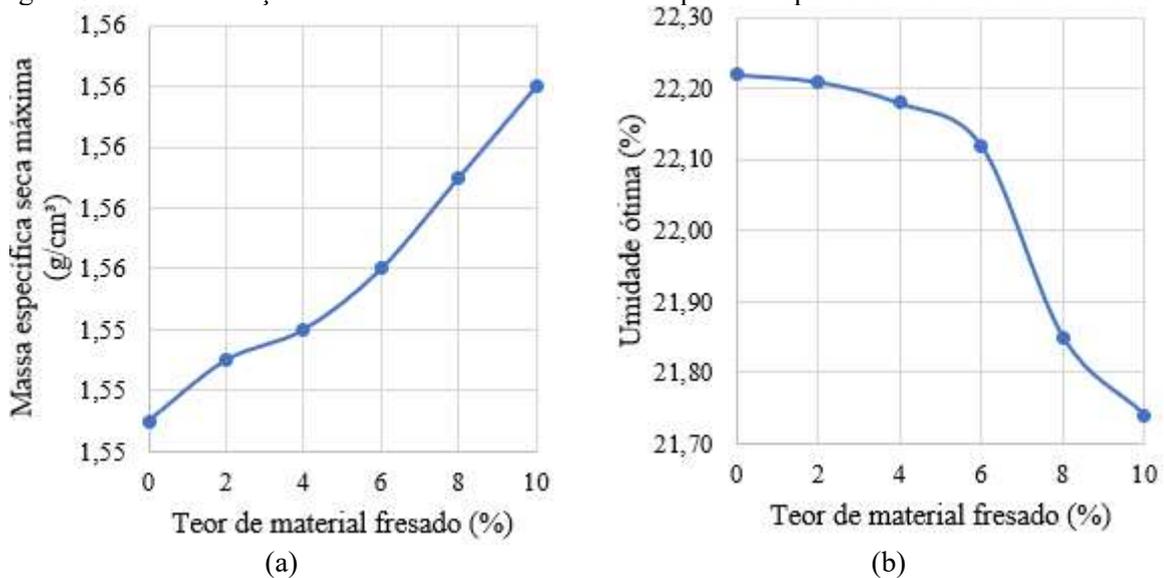
Fonte: Extraído de Alhaji *et al.* (2019)

Segundo os autores, o aumento do teor de resíduo de fresagem melhorou a graduação do solo, o que provocou um aumento na massa específica da mistura. Porém, o aumento da quantidade de material fresado além de 120% resultou na criação de novos vazios, o que reduziu a massa específica. Para a umidade ótima, a redução se deve à diminuição da quantidade de solo laterítico, que contém um alto teor de finos, e ao aumento da quantidade de material fresado, que apresenta pouca ou nenhuma absorção de água. Já o aumento observado a partir dos 120%, foi justificado pela criação de novos poros pelo excesso de material fresado.

Ruknuddin *et al.* (2019) elaboraram misturas contendo solo de subleito mais granular e não plástico e teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de material fresado. Utilizando-se do ensaio de compactação com energia modificada, a princípio, foi observada uma queda da massa específica seca máxima de 1,92 g/cm<sup>3</sup>, correspondente ao solo puro, para 1,79 g/cm<sup>3</sup>, correspondente à mistura contendo 5% de material fresado. Após, verificou-se um aumento da massa específica seca máxima até 1,95 g/cm<sup>3</sup>, correspondente à mistura com 25% de material fresado. Os autores atribuíram a causa da redução inicial à variação de volume.

Mahasneh (2016) verificou que, utilizando-se de compactação na energia normal, ao aumentar a quantidade de material fresado adicionado à argila siltosa com comportamento expansivo, houve um aumento da massa específica seca máxima e uma diminuição na umidade ótima das misturas. Tal fato foi atribuído à boa distribuição de grãos apresentada pelo material fresado e à sua baixa absorção, o que se traduz em um aprimoramento da capacidade de compactação da mistura. A Figura 7 apresenta o efeito da adição de material fresado na massa específica aparente seca (a) e na umidade ótima (b).

Figura 7: Efeito da adição de material fresado na massa específica aparente seca e na umidade ótima



Fonte: Extraído de Mahasneh (2016)

Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) verificaram que o aumento do teor de material fresado nas misturas com solo de subleito mais granular e de baixa plasticidade provocou um aumento na massa específica seca máxima e uma diminuição na umidade ótima no ensaio compactado com a energia modificada. Com relação à diminuição da umidade ótima, afirmou ser esperado, uma vez que o aumento da quantidade de resíduo de fresagem provoca uma diminuição da fração de finos.

A Tabela 7, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de compactação, realizado com a energia do Proctor modificado, obtidos por Moura *et al.* (2018) ao estudarem a estabilização de um solo A-4 com material fresado e cimento Portland. Os autores verificaram redução considerável na umidade ótima para as misturas, em relação à observada para o solo puro. Além disso, verificaram aumento na massa específica seca máxima para as misturas contendo 2% de cimento, o que não ocorreu para as misturas contendo 4% de cimento.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de compactação

<b>Amostra</b>	<b>Teor de umidade ótimo (%)</b>	<b>Massa específica seca máxima (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Solo	12,81	1,91
Material fresado	6,20	1,78
50% MF + 2% CP	10,00	1,97
50% MF + 4% CP	9,80	1,86
70% MF + 2% CP	7,50	1,98
70% MF + 4% CP	7,40	1,91

MF – Material fresado; CP – Cimento Portland

Fonte: Extraído de Moura *et al.* (2018)

O efeito da incorporação de resíduo de fresagem em misturas com o solo é influenciado pelas características desses materiais, em especial suas granulometrias e plasticidade do solo. De modo geral, até certa proporção, que depende dos materiais envolvidos, a presença do resíduo de fresagem melhorou as características das misturas, ou seja, provocou aumento das massas específicas secas máximas e redução no teor de umidade ótima. Ultrapassada essa proporção, verifica-se uma queda na qualidade das misturas causada pela queda na qualidade da graduação, que provoca o surgimento de novos vazios.

De uma análise superficial, infere-se que faz mais sentido utilizar o resíduo de fresagem, que é um material mais grosso, para estabilizar solos mais finos, fazendo com que os vazios entre os grãos mais grossos das misturas sejam preenchidos por grãos mais finos. No entanto, também foram verificados resultados positivos em estudos que envolveram misturas com solo mais granular, como as pesquisas de Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) e Ruknuddin *et al.* (2019).

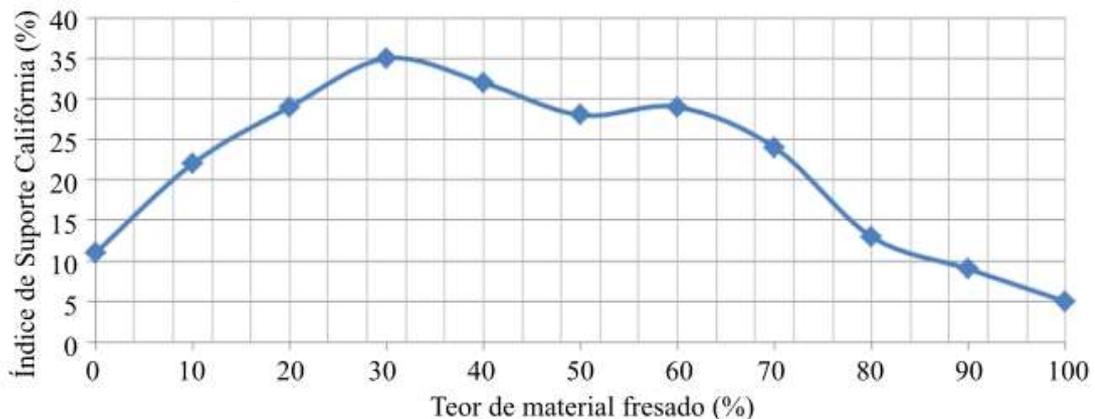
Outra informação importante que se pode extrair dos estudos mencionados é que a maioria dos autores optou por utilizar a energia modificada, a maior prevista nos normativos, nos

ensaios de compactação. Sabe-se que a aplicação de energias maiores resulta em massas específicas secas máximas maiores e umidades ótimas reduzidas. Isso explicaria a diferença de resultados obtidos para o solo puro utilizado por Mahasneh (2016) e Alhaji e Alhassan (2018). Os solos utilizados nas duas pesquisas receberam a mesma classificação segundo a metodologia AASHTO, A-7-6, mas, comparando os resultados de compactação para o solo puro, percebe-se uma grande diferença. Mahasneh (2016), que fez uso da energia normal no seu estudo, obteve, para o solo puro, massa específica seca máxima igual a  $1,58 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 22,22%, enquanto Alhaji e Alhassan (2018), que lançaram mão da energia modificada, obtiveram, para o solo puro, massa específica seca máxima igual a  $1,890 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 13,7%

### 2.3.2.3 Índice de Suporte Califórnia

A Figura 8 mostra a variação do ISC com o teor de material fresado apresentado por Alhaji e Alhassan (2018). O aumento inicial do ISC foi justificado pela introdução de agregados do resíduo de fresagem na argila classificada como A-7-6, o que melhorou a granulometria da mistura. Os autores analisaram imagens de MEV e verificaram que a mistura com 30% de material fresado mostrou um mínimo de fissuras e máximo intertravamento, o que foi tomado como justificativa para o maior valor de ISC. Uma vez que o ISC da mistura contendo 30% de material fresado compactada na energia modificada foi igual a 35%, valor acima do mínimo recomendado pela *Nigeria General Specification for Roads and Bridge Works* (1997) para sub-base granular em pavimentos de baixo tráfego, os autores concluíram que essa é a mistura ótima para estabilização do BCS. Ressalta-se que os corpos de provas permaneceram imersos em água por apenas 48 horas.

Figura 8: Variação no ISC com o teor de material fresado.



Fonte: Extraído de Alhaji e Alhassan (2018)

Ruknuddin *et al.* (2019), em seu estudo sobre estabilização de solo de subleito, mais granular e não plástico, com material fresado, verificaram que a resistência dada pelo ISC aumentou com o aumento do teor de material fresado das misturas, resultando em maior estabilidade, conforme pode ser observado na Tabela 8, a seguir.

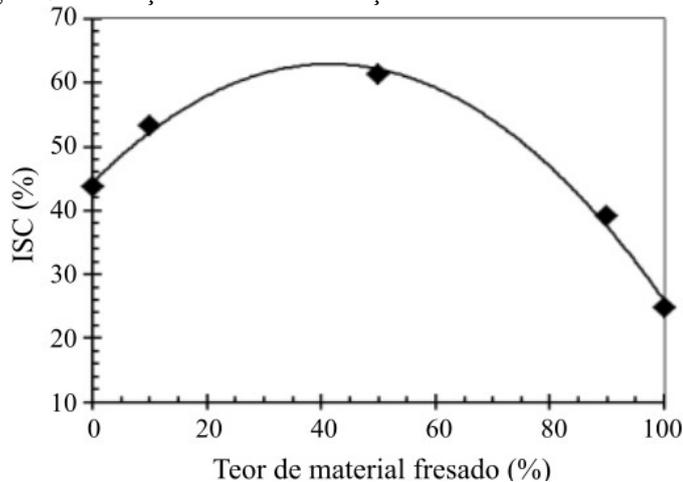
Tabela 8: Resultados de ensaios de ISC para misturas de solo e diferentes teores de material fresado

Características	ISC para penetração de 2,5 mm (%)	ISC para penetração de 5 mm (%)	ISC para penetração de 7,5 mm (%)	ISC para penetração de 10 mm (%)
<b>Solo de subleito + 0% Material fresado</b>	2,8	4,81	6,91	8,14
<b>Solo de subleito + 5% Material fresado</b>	5,6	8,55	10,89	12,46
<b>Solo de subleito + 10% Material fresado</b>	7,01	11,11	14,15	16,17
<b>Solo de subleito + 15% Material fresado</b>	8,24	13,37	16,75	31,47
<b>Solo de subleito + 20% Material fresado</b>	9,47	15,48	18,51	21,75
<b>Solo de subleito + 25% Material fresado</b>	9,84	15,87	20,37	23,02

Fonte: Extraído de Ruknuddin *et al.* (2019)

Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) verificaram que, ao misturar material fresado e solo de subleito mais granular e de baixa plasticidade, a capacidade de suporte das misturas aumentou até a proporção de 50%/50%. A partir daí, o ISC diminuiu a medida em que se aumentou o teor de resíduo de fresagem. O máximo ISC encontrado foi igual a 61,2% e correspondeu à mistura contendo 50% de material fresado. A Figura 9 apresenta a variação do ISC em relação ao teor de material fresado obtida pelos autores.

Figura 9: Variação do ISC em relação ao teor de material fresado



Fonte: Extraído de Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016)

Os pesquisadores Araújo Júnior, Ferreira e Silva (2018), analisando misturas de areia A-2-4 e resíduo de fresagem até o teor de 50%, obtiveram valores de ISC sempre crescentes com o

aumento do teor de resíduo de fresagem, partindo de ISC igual a 45% para o solo puro e chegando a ISC de 70% para misturas contendo solo e 50% de resíduo de fresagem. Também verificaram redução a expansão com o aumento do resíduo de fresagem de 0,04% para o solo puro até 0,01% para a mistura contendo 50% de resíduo de fresagem, sendo que as misturas contendo 10%, 20%, 30% apresentaram a mesma expansão.

Por outro lado, Seferoglu, Seferoglu e Akpinar (2018), ao misturarem agregados virgens e resíduo de fresagem em proporções de 0% a 100%, incrementadas em 10%, verificaram queda no ISC das misturas compactadas com a energia modificada com o aumento do teor de resíduo de fresagem. Os agregados virgens puros apresentaram ISC de 178%, enquanto o resíduo de fresagem puro apresentou ISC de 68%.

Ghanizadeh, Rahrovan e Bafgui (2018) submeteram misturas de areia argilosa mal graduada, resíduo de fresagem, além de misturas de pedregulho argiloso bem graduado e resíduo de fresagem a ensaios de ISC. Os teores de resíduo de fresagem variaram de 0% a 60%, com incrementos de 20%. Os autores também verificaram queda no ISC com o aumento do teor de resíduo de fresagem para os dois tipos de solo.

A Tabela 9, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de ISC, realizado amostras compactadas com a energia do Proctor modificado, obtidos por Moura *et al.* (2018) ao estudarem a estabilização de um solo A-4 com material fresado e cimento Portland. Verificou-se que as misturas tratadas com cimento apresentaram aumento relevante de resistência à penetração em comparação ao solo, sendo a mistura contendo 50% de material fresado e 4% de cimento a que apresentou maior ganho.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de ISC

<b>Amostra</b>	<b>ISC (%)</b>	<b>Expansão (%)</b>
Solo	20,20	0,05
Material fresado	15,00	0,00
50% MF + 2% CP	97,10	0,00
50% MF + 4% CP	117,10	0,00
70% MF + 2% CP	83,50	0,00
70% MF + 4% CP	84,50	0,00

MF – Material fresado; CP – Cimento Portland

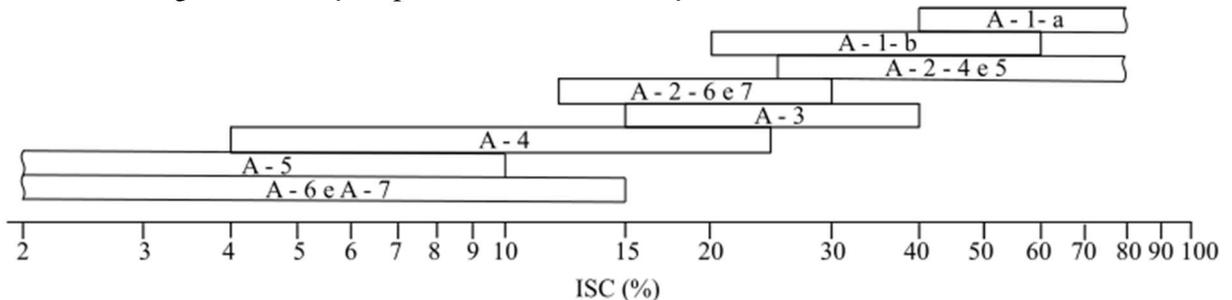
Fonte: Extraído de Moura *et al.* (2018)

Alhaji *et al.* (2019) submeteu amostras de solo laterítico A-6 e misturas solo/120% de material fresado e solo/120% de material fresado/2% de cimento a ensaios de ISC. Para o solo puro obtiveram ISC igual a 22%, enquanto as misturas solo/120% de material fresado e solo/120% de material fresado/2% de cimento apresentaram ISC de 37% e 118%, respectivamente. A mistura solo/120% de material fresado/2% de cimento foi curada por sete dias antes de ser ensaiada. Observa-se um aumento significativo expressivo no valor da

capacidade de suporte quando há presença do cimento. Os autores citam que, de acordo com a *Nigeria General Specification for Roads and Bridge Works*, o solo laterítico apenas poderia ser utilizado como material de subleito; a mistura contendo 120% de material fresado e solo laterítico poderia apenas ser utilizado como material de sub-base; e a mistura contendo 120% material fresado, solo laterítico e 2% de cimento poderia ser utilizada tanto como material de sub-base, quanto como material de base.

Em geral, os valores de ISC para solos argilosos são baixos e aumentam com o aumento da fração granular do solo, de forma que solos mais grosseiros e bem graduados podem apresentar valores de ISC elevados. Liu (1967) apresenta um resumo da relação aproximada dos tipos de solos classificados segundo a metodologia AASHTO com o ISC esperado, que foi extraído e reproduzido na Figura 10.

Figura 10: Relação aproximada da classificação de solos AASHTO com o ISC



Fonte: Extraído de Liu (1967)

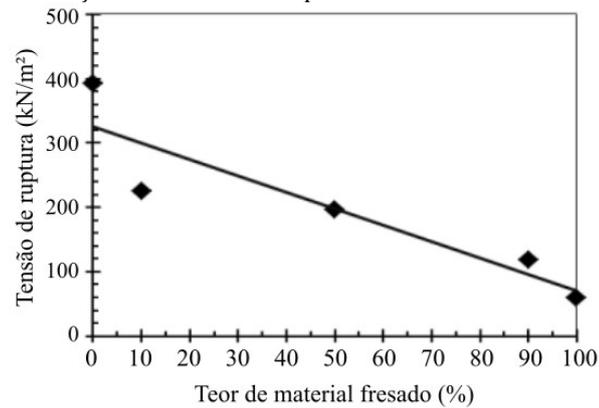
Com base nos resultados obtidos pelos autores citados, pode-se afirmar que os ISC das misturas de solo com resíduo de fresagem é dependente do entrosamento dos grãos desses materiais. Por ser um material de característica grosseira, é mais provável que a incorporação de resíduo de fresagem apresente maiores benefícios para misturas com solos mais finos e plásticos, sendo que, até para esses casos, existe um teor que limita a obtenção de resultados cada vez melhores, a partir do qual se passa a ter um desequilíbrio granulométrico e o ISC volta a cair.

Já a adição de cimento, como esperado, provoca grandes aumentos no ISC das misturas devido à hidratação do cimento que eleva a rigidez e a resistência das misturas.

#### 2.3.2.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) estudaram o comportamento tensão-deformação e determinaram o módulo de elasticidade de misturas contendo material fresado e solo de subleito granular de baixa plasticidade. Assim, verificaram que a tensão de ruptura decresceu com o aumento do teor de material fresado, conforme se verifica na Figura 11.

Figura 11: Variação da tensão de ruptura com o teor de material fresado



Fonte: Extraído de Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016)

Ainda, Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) verificaram que a deformação na ruptura não apresentou uma tendência definida e associaram esse comportamento à variação da granulometria das misturas provocada pela variação do teor de material fresado. No que diz respeito ao módulo de elasticidade, observou-se que os valores decresceram para o aumento do teor de material fresado, sendo esse comportamento compatível com a tendência de diminuição da tensão de ruptura.

Maciel *et al.* (2018), que analisaram misturas compactadas com a energia modificada de solo siltoso moderadamente plástico com 50% e 70% de resíduo de fresagem melhoradas com 2%, 4% e 5% de cimento através de ensaios de RCS, obtiveram os resultados apresentados na Tabela 10. Percebe-se que, para mesmos teores de cimento, o aumento do teor de fresado de 50% para 70% acarretou aumento da resistência aos sete dias. No entanto, ainda se trata de valores considerados baixos e que não atendem ao requisito mínimo de resistência, igual a 2,1 MPa, para uso como base de solo-cimento estabelecido pelo DNIT na norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c), por exemplo. Ressalta-se que na pesquisa o resíduo de fresagem teve sua granulometria manipulada com o objetivo de reduzir sua heterogeneidade e que os corpos de prova não foram imersos em água antes da realização dos ensaios.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de RCS obtidos por Maciel et al. (2018)

Material	RCS (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Solo	0,37	0,06	16,21
Solo 50%MF+2% cimento	0,27	0,06	22,22
Solo 50%MF+4% cimento	0,43	0,03	6,98
Solo 50%MF+5% cimento	0,52	0,1	28,85
Solo 70%MF+2% cimento	0,35	0,06	17,14
Solo 70%MF+4% cimento	0,65	0,02	3,08
Solo 70%MF+5% cimento	0,86	0,04	4,65

MF – Material fresado

Fonte: Extraído de Maciel *et al.* (2018)

Oliveira (2018), no entanto, ao submeter corpos de prova compostos de 65% de cascalho, 32% de resíduo de fresagem e 3% de cimento, compactados com a energia modificada, ao ensaio de RCS, conseguiu alcançar valores iguais a 2,14 MPa para idade de três dias e 2,70 MPa para idade de sete dias. O autor atribuiu o sucesso da mistura à predominância da areia no cascalho, que facilitou a interação entre o cimento e as partículas do solo e pela participação do resíduo de fresagem que ficou abaixo de 50%.

Fedrico (2015) também conseguiu alcançar resultados satisfatórios ao ensaiar misturas de brita graduada simples com 20% e 50% de resíduo de fresagem e adição de 2% e 4% de cimento. Para corpos de prova compactados com a energia modificada, foram obtidas resistências iguais a 2,33 MPa, para misturas contendo 20% de resíduo de fresagem e 2% de cimento, 3,35 MPa, para misturas contendo 20% de resíduo de fresagem e 4% de cimento, e 2,61 MPa, para misturas contendo 50% de resíduo de fresagem e 4% de cimento, por exemplo. No entanto, as misturas não foram imersas em água antes dos ensaios. O autor verificou que o acréscimo de resíduo de fresagem de 20% para 50% gerou redução na RCS e percebeu que a resistência aumentou com a utilização de uma energia de compactação maior e com o acréscimo do teor de cimento. Ainda, citou que misturas recicladas com outros materiais de base poderiam apresentar menores resistências.

Ghanizadeh, Rahrovan e Bafgui (2018) analisaram a RCS de misturas de areia argilosa mal graduada, resíduo de fresagem e cimento, além de misturas de pedregulho argiloso bem graduado, resíduo de fresagem e cimento. Os corpos de prova foram compactados com a energia modificada. A mistura contendo 20% de areia argilosa mal graduada, e 3% de cimento alcançou resistência aos sete dias igual a 2,55 MPa e a mistura contendo 20% de pedregulho argiloso bem graduado alcançou resistência aos sete dias igual a 3,43 MPa. Os autores também verificaram que a RCS aumentou com o incremento do teor de cimento, ao tempo em que o aumento do teor de resíduo de fresagem provocou uma redução na resistência à compressão simples. A redução da resistência com o aumento do teor de resíduo de fresagem foi justificada pela redução do atrito entre as partículas provocada pela presença do betume.

Kasu, Manupati e Muppireddy (2020), ao analisarem o comportamento de misturas de agregados virgens, resíduo de fresagem e cimento, também verificaram redução na RCS com o aumento do teor de resíduo de fresagem. Segundo os autores, isto pode ter ocorrido devido à capa de asfalto do resíduo que faz com que as misturas apresentem baixa resistência na região entre a partícula do resíduo e a pasta de cimento, chamada zona de transição. No entanto, em análise das interações químicas do cimento Portland com o asfalto de resíduo de fresagem, Brand e Roesler (2017) verificaram que, embora a porosidade da zona de transição facilite a

iniciação da fratura, a maioria das falhas se propagam pela capa de asfalto, sugerindo que a coesão do asfalto é mais fraca que a adesão entre o asfalto e a pasta de cimento. Este fator poderia explicar a tendência a se obter menores RCS para maiores teores de resíduo de fresagem.

Embora haja certa variabilidade nos resultados encontrados pelos diversos autores, percebe-se uma tendência a se obter melhores resultados de resistência a compressão simples quando o resíduo de fresado é misturado com materiais mais granulares e a mistura é estabilizada com cimento. Ainda, há uma propensão à redução da resistência com o aumento do resíduo de fresagem, sendo verificada maior eficiência das misturas quando estas contêm menos de 50% de resíduo de fresagem. O teor de resíduo de fresagem igual a 50% aparenta ser um teor crítico, sendo, inclusive, recomendado pelo DNIT (2013) que, na reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland, a participação do revestimento asfáltico deve ser limitada em 50%, em massa, da mistura reciclada seca.

#### 2.3.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

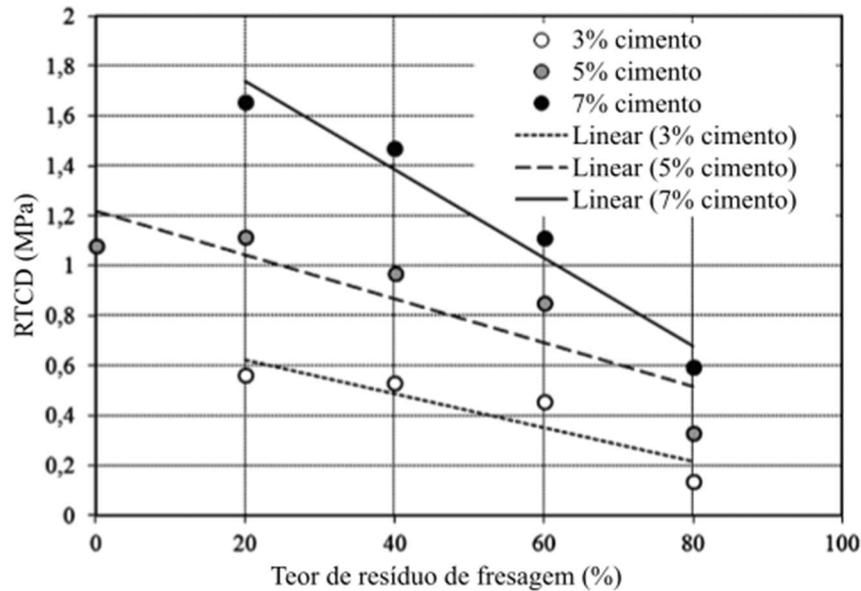
Oliveira (2018), ao submeter corpos de prova de misturas contendo 33% de resíduo de fresagem, 67% de cascalho laterítico e 3% de cimento, compactados com a energia modificada, ao ensaio de RTCD, obteve resistências iguais a 0,29 MPa, 0,37 MPa e 0,55 MPa para as idades de três, sete e 28 dias, respectivamente. Julgou que a mistura apresentou um bom desempenho, enfatizando que a RTCD recebeu forte influência da interação entre o cimento e as partículas de cascalho e que a limitação da quantidade de resíduo de fresagem até 33% da mistura contribuiu para o bom desempenho.

Fedrico (2015) obteve valores de RTCD para corpos de prova de misturas brita graduada simples (BGS), 20% e 50% de resíduo de fresagem e 2% e 4% de cimento, compactados com a energia modificada, que variaram entre 0,42 MPa a 0,90 MPa na idade de sete dias, valores que considerou elevados. Verificou que o acréscimo de material fresado na mistura gerou redução na resistência à tração e que o aumento do teor de cimento e a utilização de energia de compactação maior aumentaram a resistência.

Dokovic *et al.* (2019), ao estudarem misturas de agregados de pedra britada, resíduo de fresagem e cimento, verificaram, assim como Fedrico (2015), que o aumento no teor de resíduo de fresagem provoca uma redução na resistência à tração por compressão diametral, ao passo que o aumento do teor de cimento colabora com o aumento da resistência. A Figura 12 apresenta

os resultados de RTCD obtidos pelos autores para misturas com diferentes teores de fresagem e idade de 28 dias.

Figura 12: RTCD para diferentes teores de resíduo de fresagem após 28 dias



Fonte: Dokovic *et al.* (2019)

Trichês *et al.* (2013) afirmaram que a determinação da RTCD avaliada com corpos de prova moldados no equipamento Marshall apresenta grande potencial para determinação da resistência de misturas recicladas com adição de cimento. Para misturas contendo 30% de resíduo de fresagem, 70% de brita graduada e teores de cimento iguais a 2%, 3% e 4%, obtiveram valores de RTCD aos sete dias iguais a 0,22 MPa, 0,31 MPa e 0,57 MPa, respectivamente.

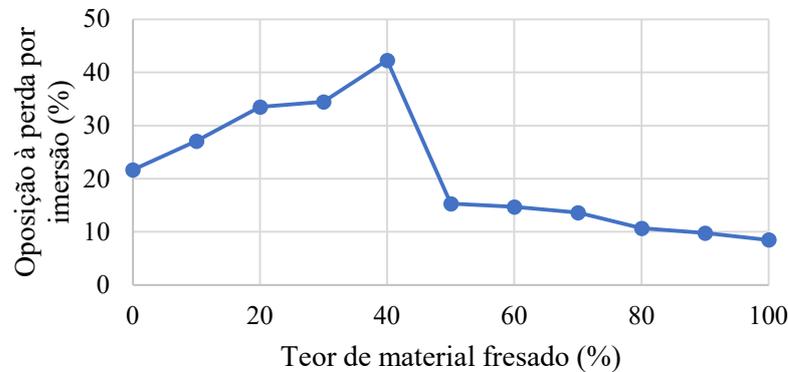
Considerando os estudos citados, verifica-se que, assim como ocorre para a resistência à compressão simples, o aumento no teor de resíduo de fresagem das misturas contendo cimento tende a diminuir suas resistências à tração. No entanto, para misturas com solos finos é coerente esperar algum ganho de resistência com a introdução do resíduo de fresagem, material granular, devido a melhorias na granulometria que acarreta melhor entrosamento dos grãos.

### 2.3.2.6 Durabilidade

A Figura 13 mostra, graficamente, os dados obtidos por Alhaji e Alhassan (2018) ao determinar o que foi chamado de oposição à perda de resistência por imersão dos corpos de prova em água, dada pela razão entre a resistência à compressão simples dos corpos de prova imersos e a resistência à compressão simples dos corpos de prova não imersos. Os autores

verificaram que a máxima durabilidade, 42,3%, ocorreu para 40% de material fresado. Vale ressaltar que não foi utilizado agente químico, como cimento, para estabilizar as misturas.

Figura 13: Variação da durabilidade através da perda de resistência por imersão



Fonte: Extraído de Alhaji e Alhassan (2018)

Kasu, Manupati e Muppireddy (2020) avaliaram a durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem de misturas contendo agregados virgens, resíduo de fresagem e cimento compactadas com a energia modificada. Foram realizadas misturas contendo 0%, 20%, 40% e 60% de resíduo de fresagem e 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de cimento. A perda de massa das misturas variou entre 2,48% e 8,36% e os autores verificaram que o aumento do teor de resíduo de fresagem aumentava a perda de massa da mistura.

Avirneni, Peddinti e Saride (2016) analisaram a durabilidade de misturas de resíduo de fresagem em altos teores (60% e 80%) com agregados virgens estabilizadas com cinza volante e hidróxido de sódio compactadas com a energia modificada e em idades de 28 dias. Os autores verificaram que a maior parte da superfície exposta dos corpos de prova submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem consistia em resíduo de fresagem, indicando que a perda de massa ocorreu principalmente na interface entre o resíduo de fresagem e o estabilizante e, conseqüentemente, que a cimentação entre a capa de asfalto do resíduo e o agente estabilizante é fraca. Assim como Kasu, Manupati e Muppireddy (2020), observaram que para maior teor de resíduo de fresagem nas misturas, havia perdas de massa relativamente maiores, mas ainda dentro dos limites aceitáveis. Segundo os autores, o asfalto envelhecido do resíduo de fresagem atrapalha as reações pozolânicas das misturas.

Percebe-se que a presença de resíduo de fresagem nas misturas com agregados virgens tende a aumentar a perda de massa das misturas estabilizadas quimicamente devido à capa de asfalto que envolve seus agregados, apesar de as perdas de massa ainda serem baixas. No entanto, os estudos realizados por Avirneni, Peddinti e Saride (2016) e Kasu, Manupati e Muppireddy (2020) não envolveram misturas de resíduo de fresagem com solos mais finos e, portanto, não se pode afirmar que o comportamento observado seria semelhante.

A durabilidade avaliada por Alhaji e Alhassan (2018) difere das avaliadas por Avirneni, Peddinti e Saride (2016) e Kasu, Manupati e Muppireddy (2020) pelo fato de as misturas terem sido realizadas com solo fino e resíduo de fresagem não estabilizadas quimicamente. Observa-se que nesse caso, embora a metodologia para avaliação da durabilidade tenha sido diferente, a adição de resíduo de fresagem até o teor de 40% melhorou a durabilidade das misturas com solo argiloso e plástico.

Para misturas com solos finos é coerente esperar algum ganho na durabilidade com a introdução do resíduo de fresagem que, até certa proporção, provocaria um maior entrosamento dos grãos, cujos benefícios poderiam sobrepor os malefícios da presença da capa de asfalto do resíduo.

#### 2.3.2.7 Permeabilidade

Seferoglu, Seferoglu e Akpınar (2018), ao analisarem misturas, compactadas com a energia modificada, de agregados virgens e resíduo de fresagem em teores de 0% a 100%, com incrementos de 10%, verificaram que o coeficiente de permeabilidade reduziu com o aumento do teor de resíduo de fresagem das misturas. Segundo os autores, esta redução pode estar relacionada a capacidade do asfalto do resíduo de fresagem em formar uma ligação entre as partículas. O agregado virgem puro apresentou coeficiente de permeabilidade igual a  $1,6 \times 10^{-2}$ , mais permeável que o resíduo de fresagem puro, que apresentou coeficiente de permeabilidade igual a  $9,9 \times 10^{-3}$ .

Da mesma forma, Mousa *et al.* (2017), que estudaram misturas de resíduo de fresagem em teores de 0% a 100%, com incrementos de 20%, e agregados virgens, compactadas com a energia modificada, verificaram que o coeficiente de permeabilidade das misturas reduziu com o aumento do teor de resíduo de fresagem, concluindo que a incorporação de resíduo de fresagem nas misturas resultou em diminuição da porosidade das amostras. Neste caso, o agregado virgem puro apresentou coeficiente de permeabilidade igual a  $1,917 \times 10^{-1}$ , mais permeável que o resíduo de fresagem puro, que apresentou coeficiente de permeabilidade igual a  $5,57 \times 10^{-3}$ .

Tem-se que materiais mais granulares apresentarão coeficientes de permeabilidades mais altos que materiais finos. As Tabelas 11 e 12 apresentam valores de referência para o coeficiente de permeabilidade de diferentes solos segundo Das e Sobhan (2019) e Vargas (1978).

Tabela 11: Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados

Tipo de solo	k (cm/s)
Pedregulho limpo	100 - 1,0
Areia grossa	1,0 - 0,01
Areia fina	0,01 - 0,001
Argila com silte	0,001 - 0,00001
Argila	< 0,000001

Fonte: Das e Sobhan (2019)

Tabela 12: Classes de solos quanto a permeabilidade

Classe	Grau de permeabilidade	Tipos de solos	k a 20 °C (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-1}$
	Média	Areias	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
	Baixa	Siltes e Argilas	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argilas	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
	Baixíssima	Argilas	$< 10^{-7}$

Fonte: Vargas (1978)

Os autores Seferoglu, Seferoglu e Akpinar (2018) e Mousa *et al.* (2017) verificaram reduções nos coeficientes de permeabilidade das misturas estudadas com o aumento do teor de resíduo de fresagem. No entanto, em ambas as pesquisas, o resíduo de fresagem foi misturado com materiais grossos e mais permeáveis que ele próprio. Ao se incorporar resíduo de fresagem em solos finos o esperado é que haja um aumento do coeficiente de permeabilidade das misturas com o aumento do teor de resíduo, dado que a permeabilidade de solos finos é baixa e a adição de material mais granular aumentaria os vazios das misturas.

## 2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo natural é um material heterogêneo, complexo e variável. Por esse motivo, é comum encontrar, em determinado local, um solo que não atenda às especificações de Engenharia requeridas para o que se pretende construir. Nessa situação, o engenheiro pode seguir por três caminhos diferentes: (a) aceitar o material como ele é e adequar seu projeto; (b) remover o material inadequado, substituindo-o por outro que atenda aos requisitos necessários; (c) alterar as propriedades do solo existente de modo que atenda às necessidades de projeto. A alteração das propriedades do solo para que atenda a determinadas especificações de engenharia é o que se conhece por estabilização (INGLES; METCALF, 1972).

Segundo Karol (2003), em determinadas situações, a estabilização de solos pode ser a única alternativa viável, uma vez que:

- a) adaptar o projeto às condições de um solo pobre pode, em algumas ocasiões, prejudicar o propósito da estrutura;
- b) a remoção de grandes volumes de solo inadequado pode ser economicamente inviável para depósitos profundos;
- c) terrenos que apresentem solo adequado ao uso que se pretende podem ser cada vez mais difíceis de encontrar.

Mahasneh (2016) define a estabilização de solos como a alteração de uma ou mais propriedades do solo, com o objetivo de melhorar suas características e seu comportamento do ponto de vista da Engenharia.

Para saber o potencial de estabilização do solo, determinar o quanto é necessário melhorá-lo e mensurar os resultados da estabilização, é necessário saber, previamente, as propriedades do solo que se pretende modificar (KAROL, 2003). Ingles e Metcalf (1972) assinalam que as principais propriedades do solo que se busca melhorar através da estabilização são variação volumétrica (expansão e contração), resistência, permeabilidade e durabilidade.

Segundo Bowles (1997), são reportados, na literatura, muitos métodos para melhoramento das propriedades do solo, sendo possível utilizar, simultaneamente, mais de um método para alcançar o resultado desejado. Ingles e Metcalf (1972) explicam que as propriedades dos solos podem ser alteradas por meios químicos, mecânicos, térmicos, entre outros. A escolha do agente estabilizante é baseada no número e tipo de solo nos quais sua utilização se mostrou efetiva para estabilização, uma vez que cada tipo de solo reage de forma diferente a determinada forma de estabilização.

Dentre os métodos de estabilização, destaca-se a estabilização química e a estabilização mecânica. Segundo Bowles (1997), na estabilização mecânica, processos de compactação e correção granulométrica são utilizados com o objetivo de reduzir os vazios do solo. Ingles e Metcalf (1972) citam que, quando não se consegue obter um material mecanicamente estável ou é necessário elevar sua capacidade de suporte ou sua resistência à ação da água, pode-se lançar mão de estabilizantes químicos, como cimento, cal, material betuminoso ou outros aditivos. Dentre eles, o uso de cimento é o mais comum.

#### **2.4.1 Estabilização mecânica**

De forma simplificada, pode-se dizer que o solo é um sistema composto por partículas minerais sólidas, água e ar. A compactação tem por objetivo expulsar o ar desse sistema, tornando-o mais denso. Por outro lado, conforme esclarecem Ingles e Metcalf (1972), para se

obter um material denso e resistente, é necessário que os vazios entre os grãos maiores sejam preenchidos por grãos menores, de forma que o espaço disponível para o ar e a água seja mínimo, e, nesse contexto, surge a estabilização granulométrica.

Segundo Murthy (2003), o teor de umidade afeta o comportamento do solo. A um teor de umidade baixo, é difícil comprimir o solo e, portanto, observa-se uma densidade baixa e grande quantidade de vazios. À medida que se aumenta o teor de umidade, verifica-se uma melhoria na trabalhabilidade do solo, uma vez que a água atua como lubrificante entre as partículas. A massa de solo, então, se mostra mais densa quando compactada. No entanto, para altos teores de umidade, a massa específica seca diminui.

Segundo Karol (2003), diminuindo-se o volume de vazios, verifica-se aumento na resistência ao cisalhamento do solo, o que aumenta sua capacidade de suporte, além de diminuição na permeabilidade. Ingles e Metcalf (1972) elucidam que esses efeitos são explicados pela ocorrência de rearranjo das partículas do solo.

Ainda, é comum a ocorrência de depósitos naturais em que falta uma ou mais de uma fração granulométrica, ou seja, em que há ausência de tamanhos de grãos intermediários, acarretando uma quantidade maior de vazios (YODER; WITCZAK, 1975). Nesses casos, pode ser pertinente estabilizar o solo granulometricamente.

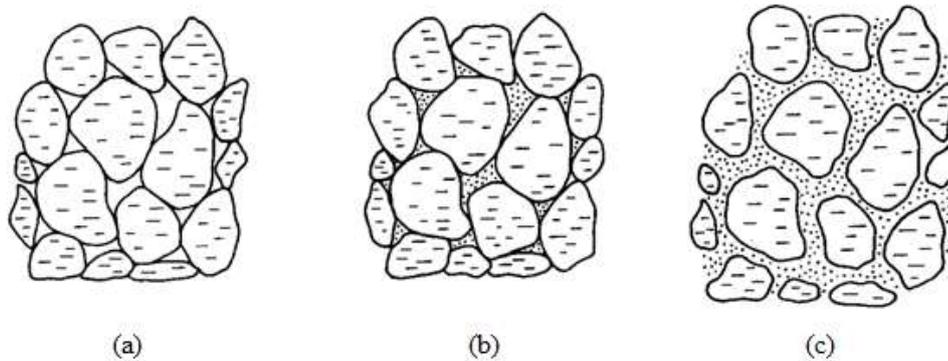
Segundo as normas DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a) e DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), a estabilização granulométrica consiste no processo de melhoria da capacidade resistente dos materiais ou das misturas de materiais, através do emprego de energia de compactação adequada, de modo a obter um produto que apresente estabilidade e durabilidade adequadas ao fim a que se destina.

Yoder e Witczak (1975) explicam que a estabilidade de uma mistura solo-agregados depende da sua granulometria, forma das partículas, densidade real dos grãos, ângulo de atrito e coesão. Por sua vez, o ângulo de atrito e, portanto, a resistência ao cisalhamento, também dependem da densidade real dos grãos, da forma das partículas e da granulometria. Assim, a granulometria e, em especial, a proporção entre a fração fina e a fração grossa são consideradas muito importantes.

A Figura 14, a seguir, apresenta três estados para misturas solo-agregados. A mistura que contém fração de finos pequena ou nenhuma, como apresentado na Figura 14 (a), vai se apresentar mais permeável, menos densa e de compactação difícil. A mistura que possui finos o suficiente para preencher os vazios entre os grãos, como na Figura 14 (b), é a mistura ideal em termos de estabilidade, apresentando ganho na resistência ao cisalhamento, maior densidade, menor permeabilidade, sendo moderadamente difícil de compactar. Já no material

de contém muitos finos, Figura 14 (c), perde-se o contato entre os grãos do agregado e, assim, o material apresenta baixa densidade, permeabilidade muito baixa e estabilidade mais facilmente afetada pela ação da água (YODER; WITCZAK, 1975).

Figura 14: Estados de misturas solo-agregados



Fonte: Yoder e Witczak (1975)

O propósito da estabilização mecânica é obter uma granulometria tão próxima quanto possível da granulometria correspondente à massa específica aparente máxima e encontrar a proporção de finos correspondente à resistência coesiva requerida (INGLES; METCALF, 1972).

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que, desde os primórdios da construção rodoviária, sabe-se que, para suportar o tráfego, a estrada deve ser mecanicamente estável. A estabilidade de uma estrada depende da resistência dos materiais selecionados, de compactação e drenagem adequadas. Bernucci *et al.* (2008) explicam que, para camadas de base, procura-se utilizar misturas com distribuição granulométrica bem graduada, preenchimento dos vazios e garantia do contato entre os grãos, ou seja, uma mistura estabilizada.

As normas DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a) e DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b) estabelecem requisitos de granulometria para misturas estabilizadas a serem utilizadas como base e sub-base de pavimentos, respectivamente. Segundo Yoder e Witczak (1975), o propósito de se especificar faixas granulométricas é garantir uma estabilidade adequada à camada quando submetida a repetição de cargas.

#### 2.4.2 Estabilização de solo com cimento Portland

Segundo o Department of Defense – DOD (2020), o cimento Portland pode ser usado tanto para modificar o solo, como para transformá-lo em uma massa cimentada com resistência e durabilidade aumentadas. Segundo Balbo (2007), a distinção mais evidente entre solo melhorado com cimento e solo-cimento se refere à quantidade de cimento empregado nas misturas a à finalidade dessas misturas.

O DNIT (2006a), ao tratar de bases e sub-bases estabilizadas com aditivos, faz distinção entre solo melhorado com cimento e solo-cimento de forma que as misturas de solo-cimento apresentam teores de cimento entre 6% e 10% e devem satisfazer a requisitos de densidade, durabilidade e resistência, resultando em um material duro e de acentuada rigidez à flexão. Já as misturas de solo melhorado com cimento apresentam teores de cimento de 2% a 4% e visam a modificação da plasticidade do solo e da sensibilidade à água. Apesar dessa distinção, a norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c), publicada em maio de 2022, traz nova definição para as misturas de solo-cimento, considerando que são aquelas que apresentam teores entre 5% e 8% de cimento em relação a massa de solo seco. Larsen (1967) apud Balbo (2007) indicou que o solo melhorado com cimento apresentaria teor de cimento máximo de 7% em massa.

O objetivo de melhorar o solo com cimento não é que o solo adquira resistência à compressão ou à tração na flexão para emprego em base, mas que o solo apresente reduzida suscetibilidade à água e se torne menos expansivo. Normalmente, atinge-se valores de ISC mais elevados, mas a pequena quantidade de cimento adicionada torna o material heterogêneo. Já para o solo-cimento, a mistura apresenta elevada rigidez, sendo seu objetivo proporcionar uma camada com elevada resistência que trabalhe em flexão. O estado de endurecimento do solo melhorado com cimento se aproxima do solo-cimento quando os teores de cimento são mais elevados (BALBO, 2007).

Conforme citam Ingles e Metcalf (1972), os procedimentos para estabilizar um solo com cimento envolvem fragmentar o solo, espalhar o cimento na superfície do solo solto, misturar o cimento e o solo, adicionar água e compactar. A hidratação do cimento proporcionará ao solo maior capacidade de suporte e maior resistência aos efeitos deletérios da água. Pequenas quantidades de cimento modificam as propriedades do solo, enquanto grandes quantidades promovem alterações radicais.

#### *2.4.2.1 Componentes da estabilização de solo com cimento Portland*

Os materiais envolvidos na estabilização de solos com cimento são solo, cimento, água e eventuais aditivos.

##### a) Solo

Tem-se que o cimento é capaz de estabilizar qualquer solo, com exceção daqueles com altos teores de matéria orgânica. No entanto, em termos práticos, pode-se encontrar situações que

apresentem alguma dificuldade, como, por exemplo, ao misturar o cimento, que é um pó fino e seco, com uma argila úmida. Um solo com grande teor de argila pode exigir um alto teor de aditivo, mas a situação pode ser contornada se o solo passar por um tratamento prévio para reduzir a plasticidade, que pode ser com o próprio cimento ou, mais comumente, com cal (INGLES; METCALF, 1972).

Segundo Yoder e Witzak (1975), a maioria dos solos finos, exceto aqueles que contenham matéria orgânica, pode ser estabilizada com cimento, sendo necessária uma quantidade maior de cimento para estabilização de solos com plasticidades maiores. Para solos altamente plásticos, pode ser necessário entre 15% e 20% de cimento por massa de solo. Já os solos arenosos reagem muito bem à estabilização com cimento e a quantidade de cimento necessária para aumento da resistência dependerá do índice de vazios do material compactado. Os teores de cimento para estabilização de solos arenosos variam entre 5% e 12% por massa de solo. Para solos pedregulhosos, a quantidade de cimento necessária para promover estabilização dependerá da quantidade e da qualidade de finos e da densidade após compactação. Valores típicos variam entre 2% e 6% de cimento por peso de solo compactado. Tem-se, ainda, que o cimento pode ser usado para reduzir ou eliminar a plasticidade de materiais granulares que não atendam aos padrões e torná-los adequados ao uso em camadas de base, permitindo o uso de outras fontes de materiais.

#### b) Cimento

A norma NBR 16697 (ABNT, 2018) define o cimento Portland como um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais. O clínquer, por sua vez, é um produto intermediário constituído, em sua maior parte, de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas e é obtido pela queima de misturas de materiais calcários e argilosos.

Segundo Petrucci (2005), o cimento é um material pulverulento, composto por silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre, que, na presença de água, se hidratam e provocam endurecimento da massa, resultado em aumento de sua resistência mecânica.

Os tipos de cimento Portland são designados de acordo com adições e propriedades especiais. São identificados por siglas, classe de resistência e sufixo, quando aplicáveis (ABNT, 2018). A Tabela 13, a seguir, apresenta a designação normalizada, sigla e classe dos diferentes tipos de cimento Portland.

Tabela 13: Designação normalizada, sigla e classe de cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo		
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC -		
	Com adição	CP I-S				
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E				
	Com material carbonático	CP II-F				
	Com material pozolânico	CP II-Z				
Cimento Portland de alto-forno		CP III				
Cimento Portland pozolânico		CP IV				
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI			
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40			
	Não estrutural	CPB	-	-		

Fonte: Extraído de ABNT (2018)

Segundo Petrucci (2005), os principais componentes do cimento são a cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), a magnésia (MgO), os álcalis (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O) e os sulfatos (SO<sub>3</sub>). Dos quatro primeiros componentes derivam os compostos fundamentais que governam as propriedades do cimento. Na química dos cimentos, utiliza-se uma forma abreviada desses compostos, associando-se cada óxido a uma letra, de forma que CaO = C; SiO<sub>2</sub> = S; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = A; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = F. Na Tabela 14, são apresentados os principais compostos do cimento Portland.

Tabela 14: Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>a</sub> AF

Fonte: Neville e Books (2013)

Na presença de umidade, os silicatos e aluminatos se hidratam e, com o passar do tempo, produzem uma massa sólida e resistente. Ingles e Metcalf (1972) informam que, a princípio, qualquer tipo de cimento pode ser usado para estabilização de solos, sendo o cimento Portland comum o mais utilizado. Tem-se que cimentos com grãos mais finos promovem maiores resistências. Cimentos de alta resistência inicial podem ser úteis para estabilizar solos orgânicos, uma vez que fornecem mais cálcio para combater a presença de matéria orgânica. Já os cimentos com pega retardada permitem a manipulação das misturas por mais tempo. O DOD (2020) observa que cimentos de alta resistência inicial promovem maiores resistências em alguns solos e apresenta cura mais rápida que o cimento comum.

### c) Água

A água, na mistura de solo e cimento, tem a função de facilitar a compactação, melhorar a trabalhabilidade e hidratar o cimento (O'FLAHERTY, 2002). Segundo Ingles e Metcalf (1972), não há um padrão preciso exigido para a qualidade da água a ser utilizada na estabilização de solo com cimento, sendo suficiente que a seja potável, sem altos teores de matéria orgânica. Ainda, água com sais pode ser usada, desde que a eflorescência não seja um problema. Segundo DOD (2020), a água do mar também apresenta resultados satisfatórios.

Fazendo uma analogia com a água de amassamento para concreto, Petrucci (2005) afirma que as águas com agentes agressivos têm ação menos intensa porque, após exercer sua ação, os agentes cessam a agressão. Havendo suspeita, devem ser feitos ensaios para verificar a influência das impurezas no tempo de pega, resistência, estabilidade de volume, eflorescências, entre outros. No entanto, em geral, as maiores consequências estão mais relacionadas ao excesso de água empregada do que aos elementos que ela possa conter.

Petrucci (2005) apresenta recomendações de teores máximos para diversos tipos de impurezas, incluindo matéria orgânica e diversos tipos de sais, e informa que deve ser verificada a possibilidade de utilização de determinada água sempre que se utilizar cimentos especiais. Ainda, afirma que há diferença nas exigências para a água de amassamento em relação à água de cura, cujos critérios são ainda mais rígidos.

### d) Outros aditivos

Segundo Ingles e Metcalf (1972), outros aditivos podem ser usados para realçar os efeitos do cimento, como a cal, para ajudar com a pulverização, o cloreto de cálcio, para combater os efeitos da presença de matéria orgânica, e a cinza volante, para agir como pozolana, substituindo parte do cimento. Yoder e Witczak (1975) também destacam o uso de cloreto de cálcio para melhorar os benefícios da estabilização de solos com cimento.

### e) Substâncias deletérias

É importante que os materiais envolvidos na estabilização de solo com cimento estejam livres de substâncias deletérias. Matéria orgânica e excesso de sais, principalmente sulfatos, podem atrapalhar a hidratação do cimento. A matéria orgânica absorve íons de cálcio e, assim,

retarda a hidratação do cimento. Um teor máximo de cerca de 2% de matéria orgânica é considerado um limite seguro (INGLES, METCALF, 1972).

Tem-se que, no concreto, os sulfatos podem causar desagregação devido ao maior volume dos compostos resultantes da reação com o aluminato de cálcio (NEVILLE; BROOKS, 2013). Trata-se de sulfoaluminatos conhecidos pelo nome de sal de Candlot ou etringita. Por analogia ao que acontece com o concreto, presumiu-se que os sulfatos interferem na hidratação do cimento e que o maior volume dos sulfoluminatos provocaria expansão e degradação do solo-cimento. No entanto, Ingles e Metcalf (1972) citam que Sherwood (1962) mostrou que tais efeitos são devidos a uma reação com a argila presente no solo e, assim, a desintegração de um solo estabilizado com cimento pode ocorrer quando este possuir uma fração considerável de argila e quando há um aumento no teor de umidade acima do teor de umidade de quando ocorreu a compactação.

#### 2.4.2.2 Mecanismos da estabilização de solo com cimento

Conforme citam Horpibulsuk *et al.* (2010), na presença de umidade e de um agente cimentante, as partículas de solo se agrupam devido a interações físico-químicas entre esses componentes. De acordo com O'Flaherty (2002), ao adicionar água à mistura de solo e cimento, as primeiras reações de hidratação resultam em silicato de cálcio e aluminato de cálcio hidratados, liberando cal hidratada. Os dois primeiros produtos são os principais na formação de ligações entre as partículas do solo, seja ele arenoso, siltoso ou argilas reativas. As reações de hidratação ocorrem rapidamente, sendo verificados ganhos de resistência em curtos períodos.

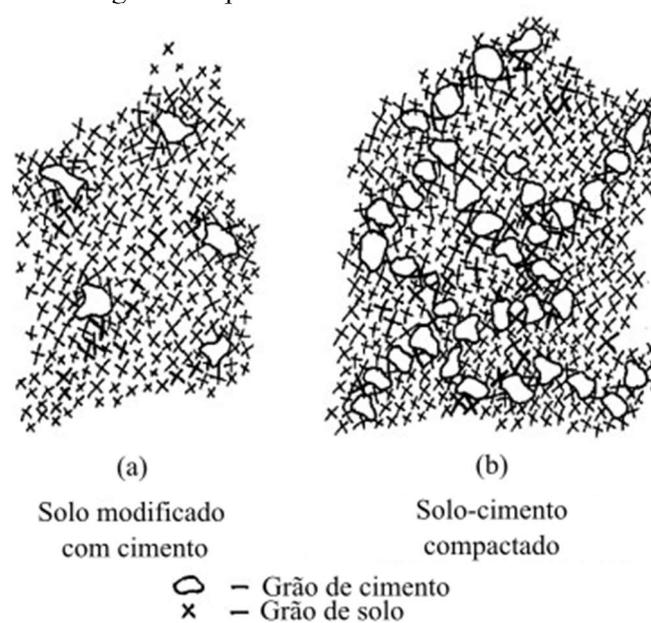
A cal hidratada entra em reações secundárias com elementos reativos da mistura (argila, por exemplo) resultando em produtos cimentícios similares aos das primeiras reações, configurando uma contribuição adicional às ligações entre partículas. Ocorrem, também, trocas com os cátions das partículas de argila, alterando a plasticidade do solo. As reações cimentícias ocorrem a uma taxa mais lenta. Quanto maior a quantidade de finos do solo e a reatividade dos minerais de argila, mais importantes são as reações secundárias (O'FLAHERTY, 2002).

Segundo Catton (1962), em uma mistura de solo e cimento os grãos de cimento são cobertos pelos grãos do solo e por aglomerações de solo, conforme ilustrado na Figura 15 a seguir. A Figura 15 (a) indica a situação do solo melhorado com cimento, em que apenas uma pequena quantidade de cimento teria sido incorporada à mistura compactada. Quando compactados, os grãos do solo são forçados a estabelecer um contato íntimo com o grão do cimento. À medida

em que ocorre a hidratação, o produto resultante é uma aglomeração de grãos de solo-cimento espalhados pela massa de solo. O tamanho da massa resultante aumenta e a capacidade de reter água diminui.

Já a Figura 15 (b) ilustra a situação do solo-cimento compactado, em que uma quantidade suficiente de cimento é adicionada para que se desenvolvam elos contínuos de cimento e grãos de solo. Assim, são formados pacotes preenchidos com solo que têm sua movimentação impedida pelos grãos de cimento hidratado e grãos de solo aderidos circundantes (CATTON, 1962).

Figura 15: Diagrama esquemático de misturas de solo com cimento

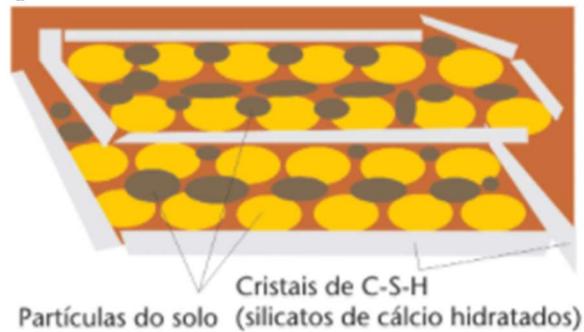


Fonte: Extraído de Catton (1962)

Da mesma forma, Ingles e Metcalf (1972) sugerem que a mudança provocada por uma pequena porção de cimento em uma grande massa de solo se dá ou pela formação de núcleos fortes distribuídos pela massa de solo, ou pela formação de um esqueleto de cimento hidratado nos vazios do solo que contém os grãos de solo.

Segundo Balbo (2007), o cimento nas misturas de solo-cimento e solo melhorado com cimento, diferentemente do que ocorre para o concreto, cria carapaças que envolvem os grãos de solo, gerando uma barreira contra a água e evitando a expansão. A Figura 16, a seguir, apresenta uma representação dos cristais de silicatos de cálcio hidratados (CSH) envolvendo os grãos do solo.

Figura 16: Representação dos cristais de CSH envolvendo os grãos do solo



Fonte: Extraído de Balbo (2007)

Athanasopoulou (2016) observou que, ao adicionar cimento Portland a um solo coesivo, são formadas aglomerações com os grãos menores, que, quando interconectadas, criaram uma estrutura celular com partículas de material nos vazios. Esse esqueleto formado aumenta a resistência do solo e diminuiu sua plasticidade. Dessa forma, a autora sugeriu que a estabilização com cimento se dá por ligações cimentícias entre as partículas de solo e os produtos da hidratação do silicato de cálcio e do aluminato.

Horpibulsuk *et al.* (2010) verificaram que após misturar argila e cimento, a formação de aglomerações de cimento e argila devido a interação físico-química reduz o volume dos poros interagregados menores e aumenta ligeiramente o volume dos poros interagregados maiores. Devido ao crescimento dos produtos cimentícios com o tempo, os poros interagregados maiores são preenchidos e o volume total dos poros diminui.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para avaliar, em laboratório, as propriedades físicas, mecânicas e hidráulica do solo, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento Portland para fins de uso em camadas do pavimento.

#### 3.1 MATERIAIS

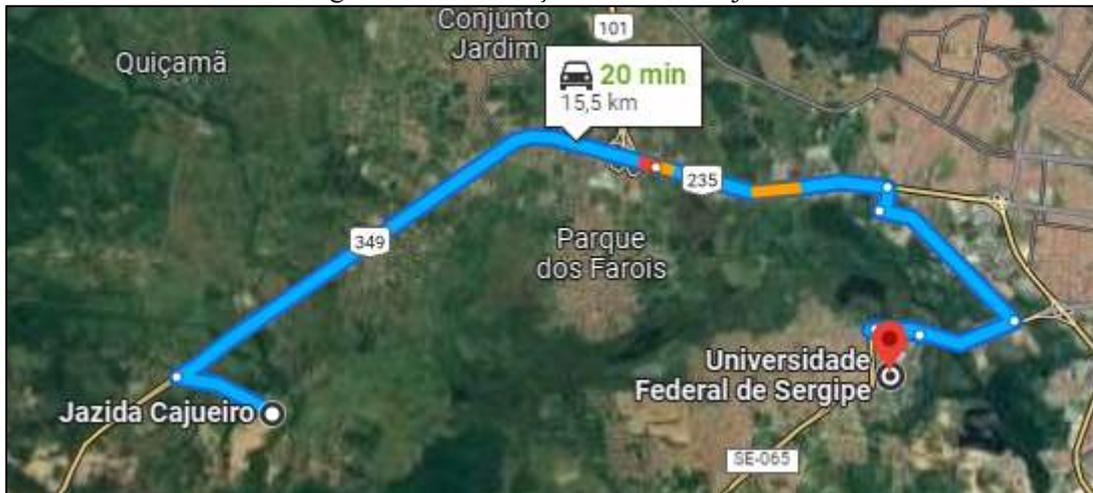
O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado no município de São Cristóvão/SE, em área pertencente à Jazida Cajueiro, situada a cerca de 15 km da Universidade Federal de Sergipe (UFS), que contém uma grande quantidade de material argiloso e já foi utilizado em pesquisas passadas (LOIOLA *et al.*, 2018; MACHADO *et al.*, 2017; CARDOSO, ALMEIDA, CASAGRANDE, 2016). Por uma análise tátil-visual, verifica-se que o solo é predominantemente constituído de fração fina.

Na Figura 17, é apresentada uma visão parcial da Jazida Cajueiro, enquanto a Figura 18 apresenta a localização da Jazida Cajueiro em relação à UFS.

Figura 17: Visão parcial da Jazida Cajueiro



Figura 18: Localização da Jazida Cajueiro



A coleta foi realizada no horizonte superficial com auxílio de pá e picareta, sendo coletado, ao todo, cerca de 500 kg de solo para a pesquisa. As coordenadas geográficas e Universal Transversa de Mercator (UTM) do ponto de coleta do solo estão apresentadas na Tabela 15. O solo coletado foi acondicionado em sacos de *nylon* e transportado até o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav) da UFS, onde foi seco ao ar, destorroado, misturado e repartido, conforme ilustrado na Figura 19.

Tabela 15: Coordenadas do ponto de coleta na Jazida Cajueiro

Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM em metros (datum Sirgas 2000) <sup>(1)</sup>
W 37° 10' 16,5"	X 699856.68149013
S 10° 55' 57,1"	Y 8790875.9378493

<sup>(1)</sup>A conversão para coordenadas UTM foi realizada através do *site* <http://www.dpi.inpe.br/calcula/>

Figura 19: Solo puro (a) secagem ao ar (b) destorroamento (c) mistura e repartição



Já o material fresado foi coletado na usina de asfalto da Empresa Municipal de Obras e Urbanização (EMURB), da Prefeitura Municipal de Aracaju/SE, e é proveniente das intervenções realizadas pela Prefeitura nas ruas da cidade de Aracaju. A Figura 20 mostra o resíduo de fresagem estocado na usina da EMURB. Para a operação de fresagem foi utilizada

a máquina fresadora Wirtgen W 200, considerada de grande porte, conforme pode ser observado na Figura 21. A espessura de corte das operações variou entre 2,5 cm e 3 cm.

Figura 20: Resíduo de fresagem estocado na usina de asfalto da EMURB



Figura 21: Máquina fresadora utilizada nas operações de fresagem em Aracaju/SE



O resíduo de fresagem foi coletado, acondicionado em sacos de *nylon* e transportado até o Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (Lamce) da UFS, onde foi triturado para permitir que todo o material passasse na peneira de 19,0 mm. Em seguida, procedeu-se com a mistura e repartição do resíduo de fresagem, ilustradas na Figura 22. A Figura 23 mostra o aspecto do resíduo de fresagem após a trituração. Julga-se coerente utilizar um solo fino argiloso para as misturas com o material fresado dada a característica granular deste.

Figura 22: Trituração (a), mistura e repartição (b) do resíduo de fresagem

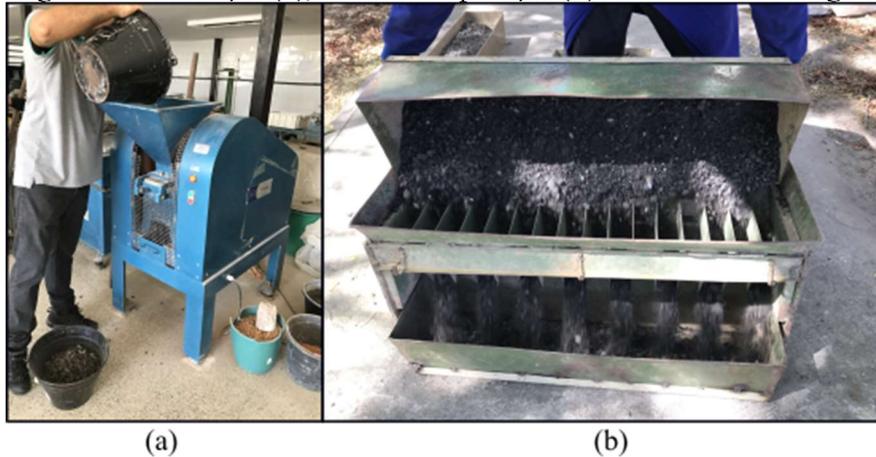


Figura 23: Resíduo de fresagem triturado



Tanto o solo quanto o resíduo de fresagem utilizados na pesquisa são, a princípio, materiais que não seriam utilizados para fins de Engenharia. O primeiro por suas características de material fino, o segundo por ainda não estar disseminada, adequadamente, a cultura de reutilização e por não haver conhecimento facilmente disponível a respeito das suas propriedades.

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP V – ARI, por possuir menos adições em sua composição, apresentar alta resistência inicial e ser de fácil acesso. A NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece os seguintes limites para composição do CP V – ARI: 90% a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio, além de 0% a 10% de material carbonático. Segundo Neville (2016), o cimento CP V – ARI possui maior teor de  $C_3S$  (de 55% a 70%) que o cimento comum. Considerando que o  $C_3S$ , quando hidratado, libera hidróxido de cálcio, e quanto maior a

quantidade de  $C_3S$ , maior é a quantidade de hidróxido de cálcio liberada, entende-se que a utilização deste tipo de cimento para estabilização de solo argiloso pode ser interessante, devido às reações secundárias que ocorrem entre os argilominerais e o hidróxido de cálcio.

### 3.2 MÉTODOS

A seguir, são descritos os ensaios realizados com o solo, com o resíduo de fresagem, com as misturas solo-resíduo de fresagem e com as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento. A Tabela 16 apresenta a lista dos ensaios realizados.

Tabela 16: Ensaios realizados na pesquisa

<b>Ensaio</b>	<b>Solo</b>	<b>Resíduo de fresagem</b>	<b>Misturas solo-resíduo de fresagem</b>	<b>Misturas solo-resíduo de fresagem-cimento</b>
Análise granulométrica	X	X	X	
Análise granulométrica de amostras submetidas ao ensaio de compactação com amostras trabalhadas			X	
Análise granulométrica de amostras submetidas ao ensaio de compactação com amostras não trabalhadas			X	X
Densidade seca e densidade saturada superfície seca		X		
Massa específica por meio do frasco de Chapman		X		
Limites de Atterberg	X		X	
Limites de Atterberg de amostras submetidas ao ensaio de compactação com amostras trabalhadas			X	
Limites de Atterberg de amostras submetidas ao ensaio de compactação com amostras não trabalhadas			X	X
Teor de betume		X		
Abrasão <i>Los Angeles</i>		X		
Absorção		X		
Compactação com amostras trabalhadas	X		X	
Compactação com amostras não trabalhadas	X		X	X
Índice de Suporte Califórnia	X		X	X
Resistência à compressão simples				X
Resistência à tração por compressão diametral				X
Módulo de Resiliência	X			X
Durabilidade				X
Permeabilidade	X		X	X

### 3.2.1 Caracterização do solo e do resíduo de fresagem

A título de esclarecimento, no presente trabalho, amostras de solo puro serão designadas por 100S, ou seja, 100% de solo, enquanto amostras de resíduo de fresagem serão designados por 100F, ou seja, 100% de resíduo de fresagem.

Com o intuito de conhecer a faixa de tamanho das partículas do solo, foram realizados ensaios segundo as normas DNER-ME 051/94 (DNER, 1994a) e DNER-ME 080/94 (DNER, 1994c), que apresentam os procedimentos para a determinação granulométrica. Para o material fresado, foi verificada a norma DNER-ME 083/98 (DNER, 1998b), que descreve o procedimento para a análise granulométrica de agregados miúdos e graúdos por peneiramento.

Para determinação da densidade real dos grãos do solo, tomou-se como referência a norma DNER-ME 093/94 (DNER, 1994e). A massa específica do resíduo de fresagem foi obtida conforme descrito na norma DNER-ME 194/98 (DNER, 1998c), que estabelece o procedimento para determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. A Figura 24 ilustra a execução do ensaio de determinação da massa específica do resíduo de fresagem.

A utilização do frasco de Chapman para obtenção da massa específica do resíduo de fresagem se deu pela dificuldade observada em realizar o ensaio de densidade real dos grãos com este material. Isto porque partículas do resíduo permaneciam sobrenadantes, ocasionando perda do material ao tampar o picnômetro.

Figura 24: Determinação da massa específica do resíduo de fresagem por meio do frasco de Chapman



Ainda para o resíduo de fresagem, foram determinadas a densidade na condição seca, a densidade na condição saturada superfície seca e a absorção de água, tomando-se como referência as normas NBR 16916 (ABNT, 2021a) e NBR 16917 (ABNT, 2021b), que

estabelecem os métodos para agregados miúdos e graúdos, respectivamente, destinados ao uso em concreto, dada a ausência de normativo específico para resíduo de fresagem. As Figuras 25 e 26 ilustram a execução dos ensaios.

Figura 25: Determinação das densidades e absorção do agregado miúdo (a) secagem até a condição saturada superfície seca (b) determinação das densidades



(a)

(b)

Figura 26: Determinação das densidades e absorção do agregado graúdo (a) secagem até a condição saturada superfície seca (b) pesagem na balança hidrostática



(a)

(b)

Para determinação dos limites de Atterberg do solo, foram verificadas as normas DNER-ME 122/94 (DNER, 1994f), que especifica o método para determinação do LL, e DNER-ME 082/94 (DNER, 1994d), que especifica o método para determinação do limite de plasticidade (LP) e para o cálculo do IP.

De posse das informações sobre a granulometria e os limites de Atterberg do solo, procedeu-se com a sua classificação segundo a metodologia AASHTO.

Para determinar teor de betume do material fresado foi observada a norma DNER-ME 053/94 (DNER, 1994b). Este ensaio foi realizado na Usina de Asfalto da EMURB, conforme Figura 27.

Figura 27: Extração de betume



Também foi avaliado o desgaste do agregado de resíduo de fresagem retido na peneira nº 10 quando colocado na máquina *Los Angeles* junto com uma carga abrasiva (Figura 28), conforme DNER-ME 035/98 (DNER, 1998a).

Figura 28: Determinação da abrasão Los Angeles



Com o solo foram realizados ensaios de compactação com amostras trabalhadas e com amostras não trabalhadas. Tem-se que o ensaio realizado com amostras trabalhadas é aquele em que uma mesma amostra é utilizada para obtenção de todos os pontos da curva de compactação, ou seja, a mesma amostra é repetidamente compactada e desmanchada para ser novamente compactada a um diferente teor de umidade. Já no ensaio de compactação com amostras não trabalhadas, é utilizada uma amostra diferente para cada ponto da curva de compactação.

O ensaio de compactação com amostras trabalhadas para o solo foi realizado conforme a norma DNER-ME 162/94 – ME (DNER, 1994g), utilizando a energia modificada (método C). Segundo Pinto (2006), a energia modificada é, geralmente, tomada como referência para a compactação das camadas mais importantes do pavimento, uma vez que a melhoria das propriedades do solo obtida justifica a emprego de maior energia de compactação e, por

consequência, de maior custo. A energia modificada foi utilizada em todos os ensaios que necessitavam de compactação de amostras. Ainda, foi realizado o ensaio de determinação do ISC do solo puro, que também contempla a execução de ensaio de compactação com amostras não trabalhadas, conforme a norma DNIT 172/2016 – ME (DNIT, 2016). As Figuras 29 e 30 ilustram a execução dos ensaios de compactação e ISC.

Figura 29: Compactação do solo puro



Figura 30: Ensaio de ISC como solo puro (a) imersão dos corpos de prova (b) execução do ensaio



(a)



(b)

A realização do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade do solo puro, ilustrada na Figura 31, teve como referência o método B descrito na NBR 14545 (ABNT, 2000), que prescreve a determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável, tendo em vista que o solo em estudo é fino.

Figura 31: Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade do solo puro



### 3.2.2 Caracterização das misturas solo-resíduo de fresagem

Caracterizados os materiais, foram realizadas misturas de solo com resíduo de fresagem em teores iguais a 20%, 30% e 50% em relação à massa total da amostra. Neste trabalho, as citadas misturas são designadas por 20F80S, 30F70S e 50F50S, sendo 20F80S a mistura que contém 20% de resíduo de fresagem e 80% de solo; 30F70S, a mistura que contém 30% de resíduo de fresagem e 70% de solo; e 50F50S, a mistura que contém 50% de resíduo de fresagem e 50% de solo. Tomando como referência as pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica, julga-se que esses teores são adequados para as análises.

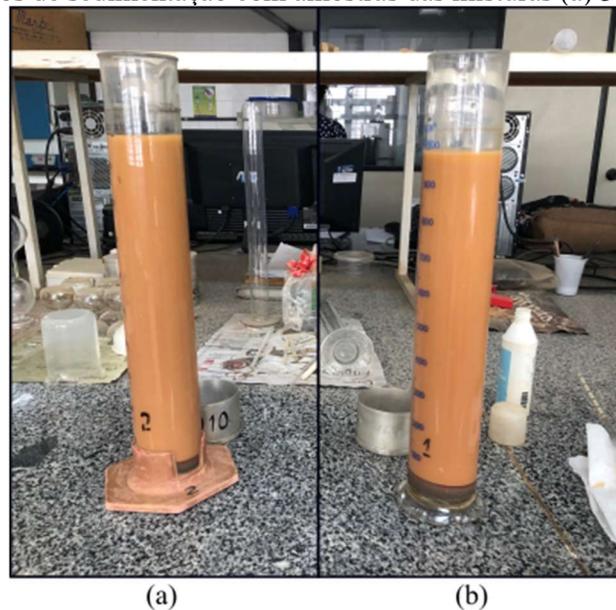
A sequência de ensaios de análise granulométrica, densidade real dos grãos, limites de Atterberg, compactação (método C), ISC e permeabilidade (método B) também foi realizada com as misturas solo-resíduo de fresagem, respeitando as respectivas normas já indicadas no item 3.2.1.

Realizados os ensaios, discutiu-se sobre os resultados encontrados, tomando-se como referência as normas DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a) e DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), que tratam, respectivamente, de sub-base e base estabilizadas granulometricamente, e

a norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c), que trata de base de solo-cimento; além de resultados obtidos por outros autores.

Ao comparar os resultados dos ensaios de compactação com amostras trabalhadas e com amostras não trabalhadas, foram verificadas diferenças nas curvas de compactação das misturas para as duas condições, diferenças estas que crescem com o aumento do teor de resíduo de fresagem das misturas. Dessa forma, com o objetivo de investigar a ocorrência de quebra dos grumos das amostras, também foram realizados ensaios de análise granulométrica, determinação da densidade real dos grãos e limites de Atterberg para as amostras submetidas aos ensaios de compactação. Para o caso de compactação com amostras não trabalhadas, foram selecionadas as amostras correspondentes aos pontos mais próximos da massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo. Estes ensaios seguiram as mesmas normas já citadas para o solo puro. A Figura 32 apresenta a execução dos ensaios de sedimentação com amostras das misturas 30F70S e 50F50S.

Figura 32: Ensaios de sedimentação com amostras das misturas (a) 30F70S (b) 50F50S



### 3.2.3 Caracterização das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento Portland

Foram realizadas misturas contendo solo, resíduo de fresagem nos teores de 20%, 30% e 50% e cimento Portland em teor fixo de 5% em relação à massa total seca das amostras. Neste trabalho, as citadas misturas são designadas por 95(20F80S)5C, 95(30F70S)5C e 95(50F50S)5C, sendo 95(20F80S)5C a mistura que contém 95% da mistura 20F80S e 5% de cimento; 95(30F70S)5C a mistura que contém 95% da mistura 30F70S e 5% de cimento; e 95(50F50S)5C a mistura que contém 95% da mistura 50F50S e 5% de cimento.

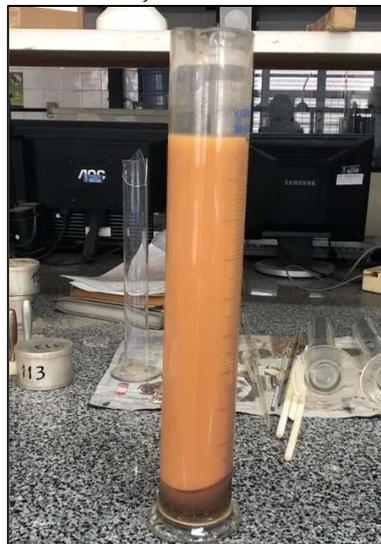
O teor de cimento Portland foi fixado em 5% por ser um teor que, a princípio, não era considerado pelo DNIT para distinção entre solo melhorado com cimento (teor entre 2% e 4%) e solo-cimento (teor entre 6% e 10%). Porém, em publicação mais recente, o DNIT (2022c) apresenta distinção para solo-cimento como aquelas misturas com teor de cimento entre 5% e 8%.

As misturas solo-resíduo de fresagem-cimento foram submetidas aos ensaios de compactação com amostras não trabalhadas (método C), ISC e permeabilidade (método B), conforme as respectivas normas referenciadas no item 3.2.1. As amostras submetidas a ensaio de compactação que mais se aproximaram da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo foram secas e destorroadas para que fossem realizados ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de Atterberg após decorridos sete dias da moldagem. Para o ensaio de permeabilidade, as amostras também foram ensaiadas após sete dias de cura. A Figura 33 ilustra a execução do ensaio de permeabilidade, enquanto a Figura 34 ilustra o ensaio sedimentação com amostra submetida a ensaio de compactação.

Figura 33: Ensaio de permeabilidade de amostras da mistura 95(20F80S)5C



Figura 34: Ensaio de sedimentação de amostra da mistura 95(30F70S)5C



Além dos ensaios citados, foram determinadas a RCS, de acordo com o indicado na norma DNER-ME 201/94 (DNER, 1994h), e a RTCD, tomando-se como base a norma DNIT 136/2018 – ME (DNIT, 2018), que estabelece procedimentos relacionados a misturas asfálticas, tendo em vista a ausência de normativo referente a solo. Conforme estabelece a norma DNER-ME 201/94 (DNER, 1994h), os corpos de prova das misturas com cimento foram submetidos a imersão em água por quatro horas antes da realização do ensaio de RCS.

Avaliou-se, também, a durabilidade por ciclos de molhagem e secagem das misturas conforme norma DNER-ME 203/94 (DNER, 1994i). Os ensaios de RCS, RTCD e durabilidade foram realizados após sete dias de cura em câmara úmida. As Figuras 35 a 37 ilustram a execução destes ensaios.

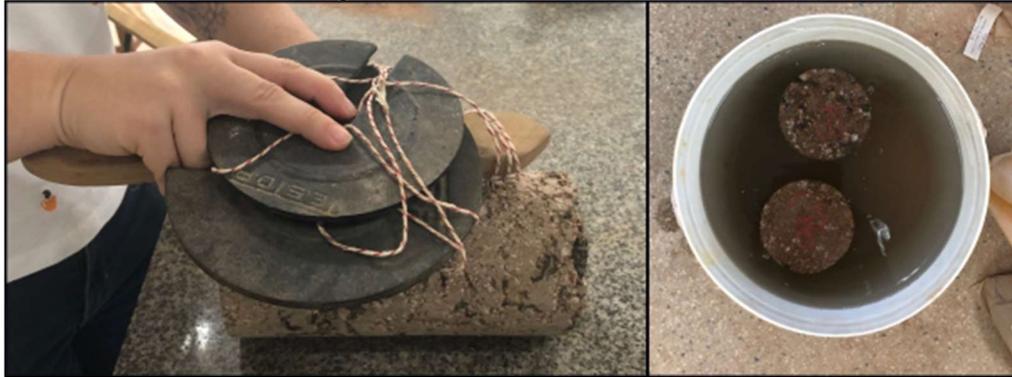
Figura 35: Ensaio de resistência à compressão simples (a) corpo de prova de mistura 95(20F80S)5C na prensa (b) corpo de prova de mistura 95(50F50S)5C rompido



Figura 36: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Figura 37: Ensaio de durabilidade



Ressalta-se que os ensaios de RCS e durabilidade não foram realizados com as misturas solo-resíduo de fresagem devido ao fato de que estas misturas não resistiram à etapa de imersão em água, conforme pode ser visto na Figura 38.

Figura 38: Corpo de prova da mistura 30F70S que não resistiu à imersão em água



Realizados os ensaios, discutiu-se sobre os resultados encontrados, tomando-se as normas DNIT 140/2022 – ES (DNIT, 2022a), DNIT 142/2022 – ES (DNIT, 2022b), que tratam, respectivamente, de sub-base e base de solo melhorado com cimento, e DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c), que trata de base de solo-cimento, além de resultados obtidos por outros autores, como referência.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A Figura 39 apresenta a curva granulométrica obtida para solo puro, proveniente da jazida Cajueiro, enquanto a Tabela 17 detalha o percentual de solo passante em cada peneira. Tomando-se os valores de percentual passante nas peneiras, tem-se que o solo puro é constituído por 2,27% de pedregulho, 21,74% de areia, 33,90% de silte e 42,09% de argila, de acordo com a escala granulométrica da AASHTO.

Figura 39: Curva granulométrica do solo puro

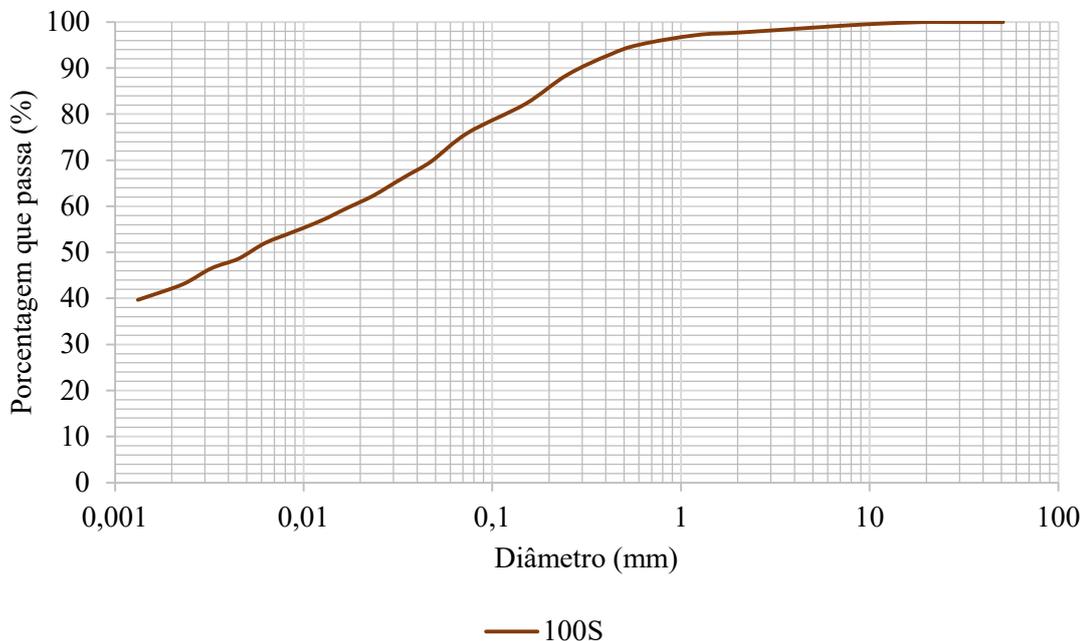


Tabela 17: Resultados da análise granulométrica do solo puro

<b>Peneira</b>	<b>% que passa</b>
2"	100,00
1 ½"	100,00
1"	100,00
¾"	100,00
3/8"	99,55
nº 4	98,75
nº 10	97,73
nº 16	97,22
nº 30	95,14
nº 40	92,97
nº 60	88,62
nº 100	82,30
nº 200	75,99

A densidade real obtida para o solo puro foi de 2,66, resultado esse que está de acordo com valores citados na literatura. Pinto (2006) esclarece que o peso específico dos grãos dos solos varia pouco e se situam em torno de 27 kN/m<sup>3</sup>, dado compatível com a densidade real obtida.

Os resultados dos ensaios de limites de Atterberg para o solo puro estão apresentados na Tabela 18. O IP médio igual a 28% permite classificar o solo como altamente plástico.

Tabela 18: Limites de Atterberg para o solo puro

<b>Limite de Liquidez (%)</b>	51
<b>Limite de Plasticidade (%)</b>	23
<b>Índice de Plasticidade (%)</b>	28

Conforme a metodologia do sistema AASHTO, muito empregado na Engenharia Rodoviária, o solo puro utilizado na presente pesquisa se classifica como um solo do tipo A-7-6, com Índice de Grupo (IG) igual a 18. Os solos classificados como A-7-6 são solos finos que apresentam porcentagem de material passante na peneira nº 200 maior que 35%, LL maior que 40%, IP maior que 10%, IG máximo de 20 e o IP é maior que o LL menos 30%.

Verifica-se que o solo puro não poderia ser utilizado para constituir camadas granulares de pavimento flexível, uma vez que não atende as condições específicas das normas do DNIT para uso como sub-base ou base estabilizadas granulometricamente, quais sejam as normas DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a) e DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), respectivamente. Também não poderia ser utilizado para constituir base de solo-cimento por não atender as condições da norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c).

A norma DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a) especifica que, para que um solo possa ser usado como material de sub-base estabilizada granulometricamente, quando submetido a ensaios de caracterização, deve apresentar IG igual a zero. Já a norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b) especifica que, para que um solo possa ser usado como material de base estabilizada granulometricamente, quando submetido a ensaios de caracterização, deve apresentar: composição granulométrica conforme apresentado na Tabela 19; fração que passa na peneira nº 40 com LL menor ou igual a 25% e IP menor ou igual a 6% ou equivalente de areia maior que 30%, caso esses limites sejam ultrapassados; além de que porcentagem do material que passa na peneira nº 200 deve ser menor ou igual a 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40.

Tabela 19: Especificação da granulometria do material de base estabilizada granulometricamente

Tipos Peneiras	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	50-85	55-100	70-100	±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	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT (2010b)

Ainda, a norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c) apresenta condições específicas para os materiais constituintes das bases de solo-cimento, de modo que, para a seleção inicial de solo ou material granular utilizado para compor a mistura solo-cimento, este deve atender as condições granulométricas indicadas na Tabela 20.

Tabela 20: Especificação da granulometria do solo ou mistura solo e material granular a ser usado em base de solo-cimento

Peneira	% que passa	Tolerância
2"	100	-
nº 4	50 a 100	± 5
nº 40	15 a 100	± 2
nº 200	5 a 35	± 2

Fonte: DNIT, 2022c

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE FRESAGEM

A Figura 40 apresenta a curva granulométrica obtida para o resíduo de fresagem, enquanto a Tabela 21 detalha o percentual de resíduo de fresagem passante em cada peneira. Tomando-se os valores de percentual passante nas peneiras, tem-se que o resíduo de fresagem se constitui de 54,07% de agregados graúdos, 45,65% de agregados miúdos e 0,27% de material pulverulento.

Figura 40: Curva granulométrica do resíduo de fresagem

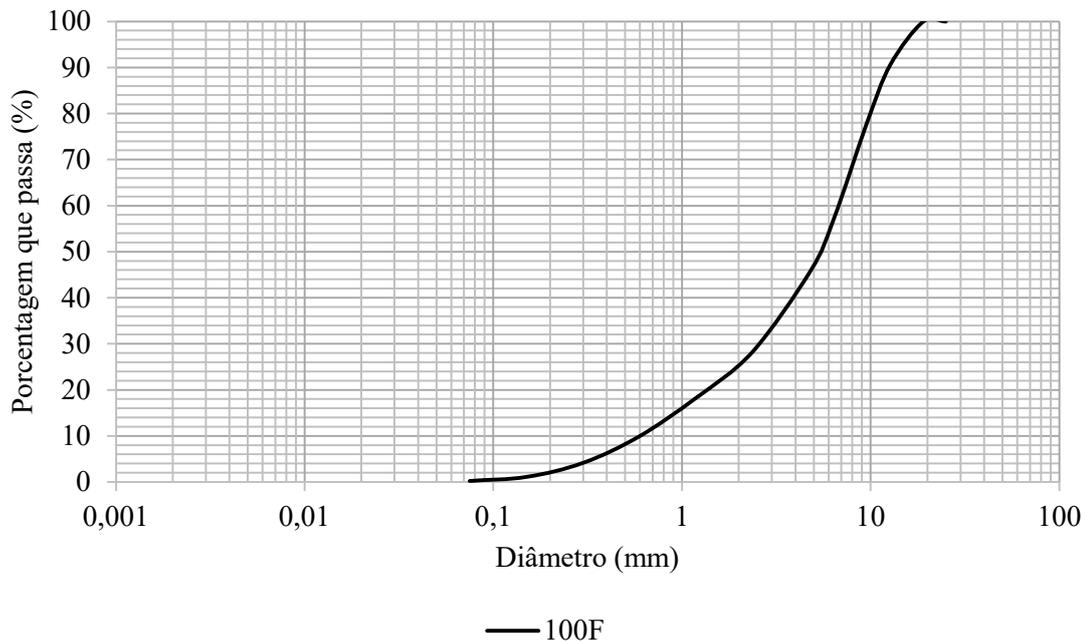


Tabela 21: Resultado da análise granulométrica do resíduo de fresagem

Peneira	% que passa
2"	100,00
1 1/2"	100,00
1"	100,00
3/4"	100,00
1/2"	90,60
3/8"	77,69
1/4"	57,01
nº 4	45,93
nº 8	28,27
nº 16	18,21
nº 30	9,90
nº 50	4,20
nº 100	1,14
nº 200	0,27

O resíduo de fresagem se apresentou como um material de granulação grosseira e não plástico, sendo classificado como do tipo A-1-a, segundo a metodologia do sistema AASHTO. Os materiais classificados como A-1-a são caracterizados por possuir percentual passante na peneira nº 10 menor que 50%, percentual passante na peneira nº 40 menor que 30%, percentual passante na peneira nº 200 menor que 15%, IP menor que 6%, IG igual a 0 e se apresentam como fragmentos de pedra, pedregulho e areia.

Esse resultado é compatível com os resultados obtidos por Bonfim (2007), Alhaji et al. (2019), Alhaji e Alhassan (2018) e Mahasneh (2016). A porcentagem de finos se mostrou ainda menor do que a observada no material trabalhado por Bonfim (2007), mas similar à observada no material trabalhado por Hasan, Islam e Tarefder (2018), que obtiveram porcentagem de finos igual a 0,3%.

A densidade na condição seca obtida para a fração graúda do resíduo de fresagem foi igual a 2,29 g/cm<sup>3</sup> e para a fração miúda, 1,81 g/cm<sup>3</sup>. Já a densidade na condição saturada superfície seca obtida para a fração graúda do resíduo de fresagem foi igual a 2,34 g/cm<sup>3</sup> e para a fração miúda, 2,18 g/cm<sup>3</sup>. Utilizando-se o frasco de Chapman, o valor de massa específica obtida para a fração miúda do resíduo de fresagem foi igual a 2,26 g/cm<sup>3</sup>.

Ressalta-se que a densidade seca considera o volume dos sólidos e dos poros permeáveis e impermeáveis, enquanto a massa específica obtida através do frasco de Chapman considera apenas o volume dos sólidos e dos poros impermeáveis. Além disso, a amostra segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021a), referente a obtenção de densidade seca e outros, é aquela que passa na peneira #4 e fica retida na peneira #100, enquanto a amostra utilizada nos procedimentos da norma DNER-ME 194/98 (DNER, 1998c), referente a obtenção de massa específica por meio de frasco de Chapman, passa na peneira #4 e fica retida na peneira #200. Dessa forma, é justificável que a massa específica, em g/cm<sup>3</sup>, obtida através do ensaio de frasco de Chapman seja numericamente maior que a densidade seca do agregado miúdo.

Apesar de diferirem um pouco entre si, os valores obtidos estão abaixo do que se obtém normalmente para agregados naturais, cujas massas específicas se situam em torno de 2,60 g/cm<sup>3</sup> a 2,70 g/cm<sup>3</sup>. A redução da massa específica do resíduo de fresagem em comparação a agregados naturais se dá pela presença do material asfáltico, que possui valores de massa específica em torno de 0,9 a 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Dessa forma, o teor de asfalto do resíduo de fresagem exerce influência na sua massa específica.

O resíduo de fresagem utilizado na pesquisa apresentou teor de asfalto igual a 5,9%. Esse valor se encontra dentro do intervalo esperado e citado na literatura. A título de comparação e constatação da influência do teor de asfalto na massa específica/densidade do material, Chhabra, Ransinchung e Islam (2021) verificaram que o resíduo de fresagem utilizado em sua pesquisa apresentou 2,8% de teor de asfalto e densidade igual a 2,57, enquanto Alhaji e Alhassan (2018) obtiveram uma densidade igual a 2,01 para o resíduo de fresagem contendo 5,99% de teor de asfalto.

Após realizar o ensaio de determinação da absorção de água com as frações graúda e miúda do resíduo de fresagem, foram obtidos valores de absorção igual a 2,0% para a fração graúda e

1,9% para a fração miúda, ou seja, o resíduo de fresagem apresentou baixa absorção, como é de se esperar de um material constituído por agregados, que, em geral, apresentam valores baixos de absorção, e asfalto, que é um material hidrófugo.

Através do ensaio de determinação da abrasão *Los Angeles*, obteve-se desgaste de 31%, valor acima dos 21,80% encontrados por Mishra (2015), mas compatível com o resultado obtido por Taha *et al.* (2022). Este resultado satisfaz o critério da norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), que estabelece, como condição para utilização em camadas de base estabilizadas granulometricamente, o desgaste máximo de 55% para agregados retidos na peneira nº 10.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-RESÍDUO DE FRESAGEM

A Figura 41 apresenta as curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro, enquanto a Tabela 22 detalha o percentual de material das misturas solo-resíduo de fresagem passante em cada peneira. A Figura 42 apresenta um histograma com o resumo da granulometria do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem, segundo a escala granulométrica da AASHTO.

Percebe-se que o aumento da quantidade de fresado nas amostras provoca um deslocamento das curvas granulométricas para baixo, o que significa que as misturas solo-resíduo de fresagem se tornam mais granulares com o aumento do teor de resíduo de fresagem. As maiores variações entre o solo puro e as misturas se encontra nas frações de pedregulho e de argila, o que pode ser mais bem visualizado no histograma da Figura 42.

Da Figura 41, nota-se, também, uma tendência a formação de pequeno patamar próximo ao diâmetro de dois milímetros com o aumento o teor de resíduo de fresagem das misturas, o que está relacionado a uma tendência a falta de grãos desse diâmetro. Isto indica que, para misturas com teores de resíduo de fresagem além de 50%, esse patamar pode aumentar e as misturas apresentarão, então, uma graduação mais pobre.

Figura 41: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro

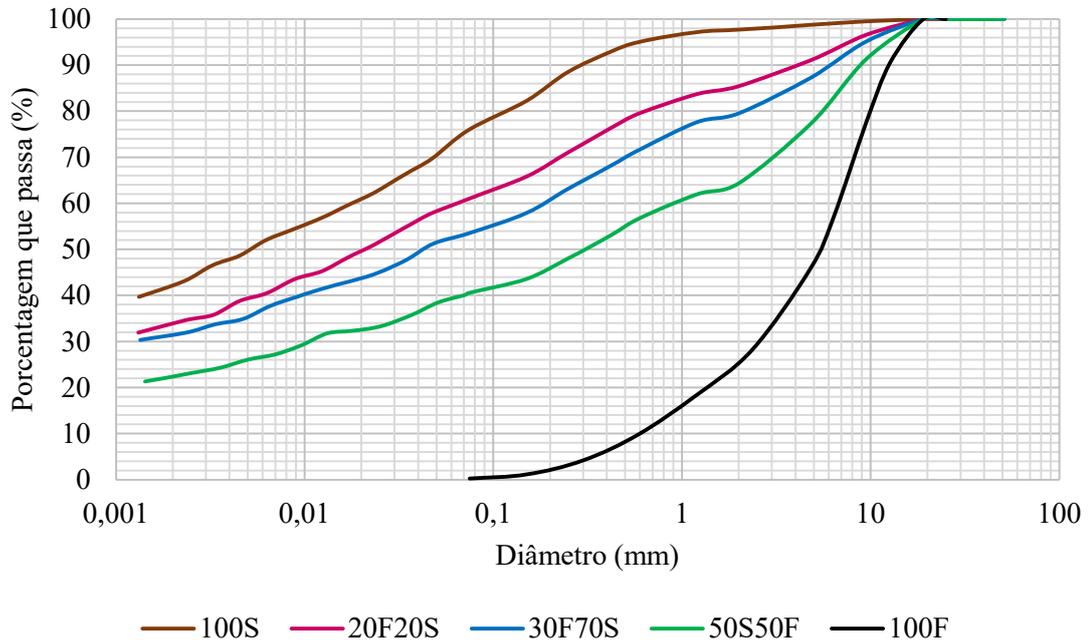
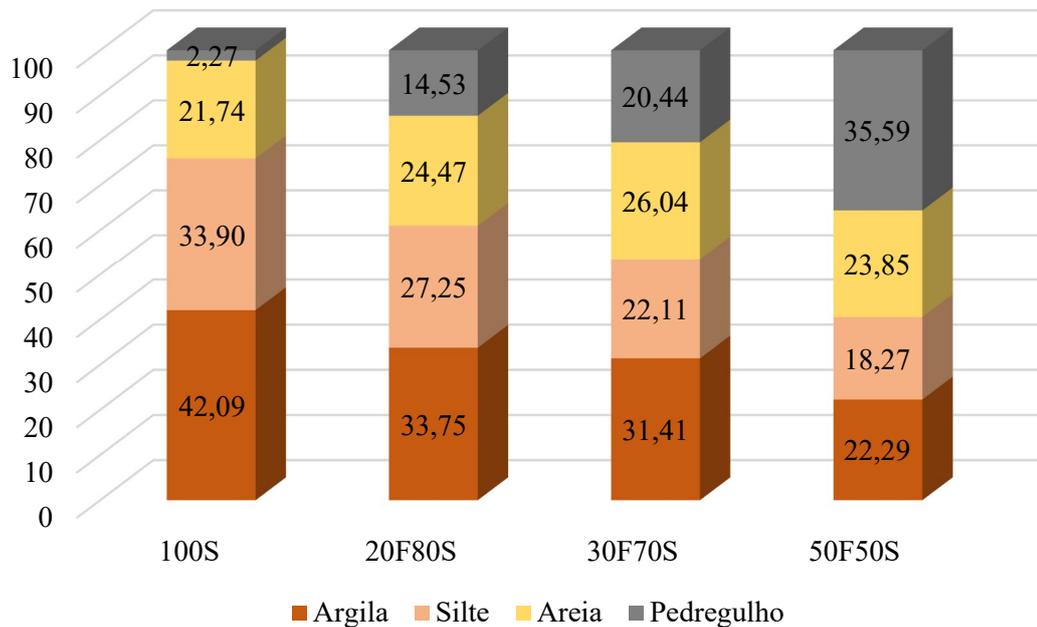


Tabela 22: Resultados da análise granulométrica das misturas solo-resíduo de fresagem

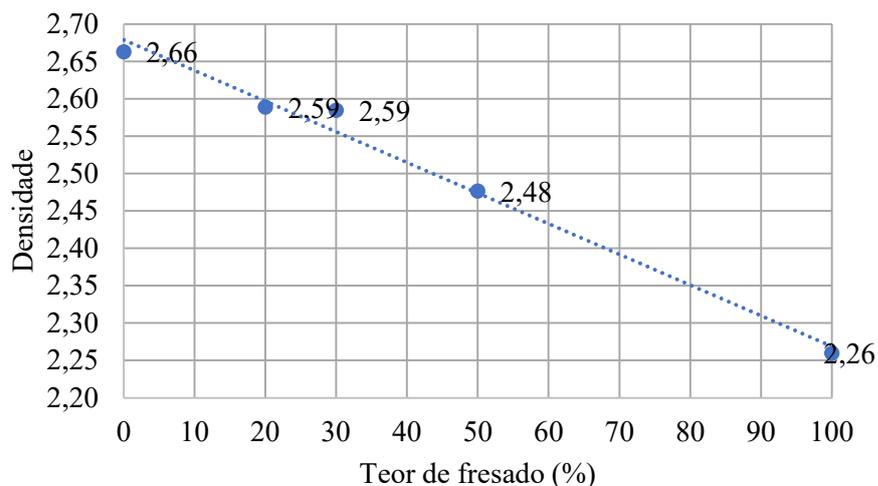
Peneira	Porcentagem que passa (%)		
	20F80S	30F70S	50F50S
2"	100,00	100,00	100,00
1 ½"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
¾"	100,00	100,00	100,00
3/8"	96,60	95,19	91,35
nº 4	91,11	87,29	77,26
nº 10	85,47	79,56	64,41
nº 16	83,74	77,64	61,99
nº 30	79,62	71,77	56,86
nº 40	76,36	68,19	53,11
nº 60	71,13	63,24	48,08
nº 100	65,85	57,94	43,63
nº 200	61,00	53,52	40,56

Figura 42: Histograma da granulometria do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem



Com relação às densidades reais obtidas para as misturas, percebe-se que o aumento do teor de resíduo de fresagem acarreta a diminuição dos valores de densidade real dos grãos, o que pode ser justificado pela menor massa específica do resíduo de fresagem. Esta ocorrência também foi verificada por Alhaji e Alhassan (2018), Mahasneh (2016) e Mousa *et al.* (2017). No presente caso, verifica-se uma relação quase que linear entre o aumento do teor de resíduo de fresagem e a diminuição da densidade, como se pode ver na Figura 43.

Figura 43: Relação entre a densidade real dos grãos e o teor de resíduo de fresagem das misturas solo-resíduo de fresagem



Os resultados dos ensaios de limites de Atterberg para o solo puro e as misturas solo-resíduo de fresagem estão apresentados na Tabela 23. Verifica-se que, assim como o solo, as misturas também são classificadas como altamente plásticas. No entanto, o aumento do teor de resíduo

de fresagem nas misturas provoca uma redução nos valores de LL e de IP e isso se deve à característica granular do resíduo de fresagem. O LP das misturas, por sua vez, mostrou-se menos sensível ao aumento dos teores de resíduo de fresagem. Tal comportamento pode ser atribuído a alta porcentagem passante na peneira #40 do solo em relação à porcentagem do material fresado.

Tabela 23: Limites de consistência para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem

Misturas	LL (%)	LP (%)	IP (%)
100S	51	23	28
20F80S	49	23	26
30F70S	48	21	27
50F50S	46	21	25

A Tabela 24, a seguir, apresenta a classificação das misturas segundo a metodologia AASHTO. Nota-se que, mesmo com a incorporação do resíduo de fresagem nas misturas até o teor de 50%, a classificação de nenhuma das misturas foi alterada em relação ao solo puro, permanecendo a predominância da fração argilosa, embora a mistura 50F50S já presente, em termos percentuais, a fração areia equiparada à fração argila. Segundo a classificação AASHTO, as misturas classificadas como A-7-6 apresentam comportamento geral como subleito de fraco a pobre.

Tabela 24: Classificação do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem

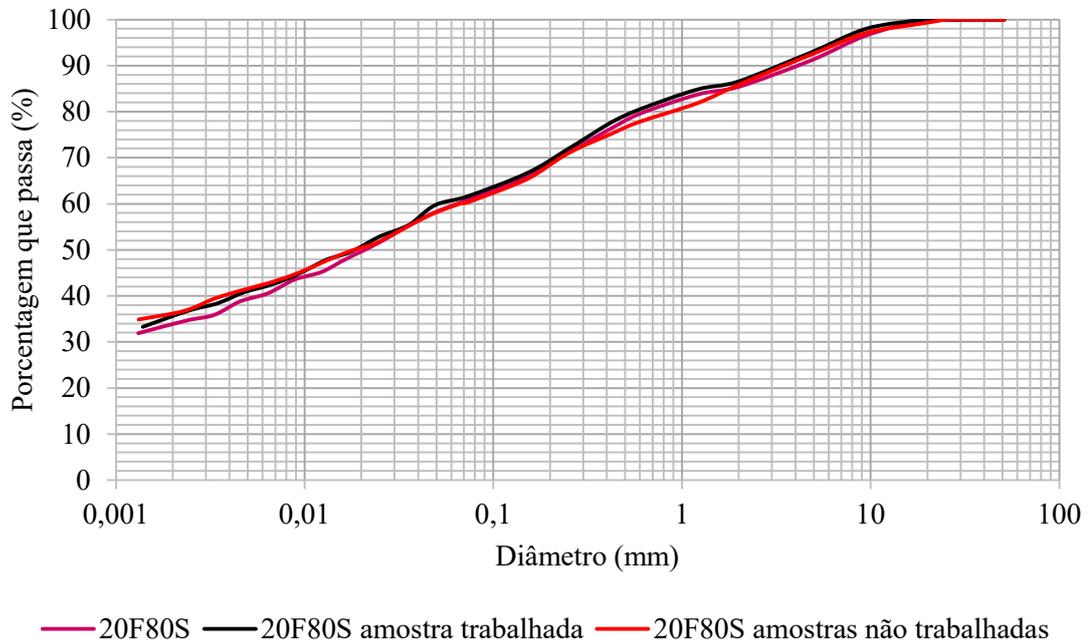
Misturas	Composição granulométrica			LL (%)	IP (%)	IG	Classificação AASHTO
	% que passa nas peneiras						
	#10	#40	#200				
100S	97,73	92,97	75,99	51	28	18	A-7-6
20S80F	85,47	76,36	61,00	49	26	13	A-7-6
30S70F	79,56	68,19	53,52	48	27	11	A-7-6
50F50S	64,41	53,11	40,56	46	25	6	A-7-6

Durante a realização dos ensaios desta pesquisa, notou-se certa tendência a fragmentação do resíduo de fresagem, seja por desfazimento de grumos, seja por descolamento do asfalto aderido ao agregado. Assim procedeu-se, também, com a análise granulométrica de amostras das misturas solo-resíduo de fresagem após serem submetidas a ensaios de compactação, utilizando a energia modificada, com amostras trabalhadas e com amostras não trabalhadas. Para o caso da compactação realizada com amostras não trabalhadas, buscou-se analisar as amostras referentes aos pontos mais próximos das massas específicas secas máximas e dos teores de umidade ótimos das misturas solo-resíduo de fresagem.

Ao analisar as curvas granulométricas da mistura 20F80S original e após a compactação com amostra trabalhada e amostras não trabalhadas, apresentadas na Figura 44, não se verifica muita diferença entre elas, o que é esperado, visto que a incorporação de apenas 20% de resíduo de

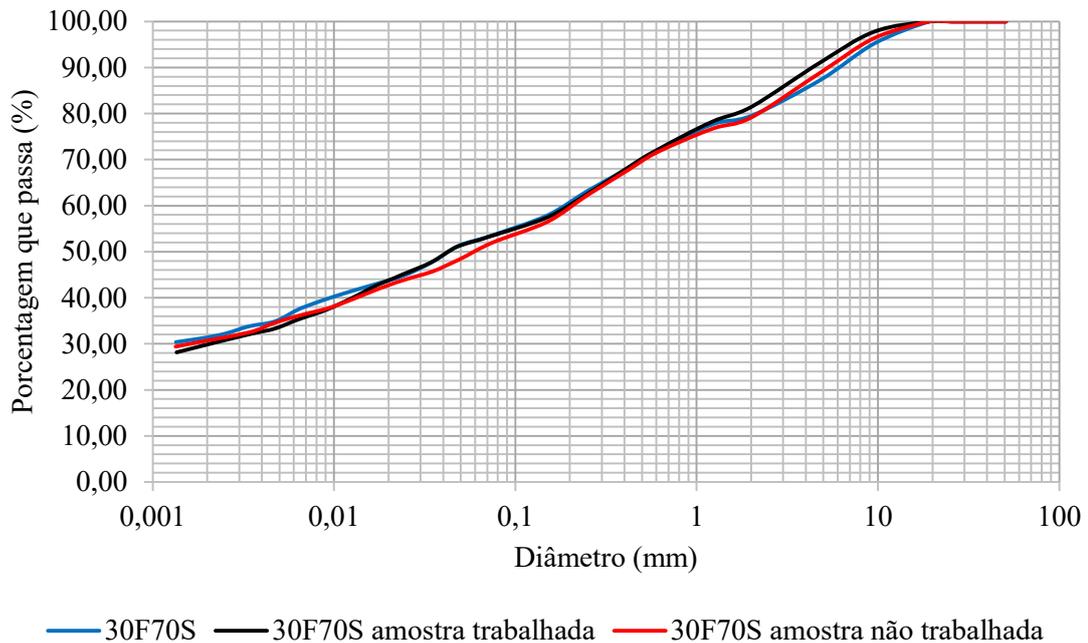
fresagem na mistura não provocaria grandes alterações na mistura, pois a quantidade de solo, que não apresentou tendência de fragmentação, é predominante.

Figura 44: Curvas granulométricas da mistura 20F80S



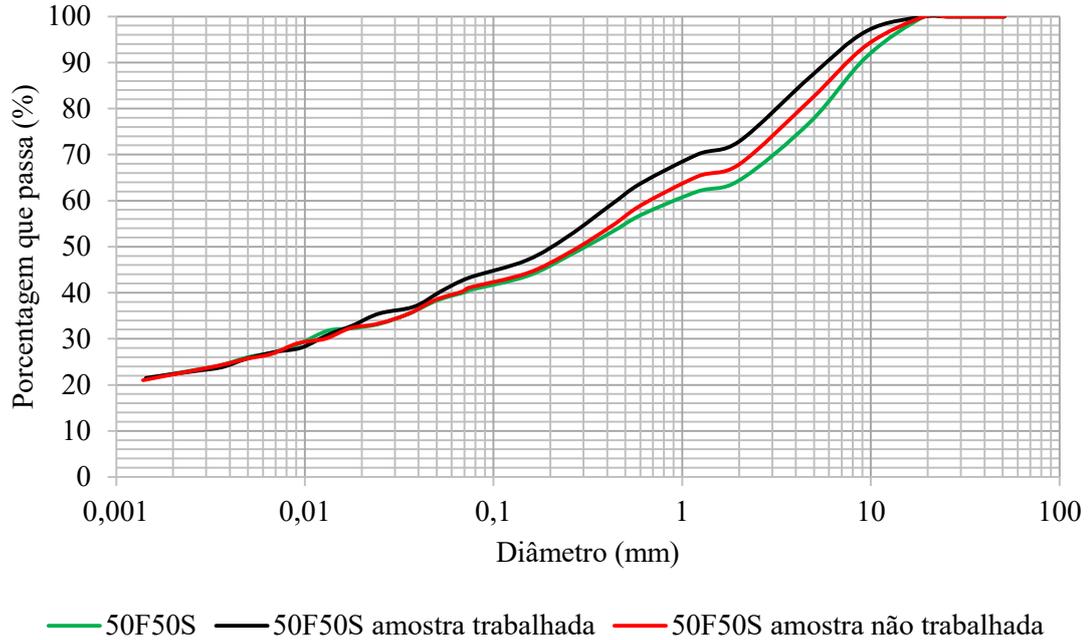
Entre as curvas granulométricas da mistura 30F70S original e após a compactação com amostra trabalhada e amostras não trabalhadas, apresentadas na Figura 45, também não se verificam grandes diferenças, o que, mais uma vez, é justificado pela predominância do solo. No entanto, já começa a ser observado um discreto distanciamento na parte das curvas correspondente à fração pedregulho, sendo que a curva para amostra compactada trabalhada apresenta leve redução desta fração em relação à mistura original e à amostra compactada não trabalhada, indicando quebra dos grumos do resíduo de fresagem.

Figura 45: Curvas granulométricas da mistura 30F70S



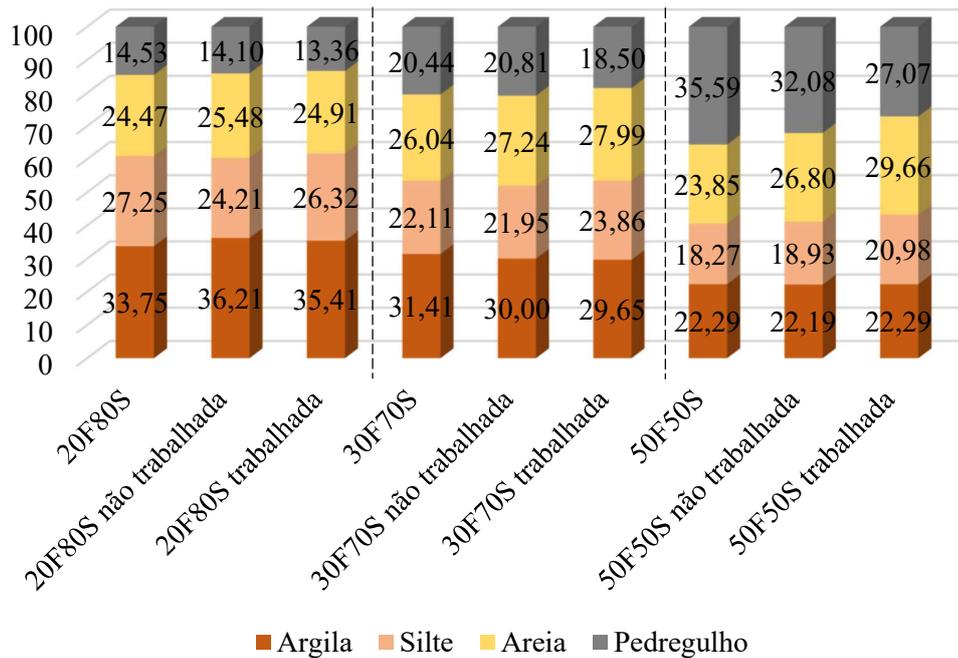
A Figura 46 apresenta as curvas granulométricas da mistura 50F50S original e após a compactação com amostra trabalhada e amostras não trabalhadas. Aqui já se torna mais evidente que há quebra dos grumos do resíduo de fresagem durante a compactação, em especial quando é realizada com amostras trabalhadas, que foram submetidas à energia modificada por pelo menos cinco vezes. As frações pedregulho e areia são as mais afetadas, sendo observada redução na porcentagem de pedregulhos e aumento na porcentagem de areia. Verifica-se a curva granulométrica da amostra submetida à compactação com amostra trabalhada se desloca para cima em relação às demais no trecho correspondente às frações pedregulho e areia, mostrando que há maior porcentagem de material com diâmetros menores. Uma vez que amostra não trabalhada foi submetida à compactação com energia modificada apenas uma vez, sua curva granulométrica apresenta um menor deslocamento para cima em relação à mistura original, o que se traduz em menor ocorrência de quebra de grumos.

Figura 46: Curvas granulométricas da mistura 50F50S



O histograma apresentado na Figura 47 facilita a compreensão das diferenças observadas nas granulometrias das amostras originais em relação às amostras submetidas a ensaios de compactação. Verifica-se que quanto maior o teor de resíduo de fresagem, maiores são as diferenças na granulometria das amostras compactadas em relação às amostras originais. Ainda, as amostras trabalhadas apresentam diferenças mais evidentes.

Figura 47: Histograma da granulometria das amostras de misturas solo-resíduo de fresagem originais e submetidas a ensaios de compactação



Na Tabela 25 estão reunidas as informações necessárias para classificação das misturas segundo a metodologia AASHTO. Verifica-se que a alteração na granulometria das amostras submetidas a compactação não muda a classificação das misturas. As amostras trabalhadas das misturas apresentaram discreta tendência de aumento da plasticidade em relação às amostras originais, o que pode ser explicado pela mudança da composição do material passante na peneira nº 40 devido à fragmentação dos grumos causada pela compactação.

Tabela 25: Classificação do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem originais e submetidas a ensaios de compactação

Misturas	Composição granulométrica				LL (%)	IP (%)	IG	Classificação AASHTO
	% que passa nas peneiras							
	#4	#10	#40	#200				
100S	98,75	97,73	92,97	75,99	51	28	18	A-7-6
20F80S	91,11	85,47	76,36	61,00	49	26	13	A-7-6
20F80S não trabalhada	92,40	85,90	75,21	60,42	47	27	13	A-7-6
20F80S trabalhada	92,88	86,64	77,66	61,73	50	29	15	A-7-6
30F70S	87,29	79,56	68,19	53,52	48	27	11	A-7-6
30F70S não trabalhada	88,90	79,19	67,81	51,95	46	27	11	A-7-6
30F70S trabalhada	91,12	81,50	68,39	53,51	51	32	13	A-7-6
50F50S	77,26	64,41	53,11	40,56	46	25	6	A-7-6
50F50S não trabalhada	82,04	67,92	54,44	41,12	44	27	6	A-7-6
50F50S trabalhada	87,05	72,93	59,16	43,27	47	29	8	A-7-6

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-RESÍDUO DE FRESAGEM-CIMENTO

Realizou-se, também, ensaios de caracterização das amostras das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento submetidas ao ensaio de compactação com amostras não trabalhadas que mais se aproximaram da massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo das misturas. Os ensaios de caracterização foram realizados após o destorroamento do material e em sete dias da moldagem.

Para facilitar a comparação, a Figura 48 apresenta as curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro, enquanto a Tabela 26 detalha o percentual de material das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento passante em cada peneira. A Figura 49 apresenta um histograma com o resumo da granulometria do solo, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento, segundo a escala granulométrica da AASHTO.

Percebe-se que a inclusão do cimento nas misturas provoca um deslocamento ainda maior das curvas granulométricas para baixo, tornando-as mais granulares. Quando se compara as

misturas com cimento e sem cimento, verifica-se expressivos aumentos da fração areia e reduções da fração argila, o que pode ser mais bem visualizado no histograma da Figura 49.

Figura 48: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro

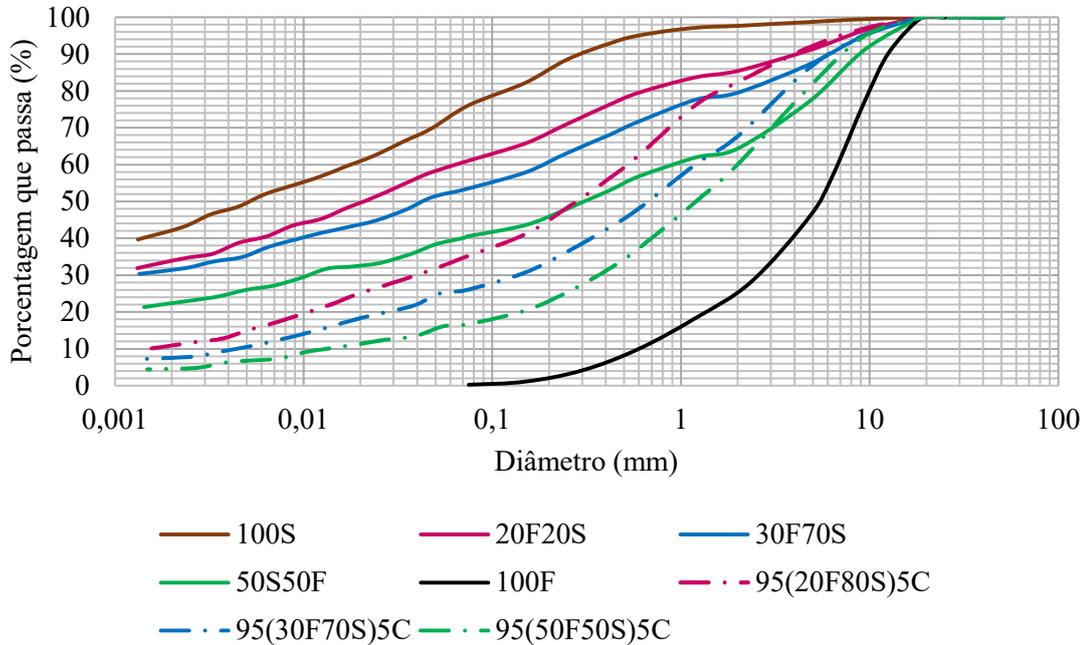
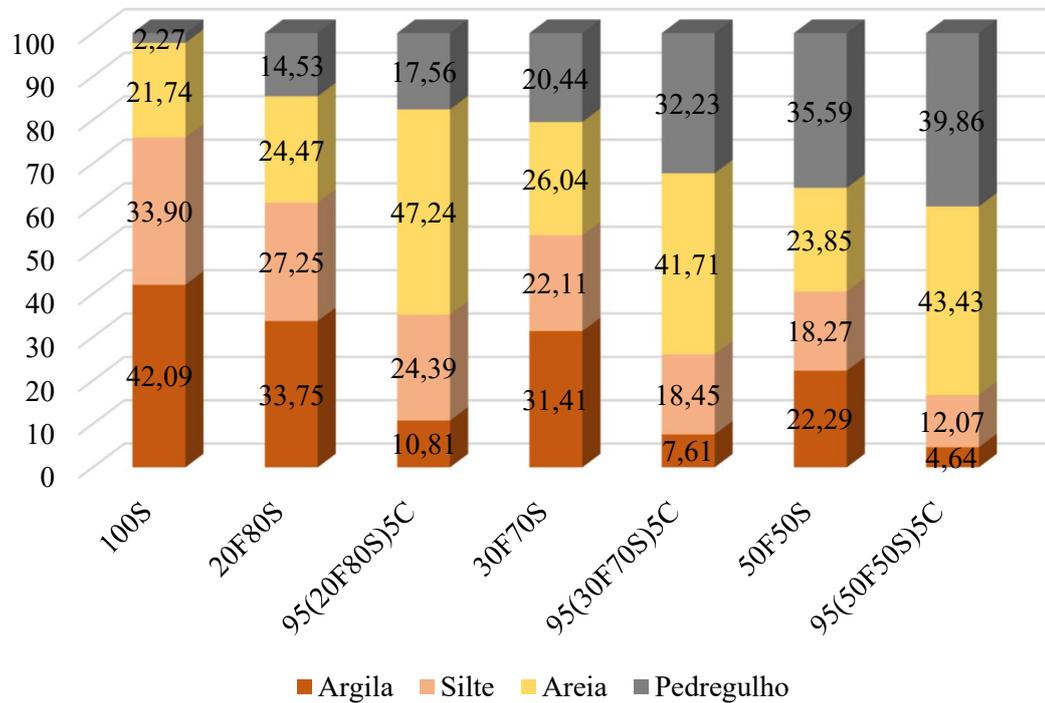


Tabela 26: Resultados da análise granulométrica das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Peneira	Porcentagem que passa (%)					
	20F80S	95(20F80S)5C	30F70S	95(30F70S)5C	50F50S	95(50F50S)5C
2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 ½"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
¾"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	96,60	97,07	95,19	95,36	91,35	95,11
nº 4	91,11	91,93	87,29	86,32	77,26	81,17
nº 10	85,47	82,44	79,56	67,77	64,41	60,14
nº 16	83,74	76,28	77,64	60,19	61,99	50,04
nº 30	79,62	62,63	71,77	48,18	56,86	37,40
nº 40	76,36	56,41	68,19	43,05	53,11	31,86
nº 60	71,13	48,36	63,24	36,43	48,08	25,42
nº 100	65,85	41,18	57,94	30,79	43,63	20,47
nº 200	61,00	35,20	53,52	26,06	40,56	16,71

Figura 49: Histograma da granulometria do solo, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento



Os resultados dos ensaios de limites de Atterberg para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento estão apresentados na Tabela 27. Segundo Yoder e Witzak (1975), o cimento normalmente provoca redução do LL e aumento do LP, com conseqüente redução do IP.

Verifica-se, no presente caso, uma redução no LL e no IP quando se compara com os valores obtidos para as amostras sem cimento, o que é esperado, tendo em vista que a adição de cimento alterou a granulometria do material, elevando consideravelmente as porcentagens da fração areia para as três misturas. O LP das misturas, que já havia se mostrado menos sensível ao aumento dos teores de resíduo de fresagem, também se mostrou pouco sensível à adição de 5% de cimento, com tendência discreta de aumento. Ainda, a adição de cimento alterou a classificação das misturas, antes altamente plásticas, para medianamente plásticas. Percebe-se, também, que, ao adicionar 5% de cimento nas misturas, o aumento no teor de resíduo de fresagem exerce menos influência nos limites de Atterberg.

Tabela 27: Limites de consistência para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Misturas	LL (%)	LP (%)	IP (%)
95(20F80S)5C	35	22	13
95(30F70S)5C	35	22	13
95(20F80S)5C	34	23	11

A Tabela 28, a seguir, apresenta a classificação das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento segundo a metodologia AASHTO. A adição de cimento nas misturas provoca alteração

das classificações das misturas devido à alteração nas suas granulometrias, havendo, agora, a predominância da fração areia.

A mistura 95(20F80S)5C foi classificada como A-2-6 pela proximidade com a percentagem passante na #200 (35%, no máximo, de acordo com a classificação AASTHO). Porém, ao analisar a classificação A-6, esta mistura também se aproxima. No entanto, dada a percentagem do material passante na referida peneira, julga-se mais coerente que a mistura em análise seja classificada como A-2-6.

As misturas 95(30F70S)5C e 95(50F50S)5C também foram classificadas como A-2-6, ou seja, como areias em que os finos constituem característica secundária. As misturas classificadas como A-2-6 apresentam percentagem de material passante na peneira nº 200 de no máximo 35%, LL no máximo 40%, IP no mínimo 11%, IG máximo igual a quatro. De acordo com a metodologia AASHTO, os solos classificados como A-2-6 apresentam comportamento geral de excelente a bom como subleito.

Tabela 28: Classificação das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Misturas	Composição granulométrica			LL (%)	IP (%)	IG	Classificação AASHTO
	% que passa nas peneiras						
	#10	#40	#200				
<b>95(20S80F)5C</b>	82,44	56,41	35,20	35	13	1	A-2-6
<b>95(30S70F)5C</b>	67,77	43,05	26,06	35	13	1	A-2-6
<b>95(50F50S)5C</b>	60,14	31,86	16,71	34	11	1	A-2-6

## 4.5 COMPACTAÇÃO

### 4.5.1 Compactação do solo puro

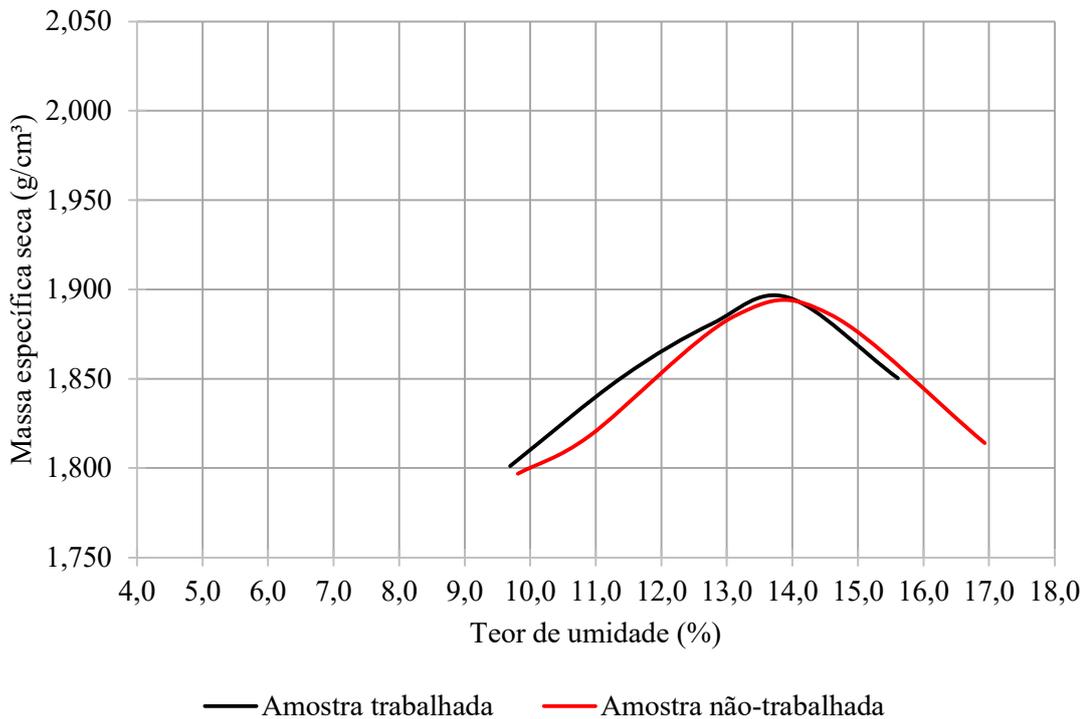
Com o solo puro foram realizados ensaios de compactação com amostra trabalhada e com amostras não trabalhadas. Para o ensaio com amostra trabalhada, verificou-se massa específica seca máxima igual a 1,897 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade ótimo igual a 13,7%. Já no ensaio realizado com amostras não trabalhadas, obteve-se resultados de massa específica seca máxima igual a 1,894 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade ótimo igual a 13,9%. A Figura 50 apresenta as curvas de compactação obtidas. Percebe-se que as duas curvas se assemelham e que não há diferença entre os resultados de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo obtidos nas duas condições de ensaio.

Segundo Pinto (2006), solos com características argilosas apresentam massas específicas secas máximas baixas e umidades ótimas elevadas, sendo que valores de massas específicas

secas máximas entre 1,4 g/cm<sup>3</sup> e 1,5 g/cm<sup>3</sup> e teores de umidade ótimos entre 25% e 30% são comuns. Os resultados obtidos para o solo puro utilizado na pesquisa não apresentam massas específicas secas máximas baixas como as relatadas pelo citado autor, tampouco apresentam teores de umidades ótimos tão elevados. No entanto, é pertinente ressaltar que, na presente pesquisa, foi utilizada a energia de compactação modificada, a maior dentre as três previstas nos normativos. Ao adotar energias de compactação mais elevadas, obtém-se maiores massas específicas secas máximas e menores teores de umidades ótimos.

O solo utilizado na presente pesquisa recebeu a mesma classificação AASHTO que os solos utilizados por Alhaji e Alhassan (2018) e Mahasneh (2016), qual seja A-7-6. Verifica-se que os resultados de compactação obtidos para o solo puro se aproximaram muito dos resultados obtidos por Alhaji e Alhassan (2018) ( $\rho_{dm\acute{a}x} = 1,890$  g/cm<sup>3</sup> e  $h_{\acute{o}t} = 13,7\%$ ), que também utilizou a energia modificada nos seus ensaios. Já Mahasneh (2016), que fez uso da energia normal, obteve resultados ( $\rho_{dm\acute{a}x} = 1,58$  g/cm<sup>3</sup> e  $h_{\acute{o}t} = 22,22\%$ ) mais compatíveis com os citados por Pinto (2006).

Figura 50: Curvas de compactação para o solo puro



#### 4.5.2 Compactação das misturas solo-resíduo de fresagem

Para as misturas solo-resíduo de fresagem, também foram realizados ensaios de compactação com amostra trabalhada e com amostras não trabalhadas. Para facilitar a

comparação, na Tabela 29, encontra-se um resumo dos resultados de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem. Por sua vez, as Figuras 51 e 52 apresentam as curvas de compactação obtidas para o solo e para as misturas, utilizando-se amostras trabalhadas e amostras não trabalhadas, respectivamente.

Tabela 29: Resultados dos ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem

Misturas	Amostra trabalhada		Amostras não trabalhadas	
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$h_{ot}$ (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$h_{ot}$ (%)
100S	1,897	13,7	1,894	13,9
20F80S	1,905	13,2	1,920	12,9
30F70S	1,990	9,5	1,920	12,3
50F50S	2,023	8,6	1,940	11,1

Figura 51: Curvas de compactação com amostras trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem

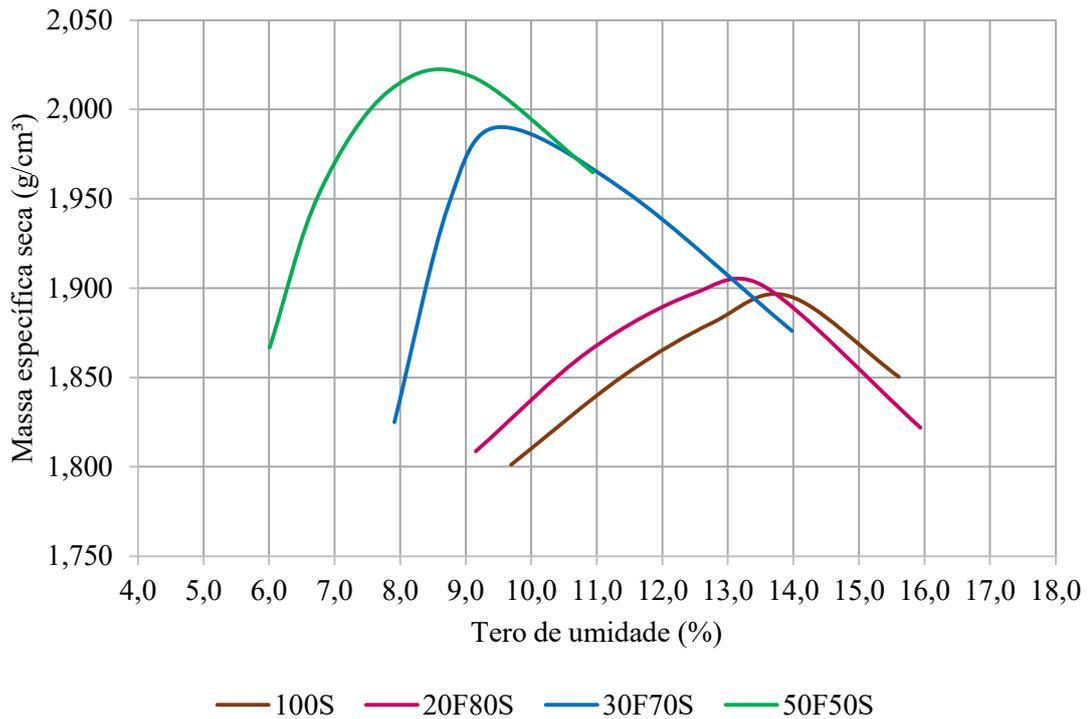
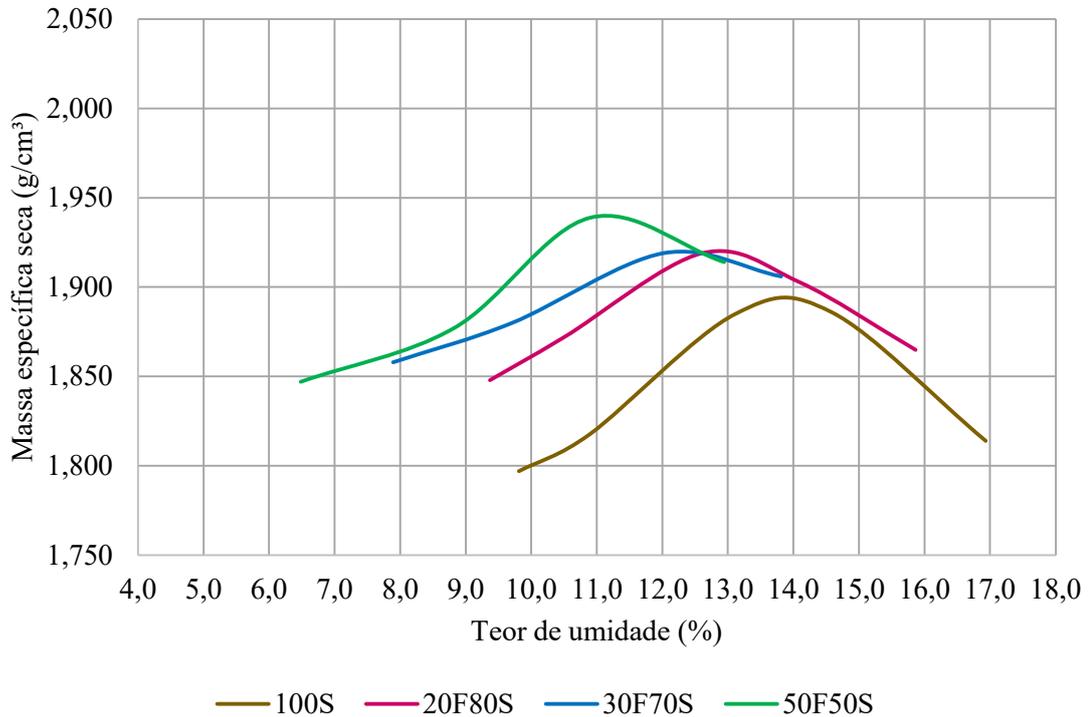


Figura 52: Curvas de compactação com amostras não trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem



Verifica-se que, tanto no ensaio com amostra trabalhada, quanto no ensaio com amostras não trabalhadas, o aumento do teor de resíduo de fresagem das misturas provoca um aumento da massa específica seca máxima e uma redução do teor de umidade ótimo. Esta constatação permite interpretar que o incremento do teor de resíduo de fresagem, até 50%, provoca uma estabilização das misturas, ou seja, os vazios entre os grãos maiores, provenientes do resíduo de fresagem, são preenchidos pelos grãos menores do solo e, assim, obtém-se um melhor entrosamento dos grãos e maior densificação do material. Além disso, o aumento do teor de fresado faz com que seja reduzida a porcentagem de material fino, mais absorvente, e elevada a porcentagem de material mais grosso de baixa absorção nas misturas, reduzindo-se, assim, o teor de umidade ótimo.

Tendo em vista que os estudos de Alhaji e Alhassan (2018) e Alhaji *et al.* (2019) apontaram que, a partir de determinada proporção, a qualidade das misturas, em termos de resultados de compactação, sofria redução, pode-se concluir que, para os teores das misturas do presente estudo, esse limiar não foi alcançado. Não se descarta, porém, a possibilidade de ocorrência deste fenômeno para teores mais elevados de resíduos de fresagem nas misturas.

Conforme se verifica na Tabela 29, para a mistura 20F80S, no que diz respeito à compactação com amostra trabalhada, foram encontrados valores de massa específica seca máxima igual a 1,905 g/cm³ e teor de umidade ótima igual a 13,2%, o que se traduz em aumento

de  $0,008 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e em redução de 0,5 ponto percentual no teor de umidade ótimo em relação ao solo puro. Para o ensaio realizado com amostras não trabalhadas, obteve-se massa específica seca máxima igual a  $1,920 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 12,9%, o que significa um aumento de  $0,026 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e uma redução de 1,0 ponto percentual no teor de umidade ótimo em relação ao solo puro.

A mistura 30F70S, quando compactada com amostra trabalhada, apresentou massa específica seca máxima igual a  $1,990 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 9,5%, ou seja, comparando-se com o solo puro, apresentou aumento de  $0,093 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e redução igual a 4,2 pontos percentuais no teor de umidade ótimo. Quando utilizadas amostras não trabalhadas, os valores obtidos para massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo foram iguais a  $1,920 \text{ g/cm}^3$  e 12,3%, respectivamente, representando aumento de  $0,026 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e redução de 1,6 pontos percentuais no teor de umidade ótimo em relação ao solo puro. Comparando-se com a mistura 20F80S, observou-se, para o ensaio com amostra trabalhada, aumento de  $0,085 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e redução de 3,7 pontos percentuais no teor de umidade ótimo. Para o ensaio com amostras não trabalhadas, verificou-se que não houve alteração na massa específica seca máxima entre as misturas 30F70S e 20F80S, que pode ser justificado pela pequena diferença entre os teores das misturas, mas houve redução de 0,6 ponto percentual no teor de umidade ótimo.

Já a mistura 50F50S, na compactação com amostra trabalhada, apresentou massa específica seca máxima igual a  $2,023 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 8,6%, representando aumentos iguais a  $0,126 \text{ g/cm}^3$ ,  $0,118 \text{ g/cm}^3$  e  $0,033 \text{ g/cm}^3$  para a massa específica seca máxima e reduções de 5,1, 4,6 e 0,9 pontos percentuais para o teor de umidade ótimo em relação aos resultados obtidos para o solo puro e para as misturas 20F80S e 30F70S, respectivamente. Na compactação com amostras não trabalhadas, apresentou massa específica seca máxima igual a  $1,940 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 11,1%, representando aumentos iguais a  $0,046 \text{ g/cm}^3$ ,  $0,020 \text{ g/cm}^3$  e  $0,020 \text{ g/cm}^3$  para a massa específica seca máxima e reduções de 2,8, 1,8 e 1,2 pontos percentuais para o teor de umidade ótimo em relação aos resultados obtidos para o solo puro e para as misturas 20F80S e 30F70S, respectivamente.

Percebe-se, também, que o efeito do aumento do teor de resíduo de fresagem exerce influência muito maior na queda do teor de umidade ótimo do que no aumento da massa específica seca máxima das misturas. As massas específicas secas máximas das misturas pouco se alteram entre si.

Entretanto, há que se observar a diferença encontrada nos resultados de compactação para as misturas solo-resíduo de fresagem quando se utiliza amostra trabalhada ou amostras não trabalhadas. A Figura 50 apresenta curvas de compactação muito parecidas para o solo puro nas duas condições, porém, quando se analisa as curvas apresentadas nas Figuras 53, 54 e 55, referentes às misturas 20F80S, 30F70S e 50F50S, percebe-se que, à medida que o teor de resíduo de fresagem das misturas aumenta, as curvas de compactação para ensaio realizado com amostras não trabalhadas e com amostra trabalhada se distanciam mais entre si.

Observa-se um deslocamento para baixo e para a direita das curvas de compactação com amostras não trabalhadas em relação às curvas de compactação com amostras trabalhadas, indicando que as misturas submetidas a ensaios com as amostras não trabalhadas apresentaram menores massas específicas secas máximas e maiores teores de umidade ótimos. Exceção se verifica na mistura 20F80S, em que a curva para o ensaio com amostra não trabalhada apresentou maior massa específica seca máxima e menor teor de umidade ótimo. No entanto, dado que a mistura contém apenas 20% de resíduo de fresagem, o solo exerce maior influência neste resultado e, portanto, são verificadas curvas ainda muito semelhantes para o ensaio com amostra trabalhada e com amostras não trabalhadas.

O deslocamento das curvas de compactação com amostras não trabalhadas em relação às curvas de compactação com amostras trabalhadas pode ser explicado por uma provável quebra dos grumos do resíduo de fresagem da amostra trabalhada, que foi submetida à energia de compactação modificada e desmanchada por, pelo menos cinco vezes, provocando uma maior densificação do material pelo rearranjo das partículas e redução dos vazios. À medida que o teor de resíduo de fresagem aumenta, exerce maior influência nas misturas e, por isso, são observados maiores deslocamentos das curvas para maiores teores de resíduo de fresagem.

Sabe-se que a forma das curvas de compactação varia com o tipo de solo, sendo fortemente influenciada pela granulometria e pela plasticidade do material. Assim, em geral, materiais argilosos apresentam curvas mais abatidas, enquanto materiais arenosos apresentam curvas com um pico mais bem definido. Comparando-se as curvas de compactação com amostras trabalhadas e amostras não trabalhadas, percebe-se que, para uma mesma mistura, as curvas de compactação com amostras não trabalhadas são abatidas em relação às curvas de compactação com amostras não trabalhadas, o que reforça a justificativa de ter havido quebra dos grumos maiores devido à compactação, provocando alterações na fração areia e pedregulho das misturas.

Segundo Pinto (2006), o ensaio de compactação realizado com amostras não trabalhadas apresenta um resultado mais fiel, sendo imprescindível quando as partículas são facilmente

quebradiças. Para a presente pesquisa, é importante considerar que a energia modificada pode ter provocado a quebra dos grumos do resíduo de fresagem. Tendo em vista que este é constituído de agregado e asfalto, o esforço aplicado na compactação também provoca desprendimento de fragmentos de asfalto antes aderido ao agregado.

Figura 53: Curvas de compactação para a mistura 20F80S

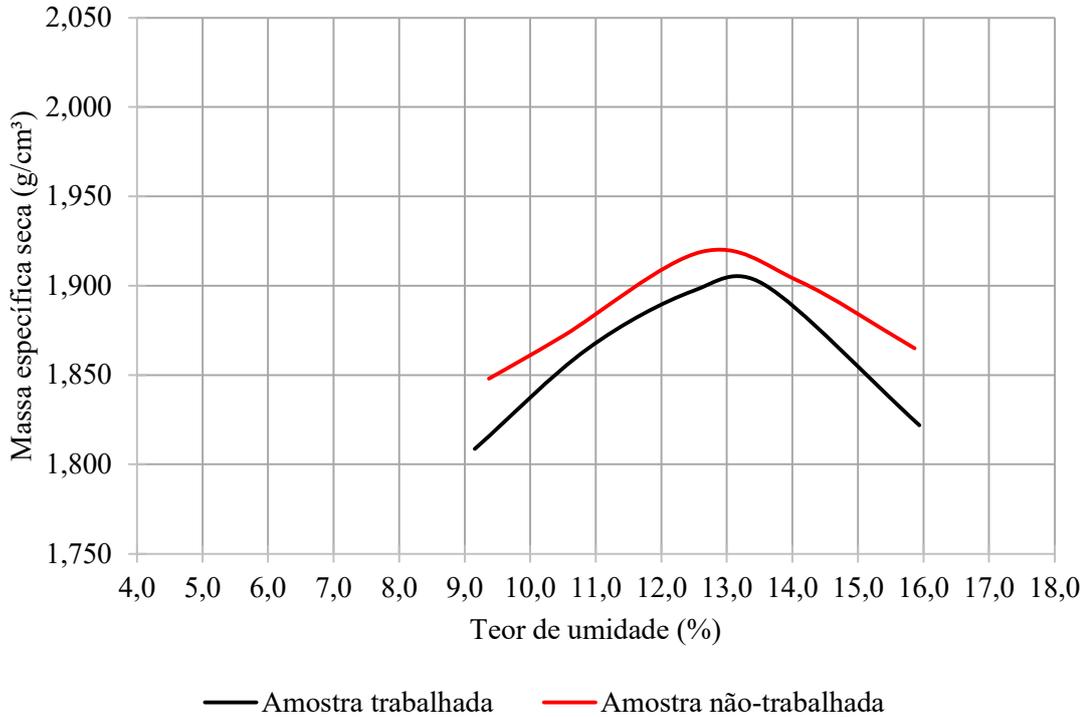


Figura 54: Curvas de compactação para a mistura 30F70S

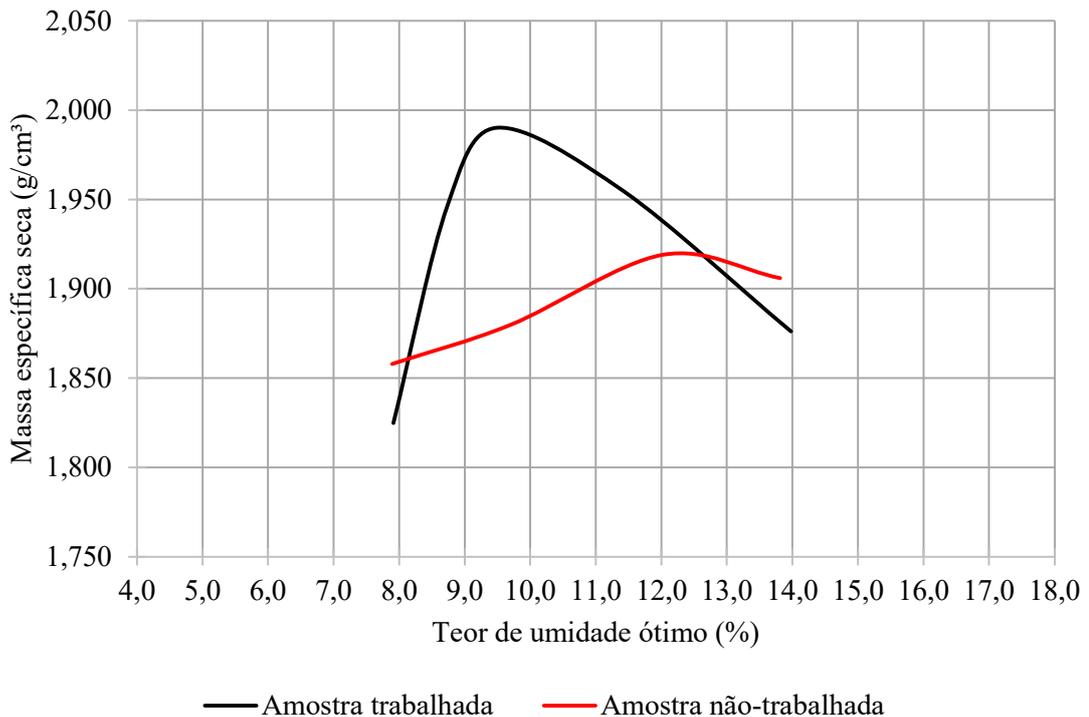
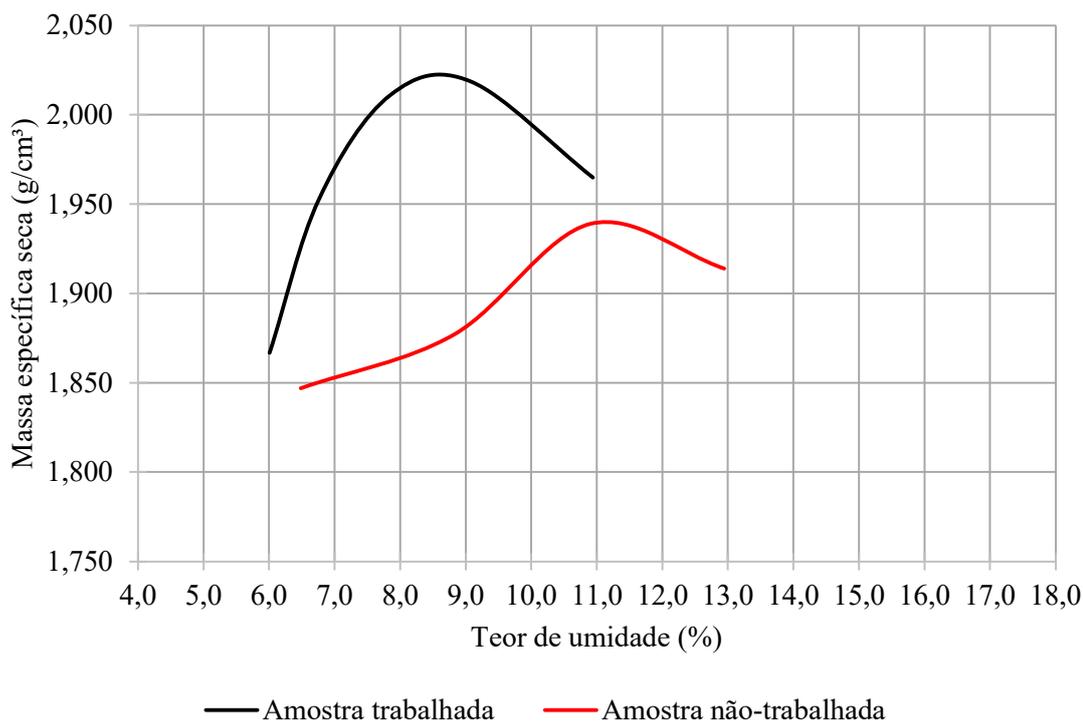


Figura 55: Curvas de compactação para a mistura 50F50S



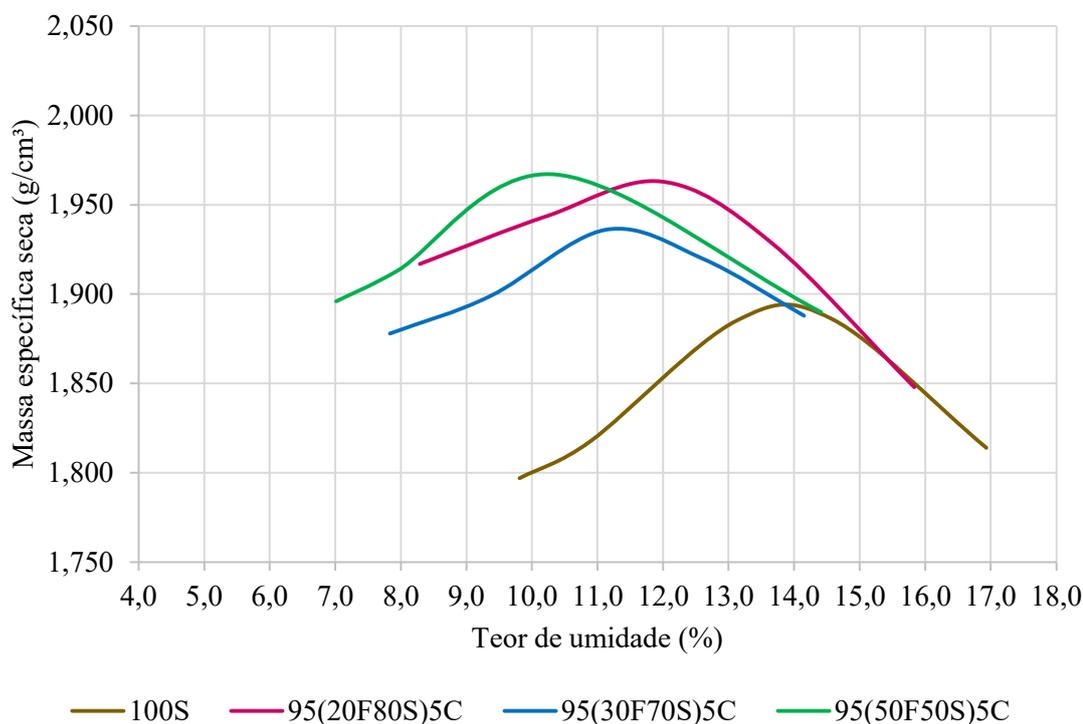
#### 4.5.3 Compactação das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Com as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento foram realizados ensaios de compactação com amostras não trabalhadas. A Tabela 30 apresenta os resultados de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo para cada mistura, enquanto as curvas de compactação podem ser observadas na Figura 56.

Tabela 30: Resultados dos ensaios de compactação com amostras não trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Misturas	Amostras não trabalhadas	
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$h_{ot}$ (%)
100S	1,894	13,9
95(20F80S)5C	1,963	12,0
95(30F70S)5C	1,938	11,3
95(50F50S)5C	1,967	10,3

Figura 56: Curvas de compactação com amostras não trabalhadas para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento



A mistura 95(20F80S)5C apresentou massa específica seca máxima igual a  $1,963 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 12,0%, ou seja, em relação ao solo puro, apresentou aumento de  $0,069 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e uma redução de 1,9 pontos percentuais no teor de umidade ótima. Quando se compara com a mistura 20F80S, verifica-se um aumento de  $0,043 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e uma redução de 0,9 ponto percentual no teor de umidade ótima.

Já a mistura 95(30F70S)5C apresentou massa específica seca máxima igual a  $1,938 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 11,3%, o que representa aumento de  $0,044 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e redução de 2,6 pontos percentuais no teor de umidade ótima em relação ao solo puro. Quando se compara com a mistura 30F70S, verifica-se um aumento de  $0,018 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e uma redução de 1,0 ponto percentual no teor de umidade ótimo.

A mistura 95(50F50S)5C apresentou massa específica seca máxima igual a  $1,967 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo igual a 10,3%, o que representa aumento de  $0,073 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e redução de 3,6 pontos percentuais no teor de umidade ótima em relação ao solo puro. Quando se compara com a mistura 50F50S, verifica-se um aumento de  $0,027 \text{ g/cm}^3$  na massa específica seca máxima e uma redução de 0,8 ponto percentual no teor de umidade ótimo.

Observa-se que, como esperado, não há maiores diferenças entre os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo obtidos para as misturas com cimento quando se compara com as misturas sem cimento correspondentes. Segundo O'Flaherty (2002), as misturas de solo tratado com cimento apresentam relação entre umidade e massa específica similar à do solo puro. Ingles e Metcalf (1972) defendem que a quantidade de água a ser utilizada na estabilização de solo com cimento é relacionada à quantidade requerida para compactação, e não para a hidratação do cimento. Horpibulsuk *et al.* (2010), ao avaliarem a resistência de uma argila siltosa altamente plástica estabilizada com cimento, verificaram que a umidade ótima das misturas para diferentes teores de cimento pouco se alterou, inclusive quando comparada ao solo puro.

As curvas apresentadas na Figura 56 mostram uma tendência de aumento da massa específica seca máxima e diminuição do teor de umidade ótimo com o aumento do teor de resíduo de fresagem das misturas, assim como ocorreu nas misturas que continham apenas solo e resíduo. No entanto, verificou-se que a massa específica seca máxima da mistura 95(30F70S)5C se apresentou ligeiramente inferior à massa específica seca máxima da mistura 95(20F80S)5C, com diferença de 0,025 g/cm<sup>3</sup> no valor. Tendo em vista que a diferença entre as misturas é de apenas 10% de resíduo de fresagem; que diferença na massa específica seca máxima destas misturas foi pequena; e que foram obtidos valores iguais de massa específica seca máxima (1,920 g/cm<sup>3</sup>) nas misturas correspondentes sem cimento (20F80S e 30F70S), julga-se se tratar de resultado coerente, cuja divergência pode ser causada por questões relacionadas à amostragem. Apesar disso, o teor de umidade ótimo da mistura 95(30F70S)5C é menor que o da mistura 95(20F80S)5C, mantendo a coerência dos resultados, tendo em vista que o incremento do teor de resíduo de fresagem reduz a porcentagem de material fino e absorvente e aumenta a porcentagem de material grosso e pouco absorvente.

Assim como ocorreu para as misturas sem cimento, o efeito do aumento do teor de resíduo de fresagem exerceu influência maior na queda do teor de umidade ótimo do que no aumento da massa específica seca máxima das misturas.

## 4.6 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

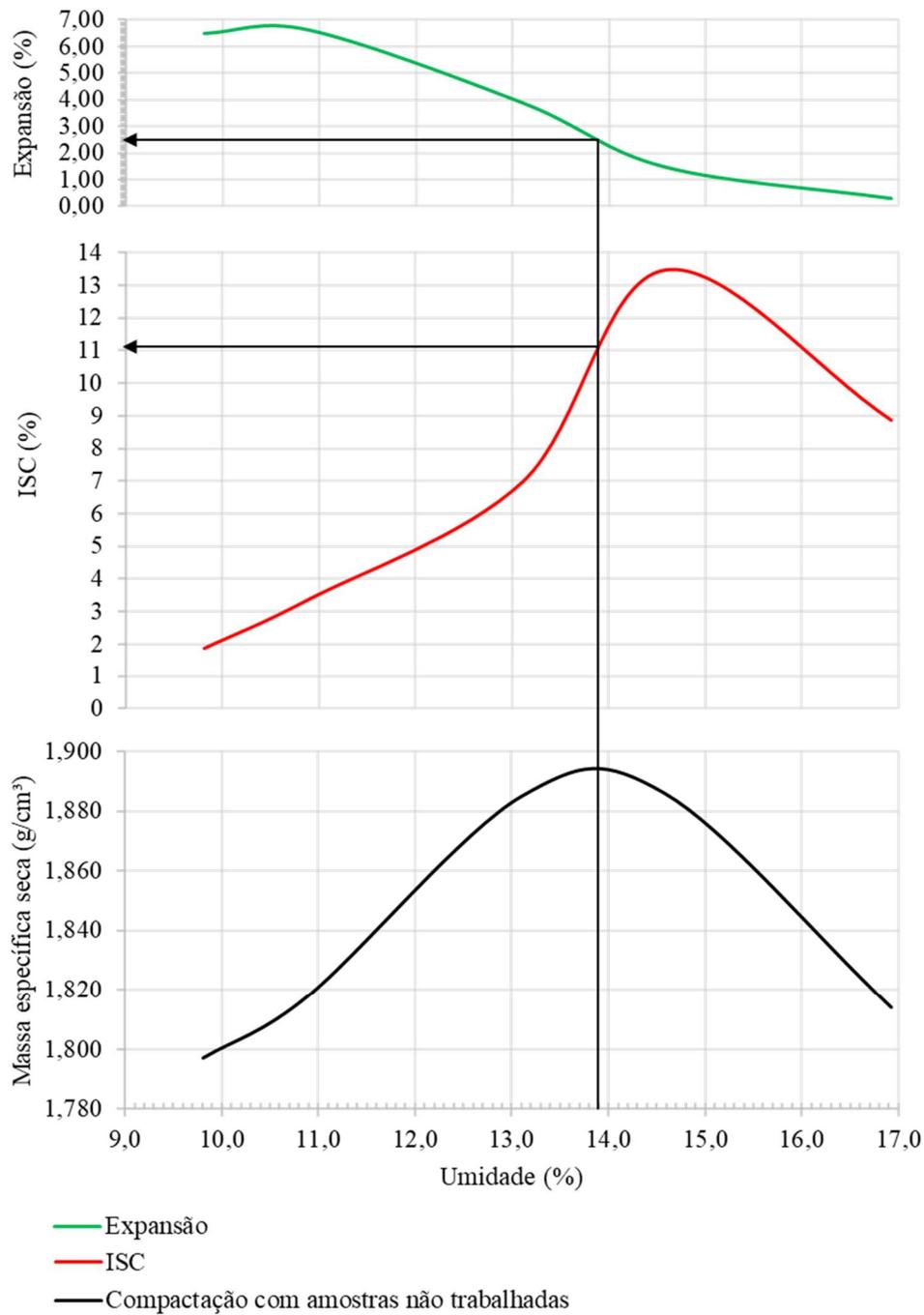
### 4.6.1 Índice de Suporte Califórnia do solo puro

A Figura 57 apresenta as curvas de compactação, ISC e expansão para o solo puro quando utilizada a energia modificada para compactação. Do ensaio, foram obtidos resultados de ISC igual a 11% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 2,5%.

A norma DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a) especifica que, para que um material possa ser utilizado em uma sub-base estabilizada granulometricamente, é necessário que apresente ISC maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual a 1% quando compactado com a energia intermediária ou maior. Já a norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b) condiciona que o material a ser utilizado em uma base estabilizada granulometricamente deva apresentar ISC maior ou igual a 80% ou, no caso de rodovias de baixo tráfego, ISC maior ou igual a 60%, além de expansão menor ou igual a 0,5% quando compactado com a energia modificada. Dessa forma, verifica-se que o solo puro não atende aos requisitos das citadas normas e, por isso, não poderia ser utilizado como material de base ou sub-base estabilizada granulometricamente.

Verifica-se que o ISC obtido para o solo puro, que foi classificado como A-7-6, se encontra dentro da faixa esperada apresentada por Liu (1967). Ainda, o solo estudado por Alhaji e Alhassan (2018), que recebeu a mesma classificação, também foi igual a 11%. No que diz respeito à variação volumétrica, o solo apresentou expansão elevada.

Figura 57: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para o solo puro



#### 4.6.2 Índice de Suporte Califórnia das misturas solo-resíduo de fresagem

A Tabela 31 apresenta os resultados de ISC e expansão no teor de umidade ótimo obtidos para o solo e para as misturas solo-resíduo de fresagem. Já as Figuras 58, 59 e 60 apresentam

as curvas de compactação, ISC e expansão obtidas para as misturas 20F80S, 30F70S e 50F50S, respectivamente.

Tabela 31: Valores de ISC e de expansão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem

Mistura	ISC (%)	Expansão (%)
100S	11	2,5
20F80S	15	2,0
30F70S	18	1,7
50F50S	28	0,4

Figura 58: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 20F80S

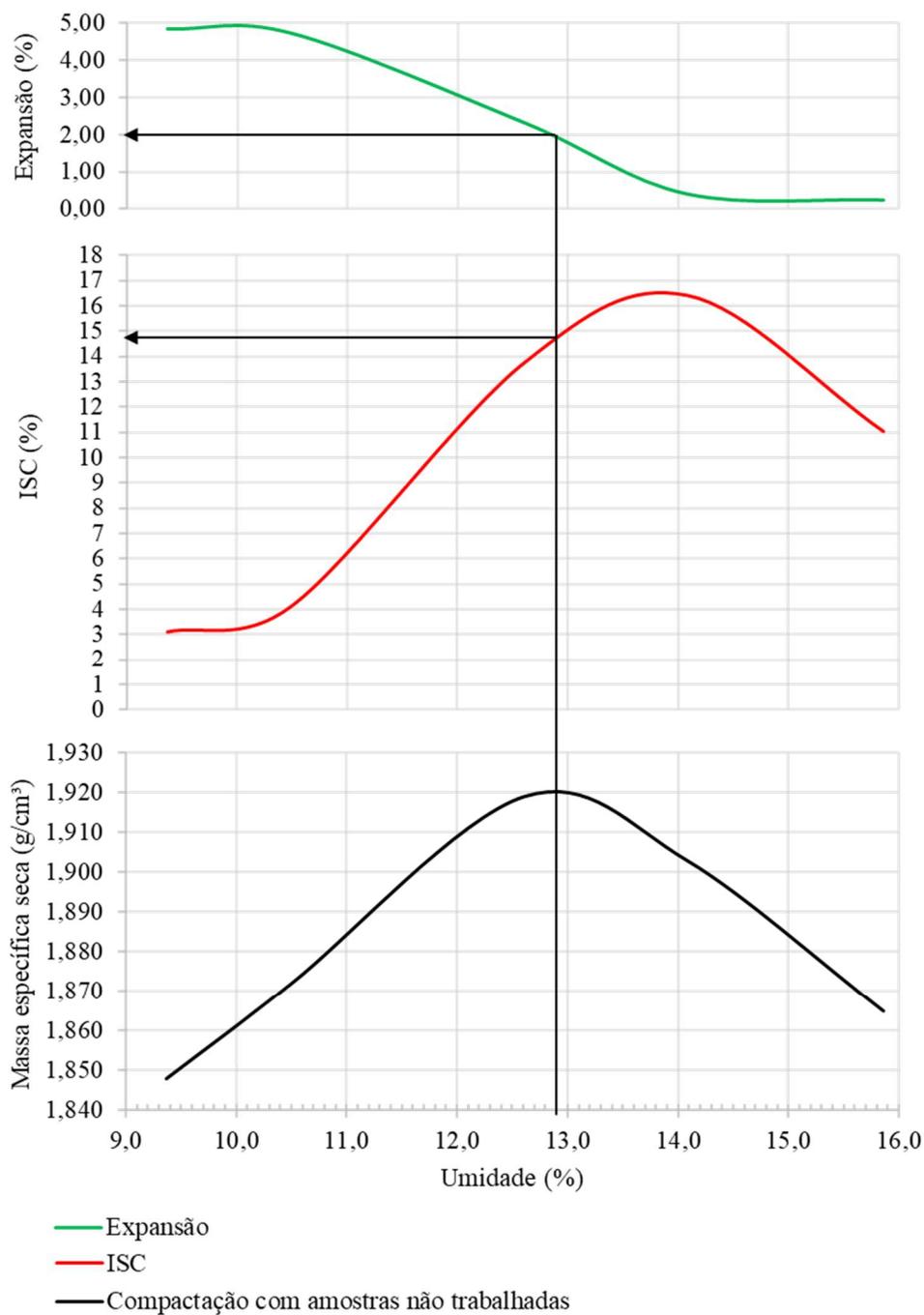


Figura 59: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 30F70S

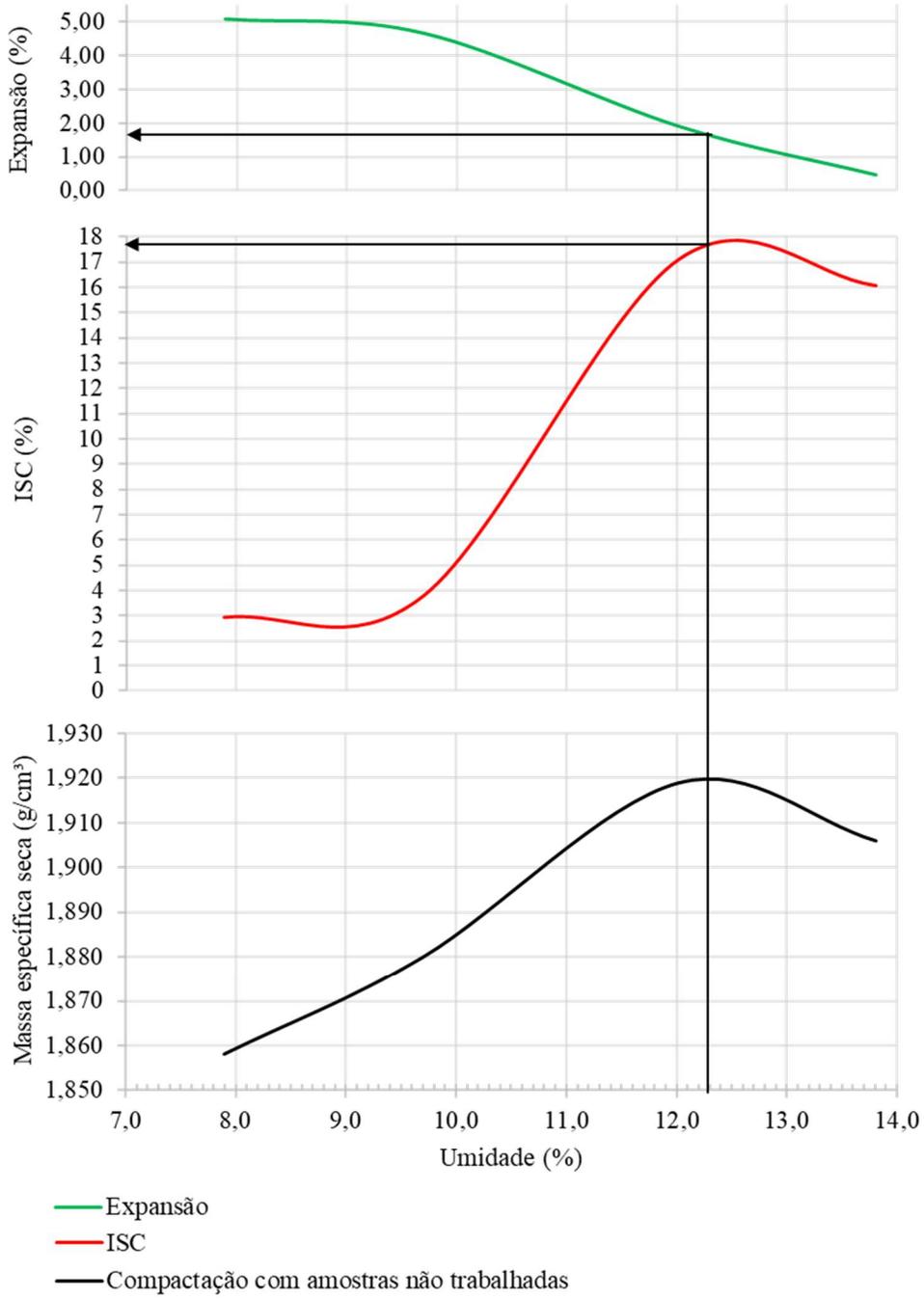
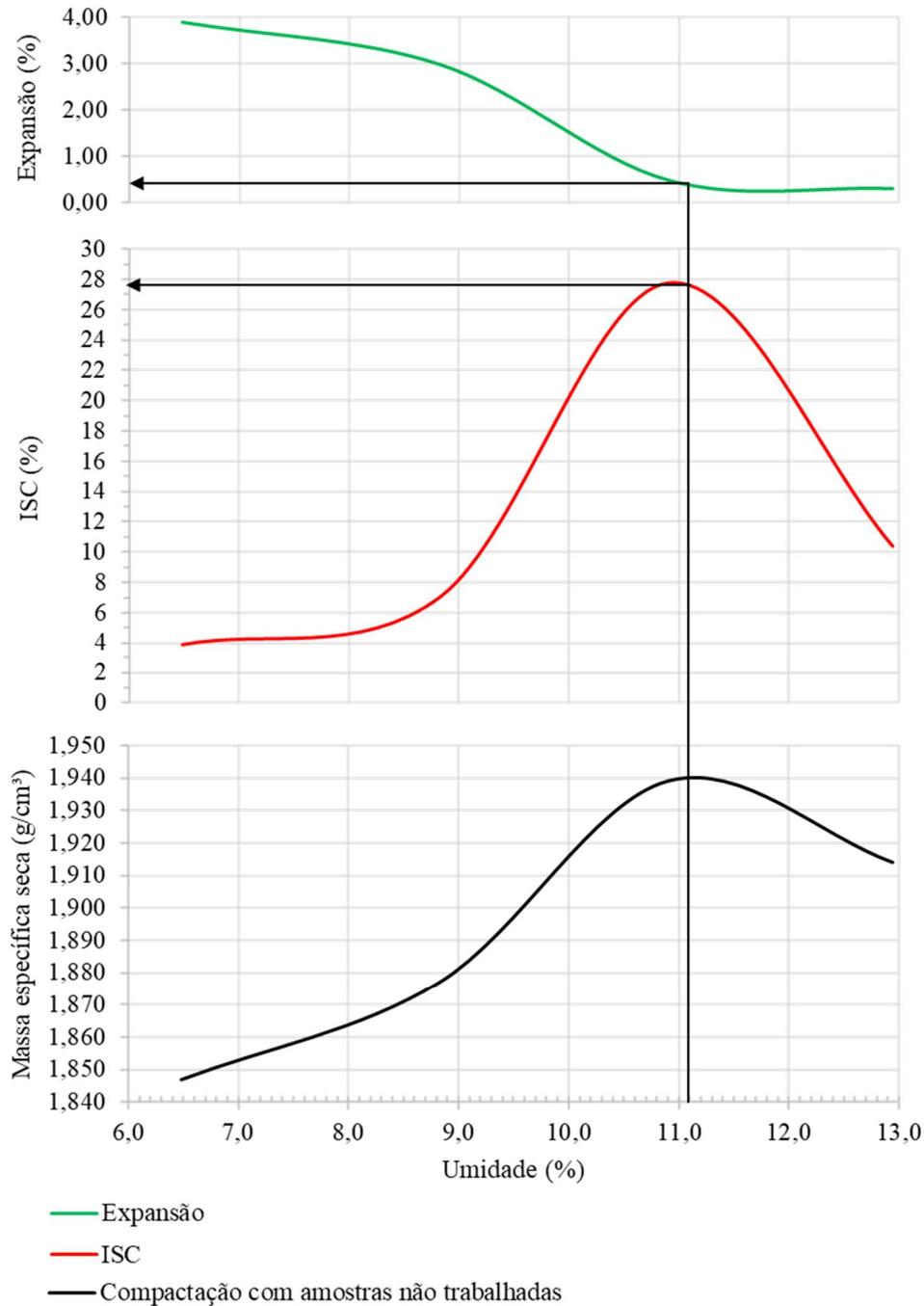


Figura 60: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 50F50S



A mistura 20F80S apresentou ISC igual a 15% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 2,0%, o que corresponde a um ganho de 4 pontos percentuais no ISC e queda de 0,5 ponto percentual na expansão em relação ao solo puro.

A mistura 30F70S, por sua vez, apresentou ISC igual a 18% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 1,7%, o que corresponde a um ganho de 7 pontos percentuais no ISC e queda de 0,8 ponto percentual na expansão em relação ao solo puro, além de ganho de 3 pontos percentuais no ISC e queda de 0,3 ponto percentual na expansão em relação à mistura 20F80S.

Já a mistura 50F50S apresentou ISC igual a 28% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 0,4%, o que corresponde a um ganho de 17 pontos percentuais no ISC e queda de 2,1 pontos percentuais na expansão em relação ao solo puro. Além disso, há ganho de 13 pontos percentuais no ISC e queda de 1,6 pontos percentuais na expansão em relação à mistura 20F80S e ganho de 10 pontos percentuais no ISC e queda de 1,3 pontos percentuais na expansão em relação à mistura 30F70S.

Ao aumentar o teor de resíduo de fresagem das misturas, observa-se um aumento nas suas resistências frente a deslocamentos significativos, bem como redução da expansão, o que se traduz em melhoria da qualidade do material. Esse comportamento pode ser explicado por um melhor entrosamento dos grãos provocado pelo aumento do teor de resíduo de fresagem nas misturas, bem como pela redução da fração argila, tornando-se misturas mais estabilizadas e menos expansivas. Vale ressaltar que, no ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia, deve-se ter em mente o efeito do confinamento do molde no ensaio que exerce influência na resistência do material.

Comparando misturas de mesma proporção solo/resíduo de fresagem, os valores de ISC obtidos para as misturas 20F80S e 30F70S são ligeiramente inferiores aos obtidos por Alhaji e Alhassan (2018), que misturou o resíduo de fresagem com um solo também classificado como A-7-6, mas o resultado obtido para a mistura 50F50S foi similar. Ainda os resultados são inferiores aos obtidos por Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016), Araújo Júnior, Ferreira e Silva (2018) e Seferoglu, Seferoglu e Akpınar (2018), porém estes autores utilizaram materiais granulares nas misturas com resíduo de fresagem, o que justifica os maiores valores de ISC.

Assim como verificado por Alhaji e Alhassan (2018), Ruknuddim *et al.* (2019) e Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016), o aumento do teor de resíduo de fresagem nas misturas aumentou o ISC, mas não foi observada queda a partir de determinada proporção como verificaram Alhaji e Alhassan (2018) e Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016). Assim como ocorreu para os ensaios de compactação das misturas solo-resíduo de fresagem, o aumento do teor de fresagem, até 50%, foi sempre benéfico, comportamento verificado também por Araújo Júnior, Ferreira e Silva (2018), que estudaram misturas cujos teores de resíduo de fresagem não ultrapassaram 50% e obtiverem valores de ISC ainda maiores que os aqui apresentados, uma vez que as misturas foram realizadas com uma areia. No entanto, não se descarta a possibilidade de ocorrência de queda no ISC para teores mais elevados de resíduos de fresagem nas misturas.

Ainda, embora a classificação das misturas solo-resíduo de fresagem não tenha sido alterada em relação ao solo, os ISC obtidos para as misturas 30F70S e 50F50S superaram os valores da faixa esperada apresentada por Liu (1967), Figura 10.

Com relação ao formato das curvas de Índice de Suporte Califórnia, percebe-se, nas Figuras 58, 59 e 60, que os picos destas curvas se situam à direita em relação à umidade ótima e, à medida em que o teor de resíduo de fresagem aumenta, o pico se desloca para a esquerda, até que para a mistura 50F50S (Figura 60), já se verifica que o pico da curva se encontra levemente à esquerda da umidade ótima.

A princípio, o fato de os picos das curvas de ISC se situarem à direita do teor de umidade ótimo, inclusive para o solo puro (Figura 57), causou estranheza, uma vez que Vargas (1978) afirma que os ISC obtidos com a saturação de corpos de prova compactados no ramo seco das curvas de compactação são maiores que os obtidos nos corpos de prova compactados no ramo úmido.

Por outro lado, Bernucci *et al.* (2008) comentam que solos que apresentam valores significativos de expansão sofrem deformações consideráveis quando solicitados e que há uma tendência de aumento do ISC com a redução da expansão axial. Assim, analisando as curvas de ISC juntamente com as de expansão, verifica-se que, para umidades correspondentes ao ramo seco da curva de compactação, o solo puro e as misturas apresentam expansão considerável, as quais decrescem até valores razoáveis para umidades além da ótima. Além de explicar a defasagem para a direita da curva de ISC em relação à curva de compactação para o solo e para as misturas 20F80S e 30F70S, essa constatação também explica a aproximação dos picos das curvas de ISC com os picos das curvas de compactação quando o teor de resíduo de fresagem aumenta. O incremento do teor de resíduo de fresagem nas misturas provoca redução da expansão e, assim, a perda de resistência se torna cada vez menor. A mistura 50F50S já começa a se comportar conforme citado por Vargas (1978), dado que apresenta expansões menores que o solo puro e demais misturas solo-resíduo de fresagem.

Segundo Yoder e Witzak (1975), algumas amostras compactadas com teores de umidade relativamente baixos apresentam maior expansão, ocasionando perda de resistência em relação a amostras compactadas com teores de umidade maiores. Assim, ao se deparar com solos com potencial de expansão, é importante que a compactação ocorra com teores de umidade próximos ou um pouco maiores que o teor de umidade ótima.

#### **4.6.3 Índice de Suporte Califórnia das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento**

As misturas solo-resíduo de fresagem-cimento também foram submetidas a ensaios de determinação de ISC. A Tabela 32 apresenta os valores de ISC e expansão obtidos para o solo puro e para as misturas 95(20F80S)5C, 95(30F70S)5C e 95(50F50S)5C, enquanto as Figuras

61, 62 e 63 apresentam as curvas de compactação com amostras não trabalhadas, ISC e expansão para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento.

Tabela 32: Valores de ISC e de expansão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Mistura	ISC (%)	Expansão (%)
100S	11	2,5
95(20F80S)5C	197	0,6
95(30F70S)5C	203	0,9
95(50F50S)5C	300	0,2

Figura 61: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 95(20F80S)5C

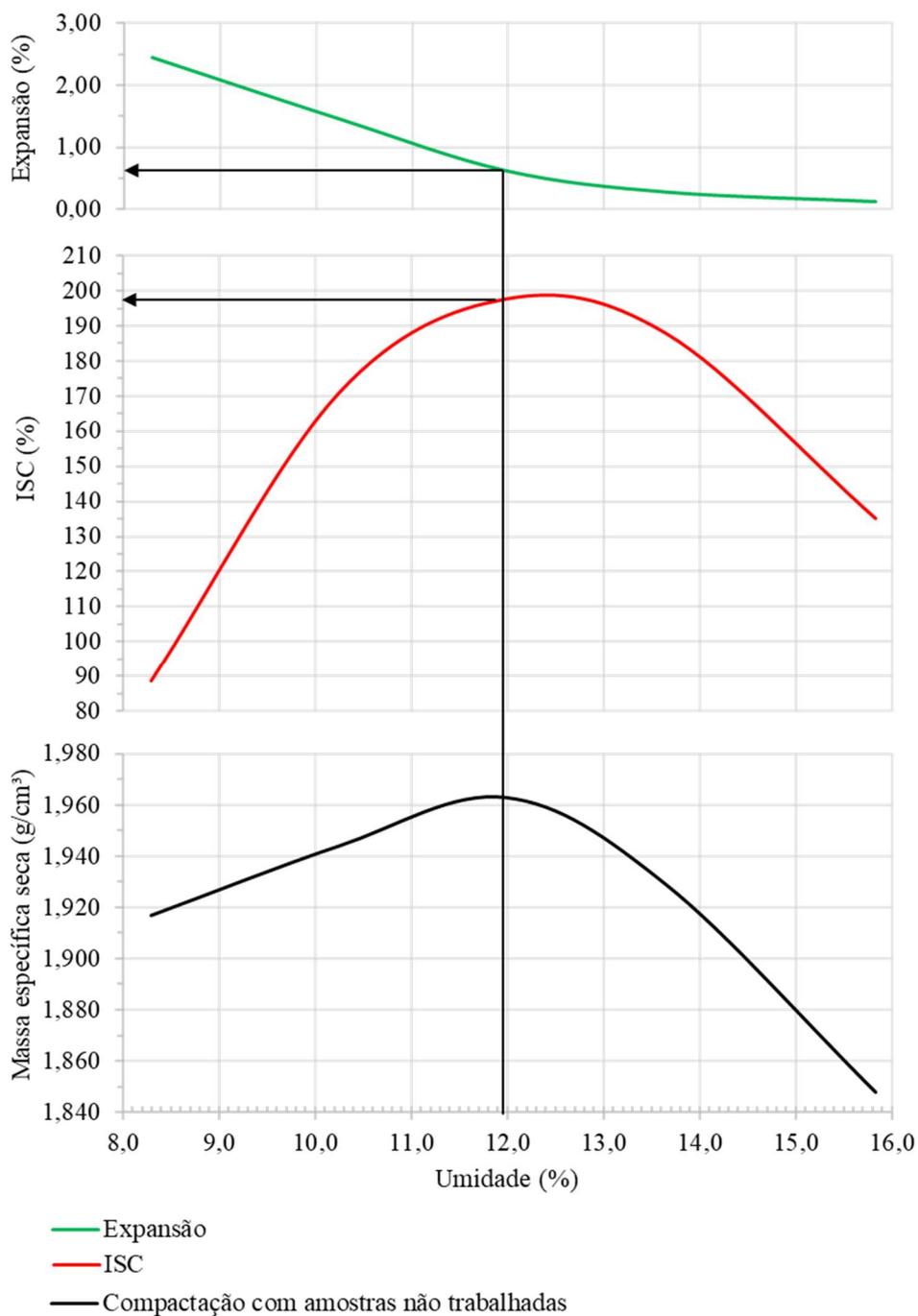


Figura 62: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 95(30F70S)5C

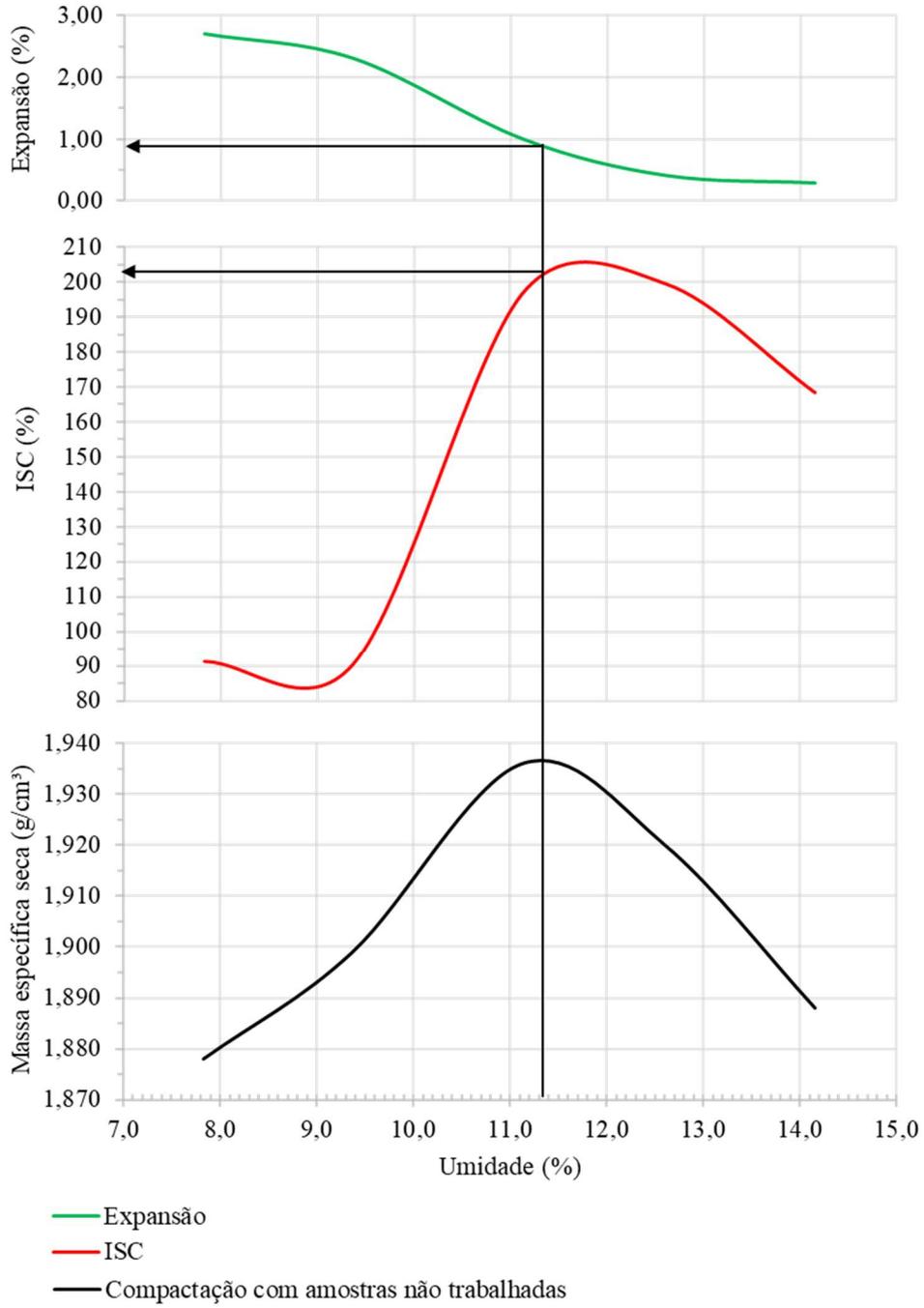
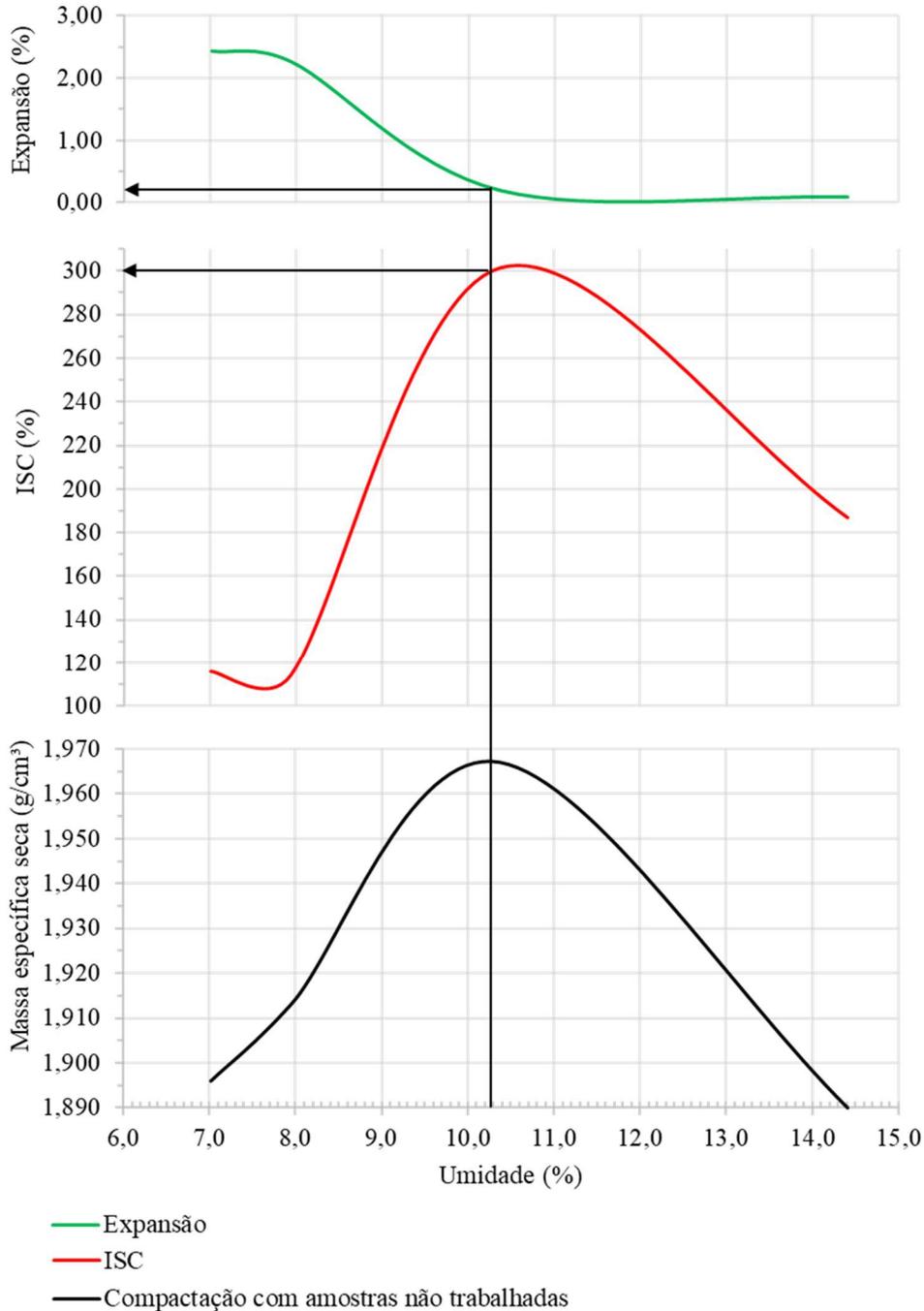


Figura 63: Curvas de compactação com amostra não trabalhada, ISC e expansão para a mistura 95(50F50S)5C



Percebe-se, também, que o ISC das misturas aumenta e a expansão diminui com o aumento do teor de resíduo de fresagem. Uma pequena discrepância é percebida para a expansão da mistura 95(30F70S)5C, que apresenta ligeiro aumento em relação à mistura 95(20F80S)5C. No entanto, esta diferença é pequena e pode ser justificada pela semelhança entre as misturas, que variam apenas em 10% de resíduo de fresagem, e por questões relacionadas a amostragem.

A mistura 95(20F80S)5C apresentou ISC igual a 197% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 0,6%, o que corresponde a um ganho de 186 pontos percentuais no ISC e queda de 1,9

pontos percentuais na expansão em relação ao solo puro. Quando se compara com a mistura 20F80S, verifica-se um ganho de 182 pontos percentuais no ISC e queda de 1,4 pontos percentuais na expansão.

A mistura 95(30F70S)5C, por sua vez, apresentou ISC igual a 203% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 0,9%, o que corresponde a um ganho de 192 pontos percentuais no ISC e queda de 1,6 pontos percentuais na expansão em relação ao solo puro, além de ganho de 85 pontos percentuais no ISC e queda de 0,8 ponto percentual na expansão em relação à mistura 30F70S.

Já a mistura 95(50F50S)5C apresentou ISC igual a 300% e expansão no teor de umidade ótimo igual a 0,2%, o que corresponde a um ganho de 289 pontos percentuais no ISC e queda de 2,3 pontos percentuais na expansão em relação ao solo puro. Além disso, há ganho de 272 pontos percentuais no ISC e queda de 0,2 pontos percentuais na expansão em relação à mistura 50F50S.

Assim como observado por Alhaji *et al.* (2019) e Moura *et al.* (2018), os resultados de ISC para as misturas contendo cimento são muito superiores aos resultados obtidos para o solo puro e para as misturas sem cimento, o que era esperado, visto que a adição do cimento altera a plasticidade do material, modifica sua granulometria, além de gerar produtos resistentes. Os resultados obtidos na presente pesquisa são ainda maiores que os resultados obtidos pelos autores citados, o que pode ser explicado pelo maior teor de cimento utilizado

Observa-se que o efeito da adição de cimento nas misturas foi maior no ISC do que na expansão. Embora as expansões obtidas nas misturas com cimento sejam menores, não variaram muito entre si e se assemelharam à expansão obtida para a mistura 50F50S, sem cimento.

#### 4.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Com as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento foram realizados ensaios de resistência à compressão simples com corpos de prova com idade de sete dias. Os resultados são mostrados na Tabela 33.

Tabela 33: Resistência à compressão simples das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Mistura	RCS (MPa)			RCS média (MPa)	Desvio Padrão
	1	2	3		
95(20F80S)5C	1,22	1,16	1,32	1,23	0,06
95(30F70S)5C	1,32	1,25	1,40	1,32	0,06
95(50F50S)5C	1,35	1,24	1,16	1,25	0,08

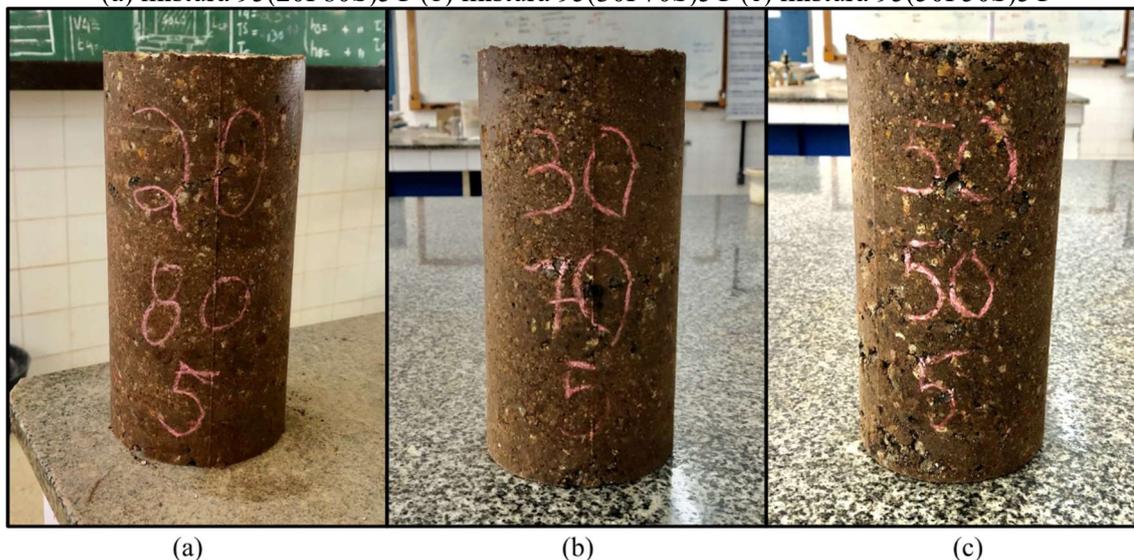
Verifica-se que a RCS aumenta com o incremento de teor de resíduo de fresagem até a porcentagem de 30%, caindo para a mistura contendo 50% de resíduo de fresagem. Este comportamento diverge, em parte, dos observados por Fedrigo (2015), Ghanizadeh, Rahrovan e Bafgui (2018) e Kasu, Manupati e Muppireddy (2020), que verificaram apenas queda na RCS com o aumento do teor de resíduo de fresagem nas misturas. No entanto, ressalta-se que os citados autores utilizaram materiais de granulção mais grossa para realizar as misturas com o resíduo de fresagem e, por isso, é coerente que haja divergência nos resultados. Maciel *et al.* (2018), que misturou resíduo de fresagem e cimento com um solo siltoso moderadamente plástico, verificou ganhos nas RCS com o aumento do teor de resíduo de fresagem.

É possível que o ganho resistência da mistura 95(30F70S)5C em relação à mistura 95(20F80S)5C seja decorrente da melhoria da granulometria e da plasticidade das misturas provocadas pela incorporação do resíduo de fresagem, que superou eventuais prejuízos que o aumento de teor de resíduo tenha trazido. Já a queda de resistência observada para a mistura 95(50F50S)5C em relação à mistura 95(30F70S)5C, de 0,07 MPa, pode ser decorrente de alguns fatores.

O primeiro seria um possível excesso de material coberto por asfalto, capaz de trazer prejuízo de resistência maior que a vantagem proporcionada pela melhoria na granulometria e plasticidade das misturas. Conforme apontado por Kasu, Manupati e Muppireddy (2020), Brand e Roesler (2017) e Ghanizadeh, Rahrovan e Bafgui (2018), o excesso de material envolto por asfalto traz prejuízos à resistência das misturas, seja por fraca adesão entre a capa de asfalto do resíduo e a pasta de cimento, seja por uma fraca coesão apresentada pela própria capa de asfalto ou mesmo por provocar redução do atrito entre as partículas. Por se tratar de um ensaio não confinado, estas ocorrências se tornam um fator importante nos resultados da resistência.

Outro fator está relacionado à dificuldade em tornar os corpos de prova que continham 50% de resíduo de fresagem homogêneos e regulares. Esta dificuldade foi provocada pela grande quantidade de resíduo de fresagem. A Figura 64 mostra diferença na aparência dos corpos de prova submetidos a ensaio de resistência à compressão simples para as diferentes misturas. Percebe-se a irregularidade da superfície do corpo de prova da mistura 95(50F50S)5C, com a formação de nichos.

Figura 64: Aparência dos corpos de prova submetidos a ensaio de resistência à compressão simples: (a) mistura 95(20F80S)5C (b) mistura 95(30F70S)5C (c) mistura 95(50F50S)5C



A queda de resistência para a mistura contendo 50% de resíduo de fresagem está de acordo com as observações feitas por Oliveira (2018) e Fedrigo (2015), além de corresponder ao limite estabelecido pelo DNIT (2013) para composição de misturas para reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento.

Os valores de RCS obtidos não são suficientes para camadas de base de solo-cimento, que, segundo o DNIT (2022c), requer RCS maior ou igual a 2,1 MPa. A mistura 95(30F70S)5C, que apresentou melhores resultados, atingiu 63% deste valor.

A utilização de solo altamente plástico para composição das misturas com resíduo de fresagem e com cimento colabora com o fato de não se ter obtido valores de RCS suficientes para utilização como base de solo-cimento. Conforme citado anteriormente, autores como Oliveira (2018), Fedrigo (2015) e Ghanizadeh, Rahrovan e Bafgui (2018) obtiveram mais sucesso ao realizar misturas de resíduo de fresagem e materiais mais granulares e menos plásticos, com os quais a estabilização com cimento se dá mais eficientemente.

Segundo Yoder e Witczak (1975), quanto maior a plasticidade do solo, maior é a quantidade de cimento requerida para sua estabilização. Para argilas altamente plásticas, os autores citam teores de cimento entre 15% e 20%, muito superiores ao teor aqui adotado, para conferir resistência à mistura.

No entanto, verifica-se que, mesmo assim, os valores aqui obtidos superam os obtidos por Maciel *et al.* (2018), que ao realizarem mistura contendo 50% de resíduo de fresagem, 50% de solo siltoso moderadamente plástico e 5% de cimento, chegaram à resistência de 0,52 MPa. Ainda, quando se tem em mente que o solo puro e as misturas contendo solo e teores de 20%,

30% e 50% de resíduo de fresagem não resistiram sequer à imersão em água, nota-se que a adição de 5% de cimento trouxe grande benefício às misturas.

#### 4.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

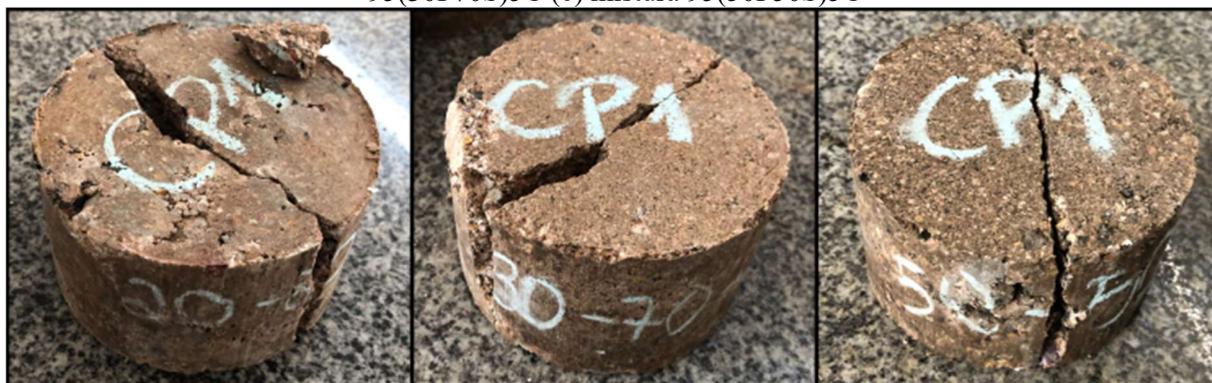
A Tabela 34 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral obtidos para as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento, enquanto a Figura 65 apresenta corpos de prova das três misturas solo-resíduo de fresagem-cimento rompidos. Observa-se ganho de resistência da mistura 95(30F70S)5C em relação à mistura 95(20F80S)5C, seguida de queda da resistência da mistura 95(50F50S)5C, que apresentou o pior resultado, porém não muito distante do resultado obtido para a mistura 95(20F80S)5C.

Tal comportamento difere dos observados por Fedrigo (2015) e Dokovic *et al.* (2019), que observaram apenas queda na resistência das misturas com o aumento do teor de resíduo de fresagem. Essa discordância pode ser explicada pela diferença na composição das misturas, uma vez que Fedrigo (2015) e Dokovic *et al.* (2019) utilizaram materiais grossos nas misturas com o resíduo de fresagem. Aqui, julga-se que o ganho de resistência observado para a mistura 95(30F70S)5C em relação à mistura 95(20F80S)5C seja devido à melhoria na granulometria provocada pela adição de resíduo de fresagem.

Tabela 34: Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Mistura	RTCD (MPa)			RTCD média (MPa)	Desvio Padrão
95(20F80S)5C	0,51	0,47	0,48	0,49	0,02
95(30F70S)5C	0,55	0,53	0,55	0,54	0,01
95(50F50S)5C	0,48	0,47	0,47	0,47	0,00

Figura 65: Corpos de prova do ensaio de RTCD rompidos (a) mistura 95(20F80S)5C (b) mistura 95(30F70S)5C (c) mistura 95(50F50S)5C



(a)

(b)

(c)

Verifica-se que os resultados aqui apresentados não divergem muito dos obtidos por Oliveira (2018), Fedrigo (2015) e Trichês *et al.* (2013). Considerando que os citados autores utilizaram materiais granulares em suas pesquisas, é coerente que tenham atingido resistências semelhantes às da presente pesquisa para menores teores de cimento.

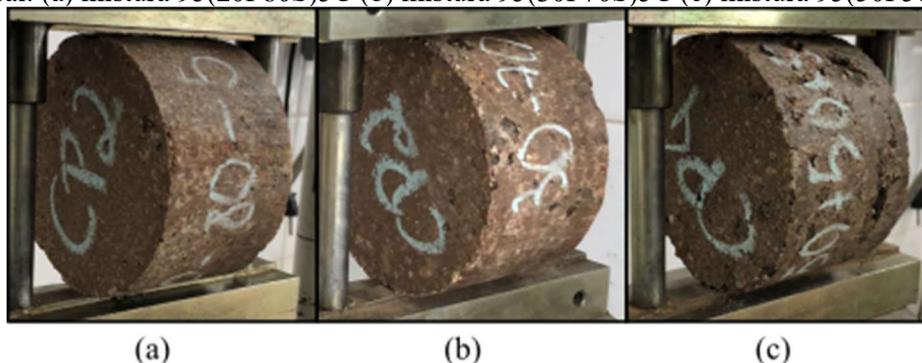
Dokovic *et al.* (2019) citam que misturas cujas RTCD são maiores que 0,4 MPa apresentam uma estabilização satisfatória. Dessa forma, no que diz respeito à resistência à tração, o desempenho apresentado pelas misturas solo-resíduo de fresagem-cimento da presente pesquisa é considerado bom.

Observa-se que as resistências à tração obtidas corresponderam a porcentagens de 38% a 41% da resistência à compressão simples das misturas, relação essa superior aos 10% previstos por Ingles e Metcalf (1972) para solo-cimento. Pesquisadores como Oliveira (2018), Fedrigo (2015), Trichês *et al.* (2013) e Dokovic *et al.* (2019) também obtiveram relações maiores que as indicadas por Ingles e Metcalf (1972) ao analisar a resistência à tração e a resistência à compressão simples de misturas contendo resíduo de fresagem e cimento.

Baldovino *et al.* (2020), que analisaram as variáveis que influenciam a resistência à tração e à compressão simples de dois solos estabilizados com cimento, citam estudos em que a incorporação de outros materiais alternativos, como fibras, às misturas de solo e cimento elevou a relação entre resistência à tração e resistência à compressão simples. É possível que a presença de um material mais dúctil, como asfalto que cobre os agregados do resíduo de fresagem, tenha aumentado a capacidade de distribuição de tensões nos corpos de prova, contribuindo para o ganho de resistência à tração.

Vale ressaltar a dificuldade encontrada em deixar os corpos de prova regulares, principalmente a mistura 95(50F50S)5C, devido à grande quantidade de resíduo de fresagem, assim como ocorreu para os corpos de prova confeccionados para o ensaio de resistência à compressão simples. No entanto, a situação foi agravada pelas dimensões reduzidas que apresentam os corpos de prova utilizados em ensaio de RTCD. Considerando que, no ensaio, os corpos de prova não estão confinados, os nichos que tendem a se formar para a mistura 95(50F50S)5C exercem ainda mais influência na resistência de corpos de prova menores, o que, junto com o excesso de material coberto por betume, explicaria o pior desempenho apresentado por essa mistura. A Figura 66 apresenta o aspecto dos corpos de prova submetidos ao ensaio de RTCD.

Figura 66: Aparência dos corpos de prova submetidos a ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) mistura 95(20F80S)5C (b) mistura 95(30F70S)5C (c) mistura 95(50F50S)5C



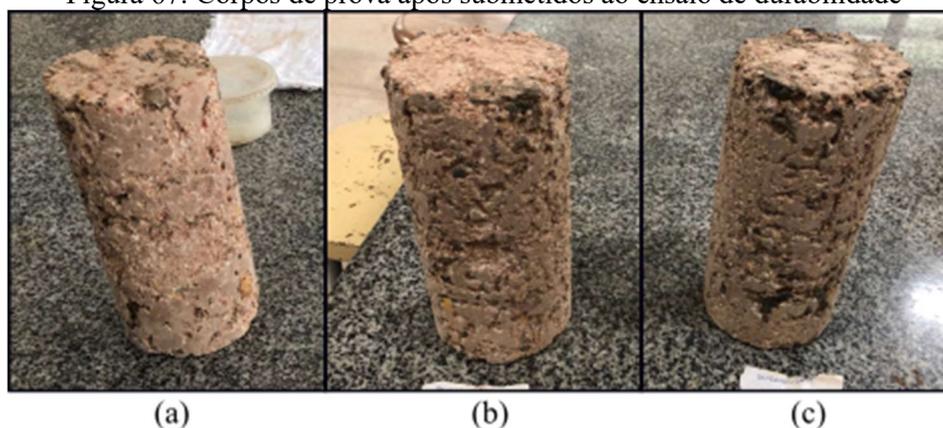
#### 4.9 DURABILIDADE

Avaliou-se a durabilidade dos corpos de prova das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento através da determinação da perda de massa por molhagem e secagem. A Tabela 35 apresenta os resultados de perda de massa obtidos para cada mistura, enquanto a Figura 67 apresenta o aspecto dos corpos de prova submetidos ao ensaio de durabilidade.

Tabela 35: Perda de massa dos corpos de prova das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

Mistura	Perda de massa (%)
95(20F80S)5C	4,68
95(30F70S)5C	4,20
95(50F50S)5C	2,20

Figura 67: Corpos de prova após submetidos ao ensaio de durabilidade



Verifica-se que o aumento do teor de resíduo de fresagem provocou redução na perda de massa das misturas, resultado diferente do obtido por Avirneni, Peddinti e Saride (2016) e Kasu, Manupati e Muppireddy (2020). No entanto, destaca-se que os autores citados realizaram mistura de resíduo de fresagem e agente químico estabilizante com agregados virgens, material grosseiro.

Atribuiu-se o aumento na durabilidade observado na presente pesquisa ao fato de que a incorporação de material granular, como o resíduo de fresagem, em uma base argilosa trouxe melhorias para a granulometria e plasticidade das misturas, de modo que a ação aglomerante do cimento se tornou mais eficiente à medida que foram introduzidas frações de areia e pedregulhos nas misturas, superando eventuais prejuízos provocados por ligações fracas entre a capa de asfalto envelhecida do resíduo de fresagem e a pasta de cimento.

Embora utilizando um método diferente para avaliar a durabilidade, Alhaji e Alhassan (2018), já citados, misturaram o resíduo de fresagem com solo fino e argiloso e também verificaram melhorias na durabilidade com o aumento do teor de resíduo de fresagem até 40%. No entanto, para teores além deste, perceberam queda na durabilidade. Dessa forma, aqui não se descarta a possibilidade de aumento da perda de massa para misturas contendo teores de resíduo de fresagem além de 50%, provocado por um possível desequilíbrio granulométrico.

Apesar de os materiais das misturas estudadas por Avirneni, Peddinti e Saride (2016) e Kasu, Manupati e Muppireddy (2020) serem distintas das aqui avaliadas, percebe-se que, assim como os autores, as perdas de massa aqui observadas foram baixas.

Vargas (1978) e Catton (1962) citam que, como critério para dosagem de solo-cimento, a perda de massa para um solo A-7 estabilizado com cimento não deve ser maior que 7%. Ingles e Metcalf (1972) informam requisitos de perda de massa de solo-cimento iguais a 7% para sub-base, 10% para bases de rodovias de baixo tráfego, 14% para rodovias de tráfego intenso. Dessa forma, tendo em vista as baixas perdas de massa obtidas, considera-se que as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento estudadas apresentaram boa durabilidade.

#### 4.10 PERMEABILIDADE

Foram realizados ensaios de permeabilidade com o solo puro, com as misturas solo-resíduo de fresagem e com as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento. A Tabela 36 apresenta os resultados de coeficiente de permeabilidade obtidos para o solo puro e para as misturas, valores estes que se mostraram muitos baixos.

Tabela 36: Coeficiente de permeabilidade do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento

<b>Mistura</b>	<b>Coeficiente de permeabilidade (cm/s)</b>
100S	$2,53 \times 10^{-7}$
20F80S	$1,61 \times 10^{-7}$
30F70S	$3,93 \times 10^{-7}$
50F50S	$2,60 \times 10^{-6}$
95(20F80S)5C	$1,11 \times 10^{-8}$
95(30F70S)5C	$1,09 \times 10^{-8}$
95(50F50S)5C	$1,26 \times 10^{-6}$

Verifica-se que o solo puro e as misturas solo-resíduo de fresagem apresentam coeficientes de permeabilidade na ordem de  $10^{-7}$ , com exceção da mistura 50F50S, cujo coeficiente apresentou ordem de grandeza igual a  $10^{-6}$ . Julga-se que estes valores são compatíveis com a classificação que receberam. Segundo Pinto (2006), os valores típicos de coeficiente de permeabilidade das argilas são menores que  $10^{-7}$ . Já para Das e Sobhan (2019), os valores de coeficiente de permeabilidade para uma argila saturada são menores que  $10^{-6}$ . Vargas (1978) considera que argilas com coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-5}$  são consideradas solos impermeáveis.

Observa-se um aumento do coeficiente de permeabilidade para a mistura 50F50S, o que pode estar relacionado à adição de maiores teores de resíduo de fresagem que favorece a passagem da água pelos pequenos canais interligados. Os nichos que podem se formar nas amostras compactadas, conforme observado anteriormente, justificam esse aumento. Já as misturas 20F80S e 30F70S, em que a fração de solo é predominante em relação à fração de resíduo, não apresentaram alteração em relação ao solo puro.

Percebe-se que a ordem de grandeza das permeabilidades aqui obtidos são muito menores que as obtidas por Seferoglu, Seferoglu e Akpinar (2018) e Mousa *et al.* (2017). Além disso, ao contrário do observado pelos autores, o aumento do teor de resíduo de fresagem levou a um aumento do coeficiente de permeabilidade das misturas. Essas divergências são explicadas pelas diferenças nos materiais utilizados nas pesquisas dos autores citados em relação aos utilizados na presente pesquisa, uma vez que Seferoglu, Seferoglu e Akpinar (2018) e Mousa *et al.* (2017) misturaram resíduo de fresagem com material grosso.

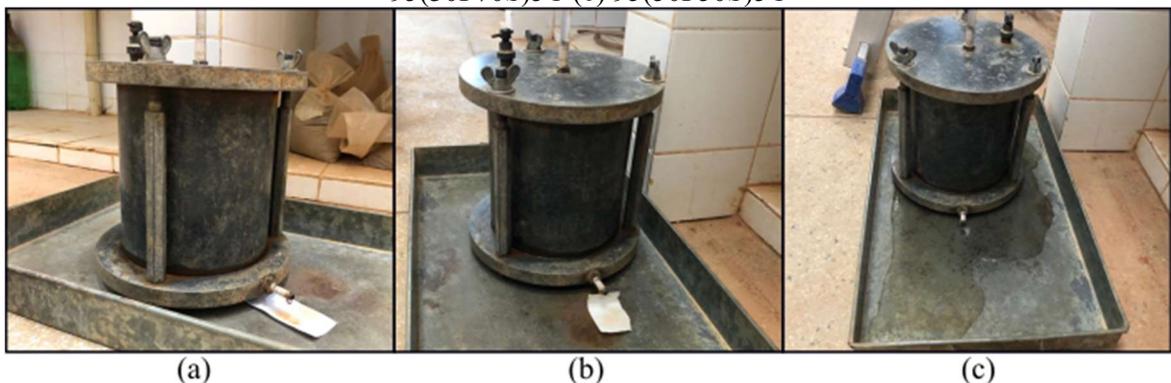
Quando se adicionou o cimento, a permeabilidade das misturas contendo 20% e 30% de resíduo de fresagem tiveram seus coeficientes de permeabilidade reduzidos em relação às misturas sem cimento em uma ordem de grandeza, enquanto a mistura contendo 50% de resíduo

de fresagem teve seu coeficiente de permeabilidade discretamente reduzido. Esta constatação vai de encontro com o que dizem Ingles e Metcalf (1972). Segundo os autores, aumentando-se o teor de cimento, em geral, a permeabilidade das misturas com o solo é reduzida, exceto para argilas, onde se verifica aumento da permeabilidade. Dessa forma, a redução da permeabilidade provocada pela adição de cimento nas misturas não era esperada.

É possível que haja fatores de natureza química, dado que o cimento CP-V ARI utilizado possui características de composição e finura distintas do cimento comum, que promovam redução da permeabilidade, sendo necessária a realização de ensaios específicos para verificação desta hipótese. Mollamahmutoglu e Avci (2018) estudaram os efeitos da mistura de uma argila altamente plástica com cimento superfino a base de escória e verificaram redução da permeabilidade com o aumento do teor de cimento. Justificou que produtos de reações secundárias da estabilização com cimento se depositaram na superfície dos aglomerados de argila, o que foi verificado através de MEV, acarretando aumento o tamanho das partículas, mas redução nos diâmetros dos poros de entrada. Deng *et al.* (2015) ao estabilizar uma argila marinha altamente plástica com cimento, também verificou redução na permeabilidade das misturas com o aumento do teor de cimento.

As Figuras 68 e 69, a seguir, ilustram as peculiaridades observadas nos ensaios realizados com as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento. Como pode ser visto na Figura 68, durante a realização do ensaio de permeabilidade com as amostras das misturas 95(20F80S)5C e 95(30F70S)5C, a percolação da água se dava tão lentamente que foi necessário fazer uso de um pequeno pedaço de papel abaixo da saída para verificar se a água estava realmente saindo por ali, dado que, por vezes, a água evaporava entre as leituras da bureta ou escoava por baixo do bico de saída. A Figura 68 (c), correspondente à mistura 95(50F50S)5C já mostra um cenário diferente, em que não foi necessário fazer uso dos artificios descritos.

Figura 68: Execução dos ensaios de permeabilidade com amostras das misturas (a) 95(20F80S)5C (b) 95(30F70S)5C (c) 95(50F50S)5C



A Figura 69 apresenta o interior dos corpos de prova das amostras das misturas 95(20F80S)5C e 95(30F70S)5C após ensaio de permeabilidade. Percebe-se um interior mais seco que a superfície dos corpos de prova, dando a entender que algo impediu a adequada percolação da água por dentro dos corpos de prova, o que parecer ser coerente com o que foi descrito por Mollamahmutoglu e Avcı (2018).

Figura 69: Interior dos corpos de prova das amostras das misturas (a) 95(20F80S)5C (b) 95(30F70S)5C após ensaio de permeabilidade



Apesar das alterações notadas na permeabilidade das diferentes misturas, percebe-se que a classe das misturas com cimento e sem cimento não se alterou em relação ao solo puro, permanecendo as características de solo considerado impermeável.

#### 4.11 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DAS MISTURAS EM CAMADAS DE PAVIMENTO

A partir dos resultados obtidos no programa experimental, é avaliada a viabilidade técnica do uso das misturas solo-resíduo de fresagem e solo-resíduo de fresagem-cimento em camadas de pavimentos flexíveis, tomando-se como referência as normas do DNIT, quais sejam:

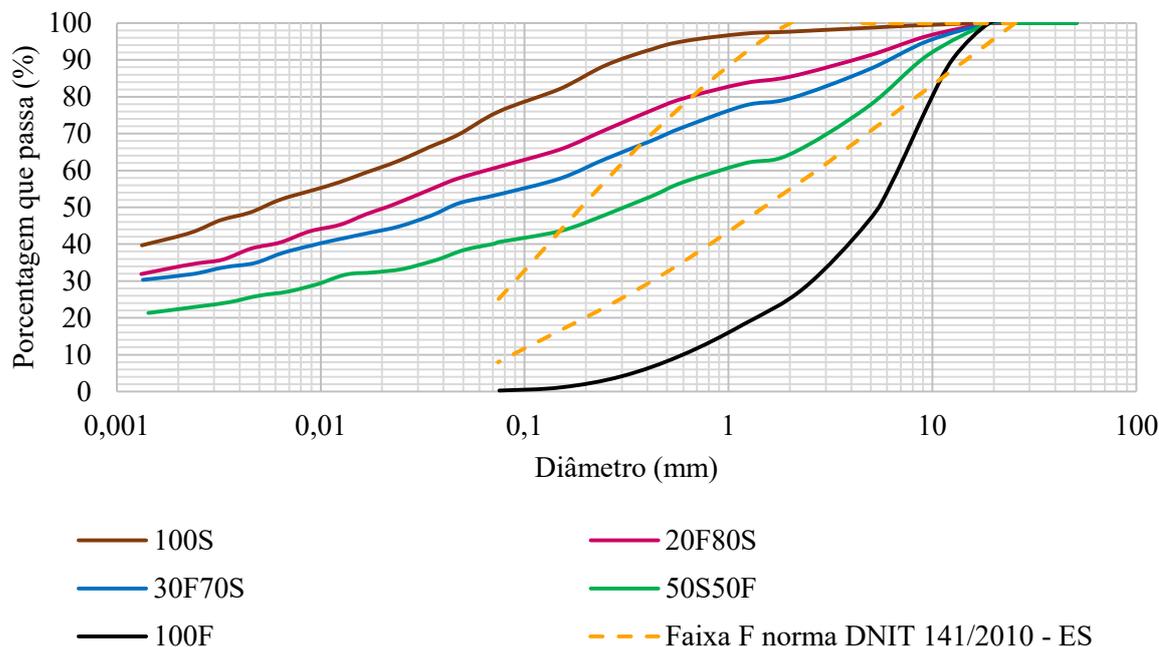
- Norma DNIT 139/2010 – ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço;
- Norma DNIT 141/2010 – ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço;
- Norma DNIT 140/2022 – ES: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço;
- Norma DNIT 142/2022 – ES: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço;
- Norma DNIT 143/2022 – ES: Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço.

Segundo a norma DNIT 141/2010 (DNIT, 2010b), para que determinado solo, mistura de solos ou misturas de solo e materiais britados possam ser utilizados em camadas de base estabilizada granulometricamente de pavimentos, é necessário que:

- a) Quando submetidos a ensaios de caracterização, possuam composição granulométrica que satisfaça a uma das faixas já apresentadas na Tabela 19, a fração que passa na peneira #40 deve apresentar LL menor ou igual a 25% e IP menor ou igual a 6% e a porcentagem do material passante na peneira #200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem do material passante na peneira #40. Quando o LL e o IP forem superiores aos exigidos, o equivalente de areia deve ser maior que 30%;
- b) O ISC deve ser maior ou igual a 80% ou, para rodovias de baixo tráfego, 60%, além de expansão menor ou igual a 0,5%;
- c) O agregado retido na peneira #10, quando submetidos a ensaio de abrasão *Los Angeles*, não devem apresentar desgaste superior a 55%.

Assim como o solo puro, as misturas solo-resíduo de fresagem não atenderam a todos os requisitos da norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b). A Figura 70 ilustra as curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro no contexto da faixa F da norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), que corresponde a uma das faixas de composições granulométricas exigidas para bases de rodovias de baixo tráfego. Percebe-se uma maior aproximação das curvas granulométricas das misturas com as citadas faixas à medida que se aumenta o teor de resíduo de fresagem. No entanto, nenhuma das curvas se enquadraram a citada faixa granulométrica. Além disso, em todas as misturas solo-resíduo de fresagem, o material passante na peneira #200 ultrapassou 2/3 da porcentagem do material passante na peneira #40.

Figura 70: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa F da norma DNIT 141/2010 – ES



Ainda, os resultados de limites de Atterberg obtidos para as misturas solo-resíduo de fresagem se situaram muito distantes das exigências. Embora o aumento do teor de resíduo de fresagem tenha proporcionado redução na plasticidade das misturas, os menores LL e IP verificados, correspondentes à mistura 50F50S, foram iguais a 46% e 25%, respectivamente.

Com relação ao ISC e à expansão, embora a incorporação do resíduo de fresagem tenha aumentado o ISC das misturas solo-resíduo de fresagem e provocado redução na expansão, chegou-se a um ISC máximo de 28% com a mistura 50F50S e, portanto, este requisito também não foi atendido. No entanto, o requisito para expansão foi atendido pela mistura 50F50S, que apresentou expansão igual a 0,4%.

No que diz respeito ao desgaste à abrasão *Los Angeles*, percebe-se, da granulometria do solo e das misturas solo-resíduo de fresagem, que o material retido na peneira #10 é praticamente constituído de resíduo de fresagem, que apresentou desgaste à abrasão *Los Angeles* igual a 31%, estando, portanto, de acordo com a exigência do DNIT.

De acordo com a norma DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a), para que determinado solo, mistura de solos ou misturas de solo e materiais britados possam ser utilizados em camadas de sub-base estabilizada granulometricamente de pavimentos, é necessário que:

- Quando submetidos a ensaios de caracterização, apresentem IG igual a zero e que a fração retida na peneira #10 seja constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, materiais orgânicos ou substâncias prejudiciais;
- Apresentem ISC maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual a 1%.

Verifica-se que nenhuma das misturas solo-resíduo de fresagem atendeu a todos os requisitos da norma DNIT 139/2010 – ES (DNIT, 2010a). A que mais se aproximou de um material que pudesse ser utilizado em camada de sub-base estabilizada granulometricamente foi a mistura 50F50S. No entanto, embora a mistura 50S50F tenha apresentado ISC maior que 20% e expansão menor que 1%, seu IG foi igual a 6.

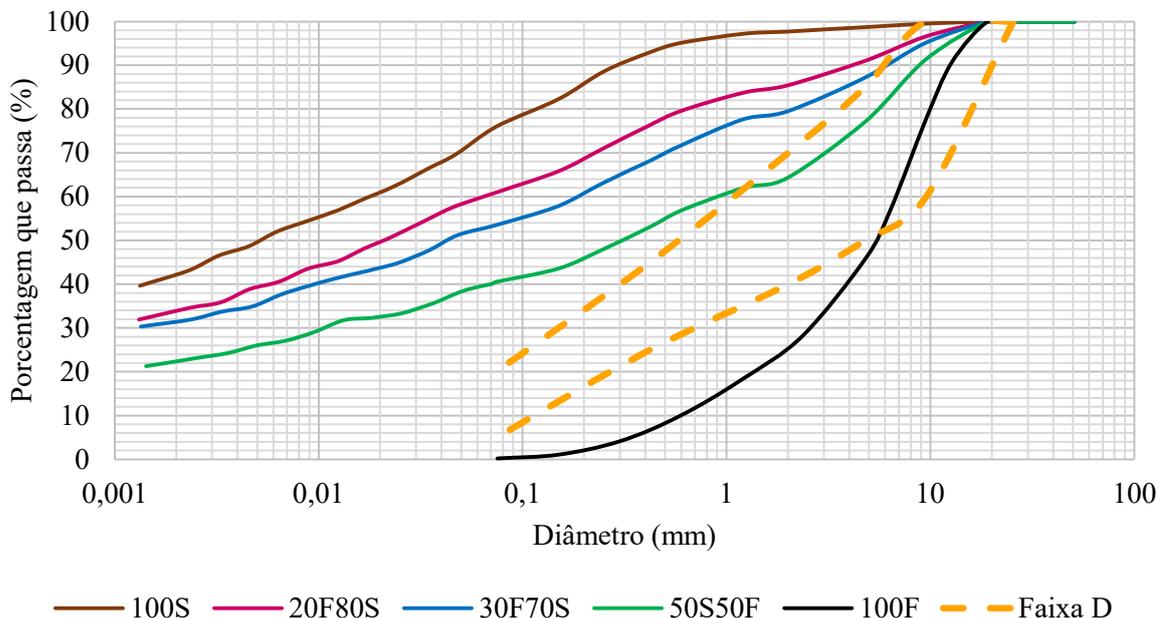
A Tabela 37 é apresentada na norma DNIT 142/2022 – ES (DNIT, 2022b) como referência de faixas granulométricas para seleção de solo e/ou material granular para compor misturas de base de solo melhorado com cimento. Conforme pode ser observado na Figura 71, nenhuma das misturas solo-resíduo de fresagem se encaixa nas faixas apresentadas. No entanto, o normativo esclarece que essas faixas têm caráter exemplificativo, não havendo obrigatoriedade de serem seguidas caso os parâmetros definidos em projeto sejam atendidos.

Tabela 37: Faixas granulométricas para seleção inicial de solo e/ou material granular para compor mistura de solo melhorado com cimento

Peneiras		Faixas			
pol./número	mm	A	B	C	D
2"	50,8	100	100	-	-
1"	25,4	-	75 - 90	100	100
3/8"	9,5	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100
#4	4,8	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85
#10	2	15 - 40	20 - 45	25 - 50	40 - 70
#40	0,42	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45
#200	0,074	2 - 8	5 - 15	5 - 15	5 - 20

Fonte: DNIT (2022b)

Figura 71: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa D da norma DNIT 142/2022 – ES



Dessa forma, a única exigência para o solo, com ou sem adição de material granular, empregado na execução de base de solo melhorado com cimento é que os agregados retidos na peneira #10 sejam constituídos de partículas duras, duráveis, isentos de fragmentos moles, alongados ou achatados, de matéria orgânica e de substância prejudicial. Assim, a princípio, as misturas solo-resíduo de fresagem poderiam ser utilizadas para compor base de solo melhorado com cimento.

Do mesmo modo, a princípio, as misturas solo-resíduo de fresagem também poderiam ser usadas em camadas de sub-base de solo melhorado com cimento, tendo em vista que a única exigência da norma DNIT 140/2022 – ES (DNIT, 2022a) para solo, com ou sem adição de material granular, a ser empregado na execução de sub-base de solo melhorado com cimento, é que os agregados retidos na peneira #10 sejam constituídos de partículas duras e duráveis, isentos de fragmentos moles, alongados ou achatados, de matéria vegetal ou substância prejudicial.

No entanto, as exigências para a mistura de solo melhorado com cimento para compor camadas de base e sub-base não foram atendidas pelas misturas solo-resíduo de fresagem-cimento, mesmo com a adição de 5% de cimento, teor superior aos 4% definidos pelo DNIT para solo melhorado com cimento.

A norma DNIT 142/2022 – ES (DNIT, 2022b) especifica que a mistura de solo melhorado com cimento para compor camada de base deve apresentar, quando se considera o dimensionamento pelo método empírico, expansão máxima de 0,5%; ISC maior ou igual a 80%; LL menor ou igual a 25%; e IP menor ou igual a 6%.

Por sua vez, a norma DNIT 140/2022 – ES (DNIT, 2022a) exige que a mistura de solo melhorado com cimento para compor camada de sub-base apresente expansão máxima de 1%; ISC maior ou igual a 30%; LL menor ou igual a 25%; e IP menor ou igual a 6%, quando se considera o dimensionamento pelo método empírico.

No que diz respeito aos requisitos de ISC e expansão para base melhorada com cimento, verificou-se que todas as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento superaram os valores mínimos de ISC exigidos pelo DNIT, uma vez que o menor ISC obtido foi igual a 197%, referente a mistura 95(20F80S)5C, mas apenas a mistura 95(50F50S)5C atendeu ao critério de expansão.

Em relação aos requisitos de ISC e expansão para sub-base melhorada com cimento, verificou-se que as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento atenderam a todas as exigências do normativo, sendo que o menor ISC obtido foi igual a 197%, referente a mistura 95(20F80S)5C, e a maior expansão foi igual a 0,9%, referente à mistura 95(30F70S)5C.

No entanto, embora tenha proporcionado melhorias nas misturas solo-resíduo de fresagem, a adição de cimento não foi capaz de corresponder às exigências de limites de Atterberg das normas DNIT 140/2022 – ES (DNIT, 2022a) e DNIT 142/2022 – ES (DNIT, 2022b) quando utilizado o método empírico de dimensionamento de pavimentos. Os menores valores de LL e IP obtidos corresponderam aos da mistura 95(50F50S)5C e foram iguais a 34% e 11%.

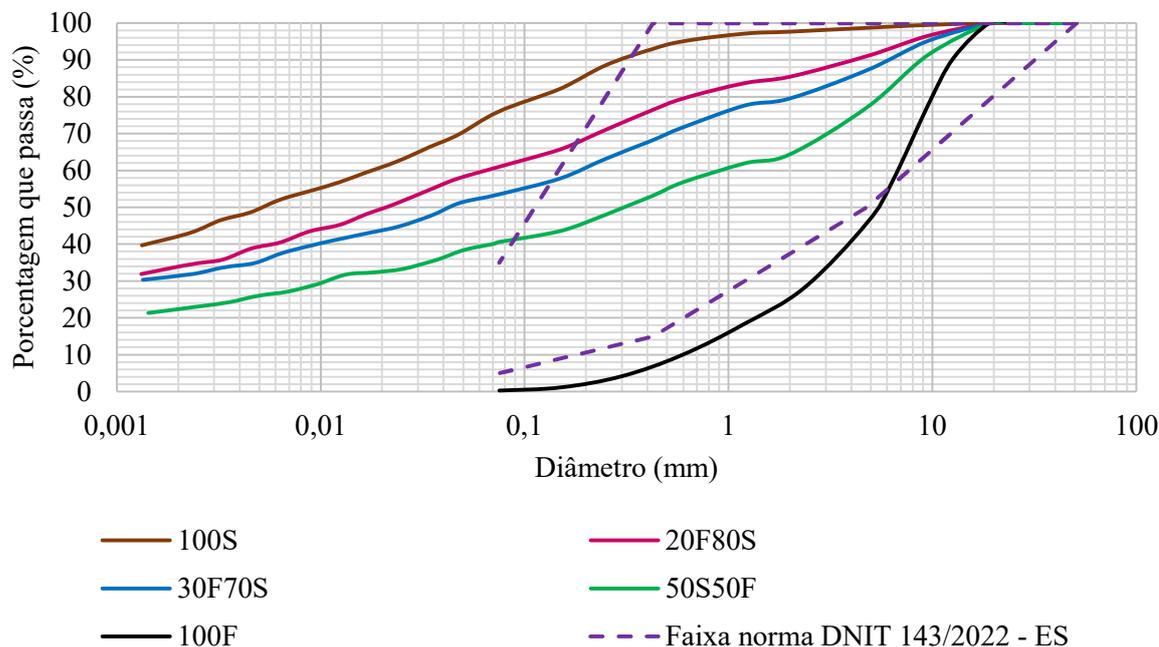
É possível que, com a adição de 4% de cimento no lugar de 5%, para atender a definição de solo melhorado com cimento do DNIT, os requisitos de expansão e ISC fossem atendidos para camadas de sub-base, visto que, com adição de 5%, os resultados obtidos para todas as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento foram muito superiores aos exigidos. No entanto, a alta plasticidade do solo provocaria entaves.

De acordo com a nova definição trazida pela norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c), publicada em maio de 2022, o teor de 5% de cimento, antes não considerado para diferenciar solo melhorado com cimento e solo-cimento, agora corresponde ao limite inferior dos teores de cimento para mistura de solo-cimento. No entanto, há que se ressaltar que ainda há publicações vigentes do DNIT que consideram solo-cimento as misturas de solo com teores de cimento entre 6% e 10%.

A norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c) estabelece que para a seleção inicial de solo e/ou material granular para compor mistura de solo-cimento é necessário que sua granulometria atenda à faixa indicada na Tabela 20. Além disso, quando se considera o dimensionamento do pavimento pelo método empírico, a RCS aos sete dias deve ser maior ou igual a 2,1 MPa.

Como pode ser visto na Figura 72, as misturas solo-resíduo de fresagem não atenderam à faixa granulométrica da Tabela 20, apesar de o aumento do teor de resíduo de fresagem ter aproximado as curvas granulométricas das misturas à faixa. Ainda, as RCS obtidas com as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento não alcançaram o valor de 2,1 MPa, sendo que a mistura 95(30F30S)5C, que apresentou melhor RCS, alcançou 63% da resistência requerida pelo normativo.

Figura 72: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa granulométrica da norma DNIT 143/2022 - ES



Embora a incorporação de resíduo de fresagem e a adição de cimento tenham provocado melhorias nas propriedades do solo e das misturas, estas não foram capazes de tornar os materiais aptos a serem utilizados em pavimentação. O maior desafio foi apresentado pelas características do solo e não do resíduo de fresagem. O solo se mostrou muito fino e altamente plástico, características que não foram suficientemente modificadas para atender aos requisitos de camadas estabilizadas granulometricamente, de solo melhorado com cimento ou base de solo-cimento.

Quando se compara as características das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento com os critérios do DNIT para base de solo-cimento, verifica-se que a resistência das misturas não foi suficiente. É possível que, com a utilização de outro tipo de solo na mistura, mais granular e menos plástico, as resistências requeridas sejam alcançadas, como foi verificado por autores como Oliveira (2018), Fedrigo (2015) e Ghanizadeh, Rahrovan e Bafgui (2018).

Apesar dos requisitos das normas do DNIT, considerando as propriedades que foram modificadas pela adição de cimento às misturas, pode-se dizer que as misturas com cimento se aproximaram mais de misturas de solo melhorado com cimento do que de misturas de solo-cimento, uma vez que tiveram melhoradas a suscetibilidade à água e diminuídas as expansões, mas não adquiriram a rigidez elevada.

Ainda, em que pese se tratar de misturas com adição de cimento, julga-se válido mostrar aqui que, conforme Figuras 73, 74 e 75: a) a granulometria das misturas 95(30F70S)5C e 95(50F50S)5C se enquadraram na faixa F da norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b); b) a

granulometria da mistura 95(50F50S)5C se enquadraram na faixa D da norma DNIT 142/2022 – ES (DNIT, 2022b); e todas as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento se enquadraram na faixa granulométrica da norma DNIT 143/2022 – ES (DNIT, 2022c).

Esta constatação provoca questionamento quanto a possibilidade de utilizar as misturas solo-resíduo de fresagem-cimento como um novo material granular. É claro que algumas questões precisariam ser mais profundamente estudadas, como a viabilidade econômica, tendo em vista que, para resolver a questão da plasticidade, poderia ser necessário se utilizar de mais aditivo e que, para o caso de exigências para base melhorada com cimento e base de solo-cimento, seria necessária uma nova adição de cimento.

No entanto, cita-se, como exemplo, que as misturas 95(30F70S)5C e 95(50F50S)5C, se consideradas como um novo material granular e se tivessem contornadas as suas plasticidades, considerando as exigências da norma DNIT 141/2010 – ES (DNIT, 2010b), poderiam ser utilizadas como base de rodovias de baixo tráfego, uma vez que as demais condições estariam atendidas.

Figura 73: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa F da norma DNIT 141/2010 - ES

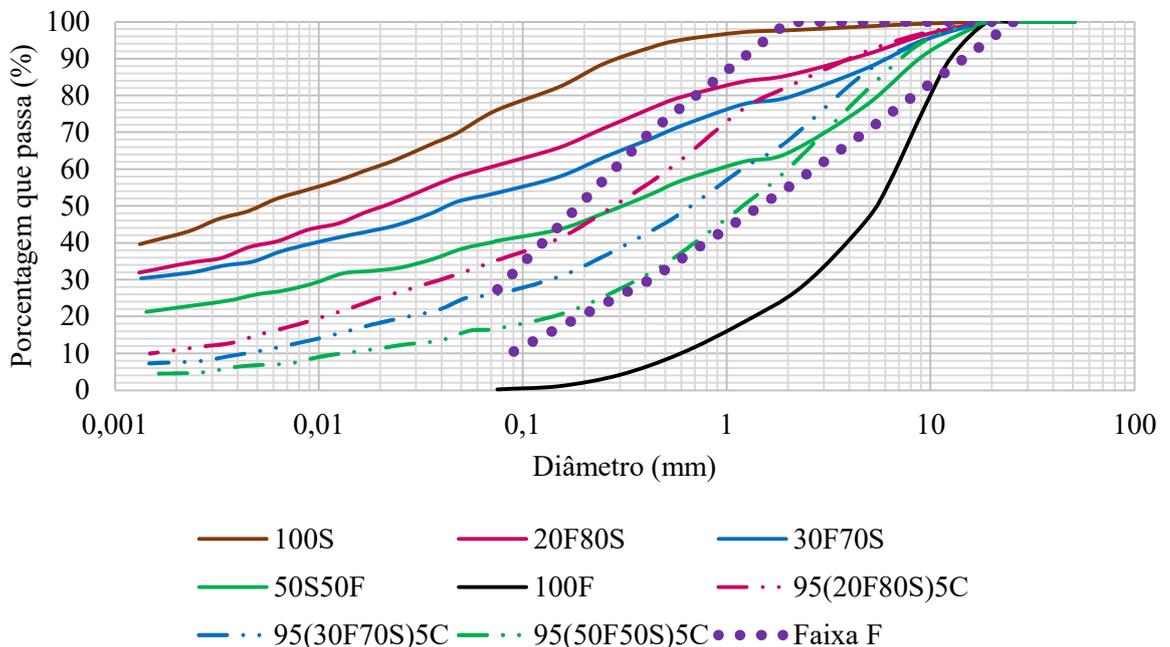


Figura 74: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa D da norma DNIT 142/2022 - ES

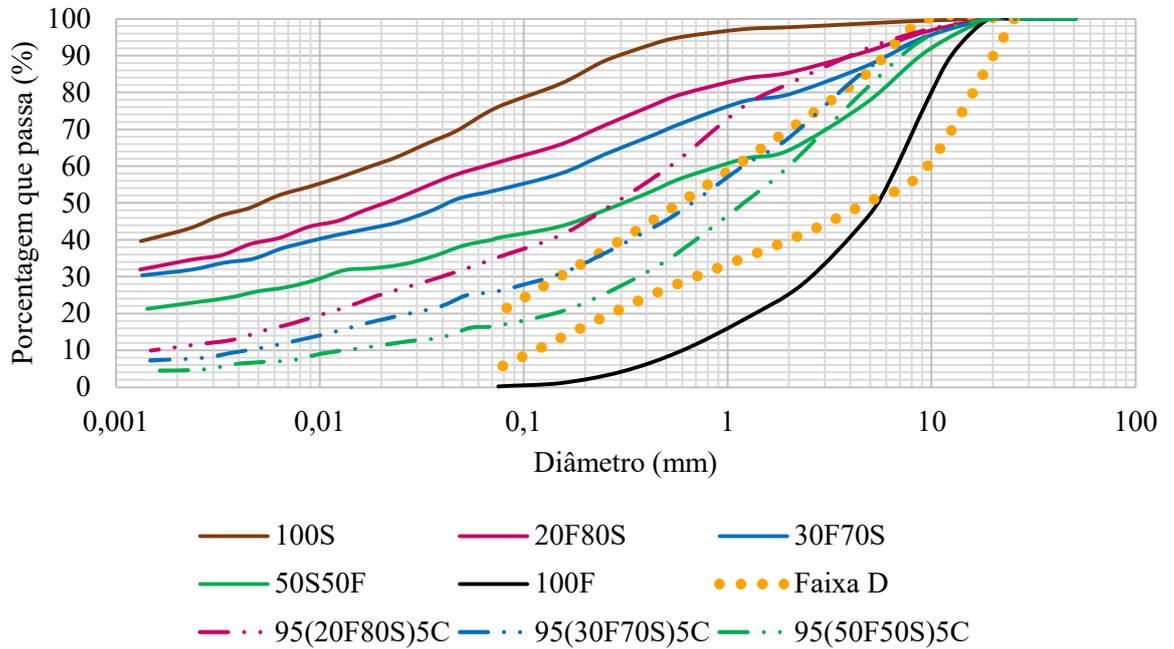
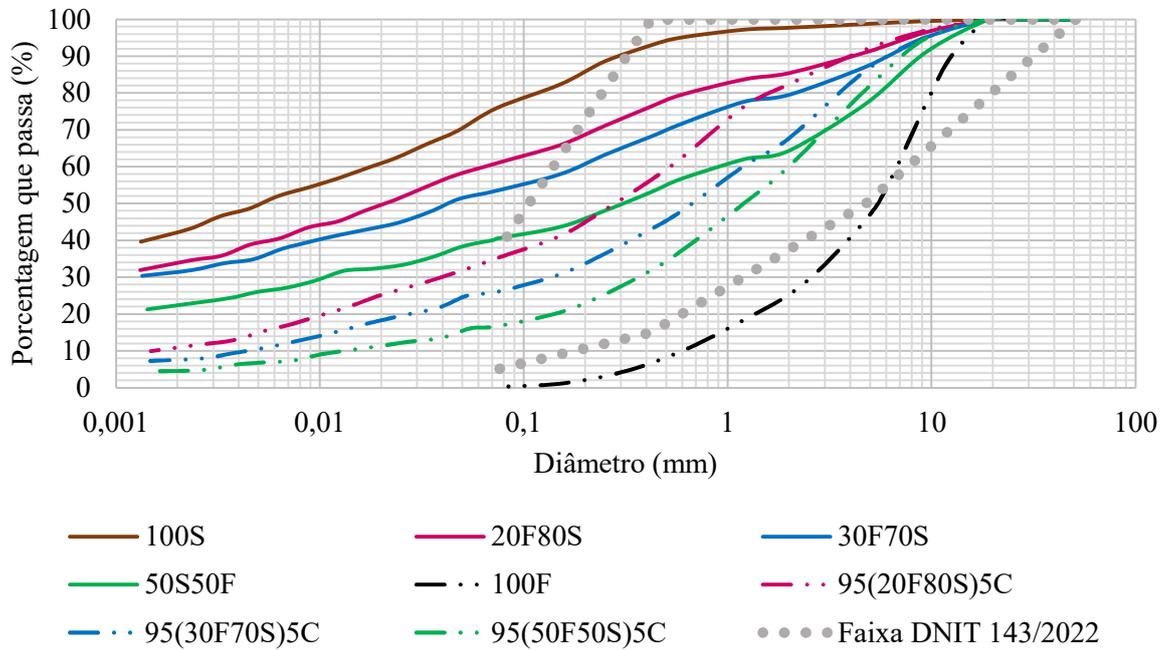


Figura 75: Curvas granulométricas do solo puro, das misturas solo-resíduo de fresagem, das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento e do resíduo de fresagem puro inseridas no contexto da faixa granulométrica da norma DNIT 143/2022 - ES



## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos no programa experimental permitem afirmar que o resíduo de fresagem possui características consideradas nobres e é capaz de melhorar as propriedades de solos considerados ruins para fins de Engenharia, devendo ser ampliada a exploração das suas características e do seu potencial como material de construção, uma vez que sua reutilização apresenta vantagens econômicas e para o meio ambiente.

A partir do que foi exposto, pode-se concluir que:

- O resíduo de fresagem apresenta tendência a fragmentação durante a compactação com a energia modificada, seja por desfazimento de grumos, seja por descolamento do asfalto aderido ao agregado;
- O aumento do teor de resíduo de fresagem das misturas tende a provocar aumento da massa específica seca máxima e redução do teor de umidade ótimo, ou seja, o incremento do teor de resíduo de fresagem, até 50%, conferiu melhor entrosamento dos grãos e maior densificação do material. O efeito do aumento do teor de resíduo de fresagem exerce influência maior na queda do teor de umidade ótimo do que no aumento da massa específica seca máxima das misturas;
- O aumento do teor de resíduo de fresagem, até 50%, é acompanhado de aumento no ISC das misturas e redução da expansão, o que pode ser explicado por um melhor entrosamento dos grãos. Os resultados de ISC para as misturas contendo cimento são muito superiores aos resultados obtidos para o solo puro e para as misturas sem cimento. No entanto, o efeito da adição de cimento nas misturas foi maior no ISC do que na expansão;
- Nas misturas com cimento, tanto a RCS quanto a RTCD aumentaram com o incremento de teor de resíduo de fresagem até 30%, caindo para a mistura contendo 50% de resíduo de fresagem. É possível que o ganho resistência da mistura 95(30F70S)5C em relação à mistura 95(20F80S)5C seja decorrente da melhoria da granulometria das misturas, melhoria esta que foi superada pelo prejuízo na resistência provocado pelo excesso de resíduo de fresagem da mistura 95(50F50S)5C. A RTCD das misturas com cimento foi considerada satisfatória;
- O aumento do teor de resíduo de fresagem reduziu a perda de massa das misturas com cimento submetidas a ensaios de durabilidade por molhagem e secagem devido a

melhorias na granulometria, de modo que a ação aglomerante do cimento se tornou mais eficiente. A durabilidade das misturas com cimento foi considerada boa;

- As misturas 20F80S e 30F70S não apresentaram alteração na permeabilidade em relação ao solo puro, mas foi verificado aumento do coeficiente de permeabilidade para a mistura 50F50S. Quando se adicionou o cimento, as misturas tiveram seus coeficientes de permeabilidade reduzidos em relação às misturas sem cimento. É possível que haja fatores de natureza química, relacionados ao cimento CP-V ARI, que tenham provocado redução da permeabilidade das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento. O solo e todas as misturas foram classificados como material impermeável;
- A incorporação de resíduo de fresagem e a adição de cimento provocaram melhorias relevantes nas propriedades do solo e das misturas, mas não foi capaz de tornar os materiais aptos a serem utilizados em pavimentação devido ao alto teor de finos e à alta plasticidade do solo.

Considerando a complexidade do tema, que possui diversas nuances além das abordadas no presente trabalho, apresenta-se como sugestões para pesquisas futuras:

- Investigar misturas de resíduo de fresagem e solo estabilizadas com cal, tendo em vista que, considerando as exigências do DNIT para materiais a serem utilizados em camadas de pavimentos flexíveis, a adequação da plasticidade foi uma das maiores dificuldades encontradas;
- Avaliar novas misturas com a utilização de outros tipos de solo, menos plásticos, e menores teores de cimento;
- Realizar pesquisa envolvendo solo, resíduo de fresagem e cimento em teor estabelecido através de método de dosagem existente, como o da norma DNIT 414/2019 – ME, para dosagem físico-química de solo-cimento;
- Investigar o comportamento das misturas solo-resíduo de fresagem-cimento através de MEV;
- Avaliar eventuais diferenças na estabilização química de solo argiloso quando se utiliza o cimento comum em relação ao cimento CP V – ARI;
- Avaliar o potencial de reutilização do resíduo de fresagem para fins geotécnicos diferentes de pavimentação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**: agregado graúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ALHAJI, Mustapha Mohammed; ALHASSAN, Musa. Effect of reclaimed asphalt pavement stabilization on the microstructure and strength of Black Cotton Soil, **International Journal of Technology**, Depok, Indonésia, v. 9, n. 4, p. 727-736, 2018.

ALHAJI, Mustapha Mohammed; ALHASSAN, Musa; ADEJUMO, Taiye Waheed; UMAR, Awwal Tanko. Laboratory and field evaluation of A-6 lateritic soil treated with reclaimed asphalt pavement and ordinary Portland cement, **International Journal of GEOMATE**, Tsu, Mie, Japão, v. 17, n. 63, p. 360-370, 2019.

ARAÚJO JÚNIOR, Luiz Paulo Vieira de; FERREIRA, Marcos Antônio Garcia; SILVA, Jefferson Lins da. Estabilização granulométrica de solo arenoso misturado com material fresado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ABMS, 2018.

ARRA – Asphalt Recycling & Reclaiming Association. **Recommended construction guidelines for standard cold planing (CP) – CP101**. Glen Ellyn: Asphalt Recycling & Reclaiming Association, 2016. Disponível em: [https://cdn.ymaws.com/www.arra.org/resource/resmgr/docs/ARRA\\_CP101\\_\\_12-22-16.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.arra.org/resource/resmgr/docs/ARRA_CP101__12-22-16.pdf). Acesso em: 28 nov. 2020.

ATHANASOPOULOU, Antonia. The role of curing period on the engineering characteristics of a cement-stabilized soil. **Romanian Journal of Transport Infrastructure**. Bucareste, v. 5, n. 1, p. 38-52, 2016.

AVIRNENI, Deepti; PEDDINTI, Pranav R. T.; SARIDE, Sireesh. Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses, **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 198-209, 2016.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALBO, José Tadeu. Concretos Asfálticos. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 2v.

BALDOVINO, Jair de Jesus Arrieta; IZZO, Ronaldo Luis dos Santos; TEIXEIRA, Wagner; PEREIRA, Mirian Dayane. Variáveis que influenciam na resistência à tração e à compressão simples de dois solos sedimentares estabilizados com cimento, **Revista Matéria**, v. 25, n. 02, 2020.

BAŃKOWSKI, Wojciech. Evaluation of fatigue life in asphalt concrete mixtures with reclaimed asphalt pavement. **Applied Sciences**, Basileia, v. 8, n. 3, 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3.ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

BOWLES, Joseph E. **Foundation analysis and design**. 5.ed. Singapore: McGraw-Hill, 1997.

BRAND, Alexander S.; ROESLER, Jeffery R. Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part II – Cement-asphalt chemical interactions, **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 182-192, 2017.

CARDOSO, Juliana Gabrielle Florêncio Gomes; ALMEIDA, Guilheme Bravo de Oliveira; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé Casagrande. Análise de estabilização química de solo argiloso com cimento para uso na pavimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

CATTON, Miles D. Soil-cement technology: a résumé. **Journal of de PCA Research and Development Laboratories**. Skokie, Illinois, v. 4, n. 1, p. 13-21, jan. 1962. Disponível em: [http://www2.cement.org/pdf\\_files/rx136.pdf](http://www2.cement.org/pdf_files/rx136.pdf). Acesso em: 17 fev. 2021.

CHHABRA, Rishi Singh; RANSINCUNG, G. D. R. N.; ISLAM, Sk Sohel. Performance analysis of cement treated base layer by incorporating reclaimed asphalt pavement material and chemical stabilizer, **Construction and Building Materials**, v. 298, 2021.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Brasília: CNT, 2017.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 9 ed. São Paulo: Cengage, 2019.

DEBBARMA, Solomon; RANSINCHUNG R. N., G. D.; SINGH, Surender. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing diferente fractions of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 508-525, 2019.

DENG, Yongfeng; YUE, Xibing; LIU, Songyu; CHEN, Yonggui; ZHANG, Dingwen. Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution, **Engineering Geology**, v. 193, p. 146-152, 2015.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 035/98**: agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1998a.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 051/94**: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994a.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 053/94**: misturas betuminosas: percentagem de betume. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994b.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 080/94**: solos: análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994c.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 082/94**: solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994d.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 083/98**: agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1998b.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 093/94**: solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994e.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 122/94**: solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994f.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 162/94**: solos: ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994g.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 194/98**: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1998c.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 201/94**: solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994h.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 203/94**: solos-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1994i.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Conservação Rodoviária**. 2.ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006b.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 031/2006 – ES**: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico: especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006c.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 136/2018 – ME**: pavimentação asfáltica: misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2018.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 139/2010 – ES**: pavimentação: sub-base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010a.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 140/2022 – ES**: pavimentação: sub-base de solo melhorado com cimento: especificação de serviço. Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2022a

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 141/2010 – ES**: pavimentação: base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010b.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 142/2022 – ES**: pavimentação: base de solo melhorado com cimento: especificação de serviço. Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2022b.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 143/2022 – ES**: pavimentação: base de solo-cimento: especificação de serviço. Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2022c.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 167/2013 – ES**: pavimentação: reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portalnd: especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2013.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 172/2016 – ME**: solos: determinação do Índice de Suporte California utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio. Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2016.

DOD – DEPARTMENT OF DEFENSE. **UFC 3-250-11**: soil stabilization and modification for pavements. Virginia: Department of Defense, 2020. Disponível em: [https://wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc\\_3\\_250\\_11\\_2020.pdf](https://wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_3_250_11_2020.pdf). Acesso em: 16 fev. 2021.

DOKOVIC, Ksenija; TOSOVIC, Simo; JANKOVIC, Ksenija, SUSIC, Nenad. Physical-mechanical properties of cement stabilized RAP/crushed stone aggregate mixtures, **Tehnički vjesnik**, v. 26, n. 2, p. 385-390, 2019.

FARIAS, Márcio Muniz de; PALMEIRA, Ennio Marques. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1v.

FEDRIGO, William. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FHWA – Federal Highway Administration. **Overview of Project selection guidelines for cold in-place and cold central plant pavement recycling**. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2018. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif17042.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2020.

GHANIZADEH, Ali Reza; RAHROVAN, Morteza; BAFGUI, Kazem Karkhordari. The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation, **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 165-174, 2018.

HASAN, Md Mehedi; ISLAM, Md Rashadul; TAREFDER, Rafiqul A. Characterization of subgrade soil mixed with recycled asphalt pavement, **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, Xi'an, China, v. 5, n. 3, p. 207-214, 2018.

HORPIBULSUK, Suksun; RACHAN, Runglawan; CHINKULKIJNIWAT, Avirut; RAKSACHON, Yuttana; SUDDEEPPONG, Apichat. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2011-2021, 2010.

HUANG, Yang H. **Pavement analysis and design**. 2.ed. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2004.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization – principles and practice**. Sydney: Butterworths, 1972.

KAMEL, M. A.; AL-BUSTAMI, N. M.; ALSULAMI, B. T. Evaluation of the suitability of recycled asphalt pavement (RAP) for subbases, **International Journal of Emerging**

**Technology and Advanced Engineering**, Madhya Pradesh, Índia, v. 6, n. 5, p. 212-215, 2016.

KANDHAL, Prithvi S.; MALLICK, Rajib B. **Pavement recycling guidelines for state and local governments – Participant’s reference book**. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1997. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/98042.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2020.

KAROL, Reuben H. **Chemical grouting and soil stabilization**. 3.ed. New Jersey: Marcel Dekker, Inc., 2003.

KASU, Sridhar Reddy; MANUPATI, Kumar; MUPPIREDDY, Amaranatha Reddy. Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers, **Construction and Building Materials**, v. 252, 2020.

LIU, T. K. A review of Engineering soil classification systems. **Highway Research Record**, Washington, D.C., n. 156, p. 1-22, 1967. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1967/156/156-001.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2022.

LOIOLA, Clayton Daniel Brasilino; NUNES, Débora de Almeida; ALMEIDA, Guilherme Bravo de Oliveira; CAVALCANTE, Erinaldo Hilário. Avaliação físico-mecânica de um solo argiloso aditivado com cal. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 16., 2018, Ponta Delgada. **Atas [...]**. Ponta Delgada: LREC, SPG, 2018.

MACHADO, Lucas Ferreira Melo; CAVALCANTE, Erinaldo Hilário; ALBUQUERQUE, Fernando Silva; SALES, Angela Teresa Costa. Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017.

MACIEL, Fernanda Costa da Silva; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; SANTOS, José Humberto Teixeira; COSTA, Weiner Gustavo Silva; ALMEIDA, Victor Garcia de; JESUS, José Patrício Bulhões de; PINTO, Camilla Maria Torres; NETO, Edson Góes de Araújo. Dosagem de misturas de solo e material fresado melhoradas com cimento para uso em pavimentação a partir de ensaios de compressão não confinada. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ABMS, 2018.

MAHASNEH, Bassam Z. Use of aluminum residue and recycled asphalt pavement materials to stabilize silty clay soil, **Journal of Infrastructure Systems**, Virgínia, EUA, v. 22, n. 4, 2016.

MISHRA, Brajesh. A study on use of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in flexible pavements, **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, Chennai, Índia, v. 4, n. 12, p. 12170-12177, 2015.

MOLLAMAHMUTOGLU, Murat; AVCI, Eyubhan. Engineering properties of slag-bases superfine cement-stabilized clayey soil, **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 4, p. 541-548, 2018.

MOURA, Luciana Negrão; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; MACIEL, Fernanda Costa da Silva; COSTA, Weiner Gustavo Silva; PINTO, Camilla Maria Torres; CORREIA, Marcos Couto. Dosagem de mistura de solo e material fresado melhorada com cimento para utilização como camada de pavimento rodoviário. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ABMS, 2018.

MOUSA, E.; AZAM, A.; EL-SHABRAWY, M.; EL-BADAWY, S. M. Laboratory characterization of reclaimed asphalt pavement for road construction in Egypt, **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 44, n. 6, p. 393-484, 2017.

MURTHY, V. N. S. **Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 1.ed. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc., 2003.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOFERINI, Luca; SIMONE, Andrea; SANGIORGI, Cesare; MAZZOTTA, Francesco. Investigation on performances of asphalt mixtures made with reclaimed asphalt pavement: effects of interaction between virgin and RAP bitumen. **International Journal of Pavement Research and Technology**, Taiwan, v. 10, n. 4, p. 322-332, 2017.

O'FLAHERTY, Coleman. A. **Highways: the location, design, construction and maintenance of road pavements**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

OKAFOR, Fidelis O. Performance of Recycled Asphalt Pavement as coarse aggregate in concrete. **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, i. 17, p. 47-58, 2010.

OLIVEIRA, Paulo Cesar Arrieiro de. **Avaliação das propriedades mecânicas da mistura de fresado e cascalho laterítico estabilizada com cimento**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

PAIVA, Cassio E. L. de; OLIVEIRA, Paulo César Arrieiro de; PEIXOTO, Creso de Franco. The influence of milling asphalt rates from wearing surface to the flexural strength applied to a recycled layer with Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1294-1300, 2017.

PALURI, Yeswanth. A study on the use of reclaimed asphalt pavement aggregates in pavement quality concrete. **Cement Wapno Beton, Polônia**, v. 24, i. 6, p. 421-431, 2019.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 14. ed. São Paulo: Globo, 2005.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Materiais de construção**. 12. ed. São Paulo: Globo, 2007.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RUKNUDDIN, Ahmed Arqam; NISCHITHA, C. S.; CHETAN, L.; MANOJ, P. Stabilization of subgrade soil using reclaimed asphalt pavement (RAP), **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, Bhopal, Índia, v. 8, n. 5, p. 2661-2666, 2019.

SEFEROGLU, Aysegul Gunes; SEFEROGLU, Mehmet Tevfik; AKPINAR, Muhammet Vefa. Investigation of the effect of recycled asphalt pavement material on permeability and bearing capacity in the base layer. **Hindawi**, v. 2018, 2018.

TAHA; Ramzi; AL-HARTHY, Ali; AL-SHAMSI, Khalid; AL-ZUBEIDI, Muamer. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases, **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 239-245, 2002.

TRICHÊS, Glicério; MELO, João Victor Staub de; FRANKEN, Luis F.; VIEIRA, Lucas S. de Souza; NEVES, Maximiliano F. Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42., 2013, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABPv, 2013.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1978.

VERÇOSA, Enio José. Materiais Betuminosos e suas aplicações. In: BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção 2**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985.

WANG, Yangyang; LENG, Zhen; LI, Xi; HU, Chichun. Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1031-1038, 2018.

WIRTGEN. **The world of Wirtgen cold milling machines – efficient removal and granulation of road surfaces**. Germany: WIRTGEN, 2020. Disponível em: [https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o19159v77\\_W\\_brochure\\_ColdMillingMachines\\_0520\\_V3\\_EN.pdf](https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o19159v77_W_brochure_ColdMillingMachines_0520_V3_EN.pdf). Acesso em: 8 dez. 2020.

YODER, Eldon Joseph; WITCZAK, Matthew W. **Principles of pavement design**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1975.

ZHANG, Kun; MUHUNTHAN, Balasingam. Effects of production stages on blending and mechanical properties of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 679-689, 2017.