



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LYNEKER SOUZA DE MOURA

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO TÊXTIL EM REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS: UMA ANÁLISE MECÂNICA, MICROSCÓPICA E AMBIENTAL**

Recife

2021

LYNEKER SOUZA DE MOURA

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO TÊXTIL EM REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS: UMA ANÁLISE MECÂNICA, MICROSCÓPICA E AMBIENTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Recife

2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

M929u Moura, Lyneker Souza de.  
Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos:  
uma análise mecânica, microscópica e ambiental / Lyneker Souza de  
Moura – Recife, 2021.  
193 f.: figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.  
Coorientadora: Profa. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.  
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Revestimento asfáltico. 3. CBUQ. 4. Fíler.  
5. Lodo têxtil. 6. Pavimentação. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira  
(Orientador). II. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Coorientadora). III.  
Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2021–109

**LYNEKER SOUZA DE MOURA**

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO TÊXTIL EM REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS: UMA ANÁLISE MECÂNICA, MICROSCÓPICA E AMBIENTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em 21/06/2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

participação por videoconferência

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro(orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

participação por videoconferência

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Laura Maria Goretti da Motta (examinadora externa)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

participação por videoconferência

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares (examinador externo)  
Universidade Federal do Ceará

---

participação por videoconferência

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Erika Pinto Marinho (examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

participação por videoconferência

Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar vitórias inimagináveis. À minha família, pelo incentivo, em especial a meus pais João e Ramida e à minha irmã Lysanne que sempre estiveram do meu lado para que eu alcançasse os meus objetivos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arnaldo Carneiro, por acreditar na minha ideia e se envolver nessa empreitada comigo. Por todas as contribuições em todas as fases deste trabalho e nas publicações.

À Prof. Dr.<sup>a</sup> Ana Cecília, por mais de uma década de parceria. Esse período me trouxe muito mais que uma formação acadêmica, um crescimento integral. Obrigado pela presença constante nas conquistas e pelo encorajamento nos momentos de desânimo.

À Prof. Dr.<sup>a</sup>. Lêda Lucena, que prontamente abriu as portas do laboratório de engenharia de pavimentos da UFCG.

À Construtora Ancar LTDA, pelo auxílio operacional e pela doação de materiais e insumos.

Aos técnicos do laboratório Tarcísio de Lima, Gilson Oliveira e Henrique Lira. Aos amigos da pós-graduação na UFCG e da UFPE, Conrado Silva, Christian Ziegler, Daniel Beserra e João Pedro Bezerra. Às bolsistas de iniciação científica Carina Lessa e Ana Carolina Reis, pelos auxílios em diversos momentos da pesquisa.

Aos professores Dr.<sup>a</sup>. Erika Pinto, Dr. Jorge Soares, Dr.<sup>a</sup>. Laura Motta e Dr. Maurício Andrade por aceitarem o convite para a banca, nos honrando com suas contribuições.

“Fazer ciência não é somente expandir o conhecimento, mas desenvolver a humanidade pensando nas pessoas”.

Lyneker Souza de Moura.

## RESUMO

O lodo têxtil é um resíduo industrial de difícil tratamento e alto custo de disposição final. Entretanto, quando seco e destorroado, adquire propriedades granulométricas compatíveis com as adições de enchimento utilizadas na pavimentação rodoviária. Avaliou-se sua incorporação ao concreto asfáltico nos âmbitos mecânicos, microscópicos e ambientais. Para tanto, foram realizadas dosagens do tipo Marshall contendo de 2,0% a 5,0% de lodo e de 4,5% a 6,5% de ligante, objetivando uma formulação com a inclusão máxima do resíduo dentro dos parâmetros aceitáveis. Mediante as análises efetuadas, é evidente a potencialidade da adição de 2,0% a 3,0% de lodo têxtil em misturas asfálticas da faixa “C” como material constituinte do revestimento, seja com os agregados, seja misturado previamente ao ligante asfáltico. Quanto à viscosidade do ligante modificado por lodo têxtil, houve um incremento na viscosidade do CAP 50/70 em até 37% a 135°C e até 28% a 177°C, o que torna o ligante menos suscetível a mudanças térmicas. Não houve efeitos prejudiciais na resistência à tração, deformação permanente e rigidez das misturas, mantendo-se estatisticamente equivalentes à amostra de referência sem lodo. A inclusão de lodo têxtil não ocasionou prejuízos à durabilidade do concreto asfáltico, verificada por meio do ensaio Cântabro e dano por umidade induzida, além de demonstrar adesividade satisfatória, comprovada por análises microscópicas. Quanto à resistência à fadiga, o lodo têxtil não apresentou efeito deletério ao revestimento asfáltico nas misturas de 2,0%, tendo sido observado um incremento de até 38% no número de ciclos para as misturas com 3,0% de lodo têxtil, sendo a adição direta ao ligante. Os resultados de deformação permanente indicam que as misturas asfálticas aqui apresentadas são recomendadas para vias de tráfego médio (N, entre  $3 \times 10^6$  e  $1 \times 10^7$ ). As análises ambientais de lixiviação, solubilização e microscópicas indicam um aprisionamento eficaz do lodo têxtil dentro da matriz asfáltica. Uma análise simplificada da viabilidade operacional demonstrou que é possível a utilização de até 20t de lodo têxtil por km de via pavimentada. Por fim, pode-se afirmar que os resultados dessa pesquisa ratificam a aplicabilidade do revestimento asfáltico como uma matriz de imobilização do resíduo por meio da garantia de sua eficaz apreensão, além de trazer benefícios mecânicos ao pavimento, e ambientais, à sociedade.

**Palavras-chave:** Revestimento asfáltico. CBUQ. Fíler. Lodo têxtil. Pavimentação.

## ABSTRACT

Textile sludge is an industrial waste that is difficult to treat and has a high cost of final disposal. However, when dry and ground, it gains granulometric properties compatible with the filler additions used in road paving. Its incorporation to asphalt concrete was evaluated in mechanical, microscopic and environmental scopes. For this purpose, Marshall design containing 2.0 to 5.0% of sludge and 4.5 to 6.5% of binder were carried out, aiming at a formulation with the maximum residue content within acceptable parameters. Through the analyzes, it is evident the potential of adding 2.0 to 3.0% of textile sludge in asphalt mixtures type "C" as a constituent material of the surface course, either with aggregates, or previously mixed with the binder. As for the viscosity of the binder modified by textile sludge, there was an increase in the viscosity of AC 50/70 by up to 37% at 135°C and up to 28% at 177°C, which makes the binder less susceptible to thermal changes. There were no harmful effects on the tensile strength, permanent deformation and stiffness of the mixtures, with these results remaining statistically equivalent to the reference sample, without sludge. The inclusion of textile sludge did not cause any damage to the durability of the asphalt concrete, verified through the cantabro and moisture damage test, in addition to demonstrating satisfactory adhesion, indicated by microscopic analysis. As for fatigue resistance, the textile sludge did not present a deleterious effect on the asphalt coating in the 2.0% mixtures, with an increase of up to 38% in the number of cycles for mixtures with 3.0% textile sludge, being observed the direct addition to the binder. The results of permanent deformation indicate that the asphalt mixtures investigated are recommended for medium traffic (ESALS between  $3 \times 10^6$  and  $1 \times 10^7$ ). Environmental analyzes of leaching, solubilization and microscopy indicate an effective trapping of textile sludge within the asphalt matrix. A simplified analysis of operational viability showed that it is possible to use up to 20ton of textile sludge per km of paved road. Finally, it can be said that the results of this research ratify the applicability of the asphalt surface course as a matrix for immobilizing waste, ensuring its effective apprehension, in addition to bringing mechanical benefits to the pavement, and environmental benefits to society.

**Keywords:** Asphalt surface course. Asphalt concrete. Filer. Textile sludge. Paving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui de localização do APL de confecções do Agreste pernambucano. .....	23
Figura 2 - Processo de beneficiamento e tingimento do <i>jeans</i> .....	25
Figura 3 - Acabamento dos processos de beneficiamento.....	25
Figura 4 - Efluente têxtil sendo descartado sem tratamento .....	26
Figura 5 - Estação de tratamento do efluente de uma lavanderia de <i>jeans</i> .....	27
Figura 6 - Processo de decantação.....	28
Figura 7 - Estrutura química dos principais grupos presentes em fibras têxteis naturais e sintéticas. ....	29
Figura 8 - Corantes utilizados na indústria têxtil, origem dos metais e mecanismo de liberação.....	30
Figura 9 - Proporções usuais dos constituintes do concreto asfáltico. ....	39
Figura 10 - Classificação dos ligantes asfálticos. ....	41
Figura 11 - Curva do ensaio de estabilidade Marshall. ....	42
Figura 12 - Esquema de aplicação do carregamento no ensaio de RT.....	43
Figura 13 - Estágios da fadiga nas estruturas. ....	44
Figura 14 - Zonas da curva referente ao ensaio de <i>flow number</i> . ....	45
Figura 15 - Lodo têxtil no leito de secagem.....	66
Figura 16 - Curva de viscosidade versus temperatura do ligante.....	69
Figura 17 - Incorporação do lodo têxtil ao ligante asfáltico. ....	70
Figura 18 - Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico .....	74
Figura 19 - Imagem para processamento digital .....	74
Figura 20 - Metodologia para determinação da Gmm .....	76
Figura 21 - Compactador de laboratório Marshall .....	79
Figura 22 - Prensa hidráulica para compressão diametral .....	80
Figura 23 - Metodologia Marshall.....	81
Figura 24 - Corpos de prova moldados com diferentes teores de lodo têxtil e ligante asfáltico .....	82
Figura 25 - Esquema da volumetria de uma mistura asfáltica.....	83
Figura 26 - Caracterização geométrica dos corpos de prova.....	85
Figura 27 - Corpos de prova em repouso.....	86
Figura 28 - Realização do ensaio de resistência à tração .....	86

Figura 29 - Corpo de prova preparado para o ensaio de módulo de resiliência .....	88
Figura 30 - Equipamento utilizado para os ensaios de fadiga e módulo de resiliência .....	89
Figura 31 - <i>Asphalt Mixture Performance Tester</i> (AMPT) .....	91
Figura 32 - Sequência do procedimento para realização do ensaio Lottman.....	93
Figura 33 - Agitador rotatório de frascos para ensaios de lixiviação .....	94
Figura 34 - Amostras em descanso durante ensaio de solubilização.....	95
Figura 35 - Equipamentos utilizados para análise dos extratos solubilizados .....	97
Figura 36 - Corte de corpos de prova para caracterização microestrutura .....	98
Figura 37 - Microscopia petrográfica óptica.....	99
Figura 38 - Esquema metodológico.....	100
Figura 39 - Granulometria a laser do lodo têxtil.....	105
Figura 40 - Difratoograma de Raios X do lodo têxtil.....	107
Figura 41 - Termogravimetria do lodo têxtil .....	107
Figura 42 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier do Lodo Têxtil.....	108
Figura 43 - Microscopia eletrônica de varredura do lodo têxtil em análise ampliada em 1200x (esq.) e 5000x (dir.) .....	110
Figura 44 - Curvas de viscosidade do CAP 50/70 padrão e modificado com 2,0% e 3,0% de lodo têxtil seco .....	112
Figura 45 - Composição granulométrica dos agregados .....	114
Figura 46 - Curva granulométrica, faixa “C” com diferentes teores de lodo têxtil ....	115
Figura 47 - Ensaio de adesividade do agregado ao ligante (CAP puro) brita 12 (A), 19 (B) .....	117
Figura 48 - Limiarização das misturas de referência, com 2,0% de lodo seco e 3,0% de lodo seco.....	118
Figura 49 - Interfaces da película de ligante ao agregado .....	119
Figura 50 - Variação da densidade teórica e Gmm nas misturas com adição de lodo têxtil.....	121
Figura 51 - Variação da densidade aparente nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação à mistura de referência .....	122
Figura 52 - Variação da porcentagem de vazios nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação à mistura de referência .....	123

Figura 53 - Volume de vazios da mistura de referência por microscopia ótica petrográfica .....	124
Figura 54 - Vazios preenchidos com ar nas misturas asfálticas, A-2,0% lodo CAP; B-2,0% lodo seco; C-3,0% lodo CAP .....	125
Figura 55 - Variação dos vazios preenchidos com betume nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação com a mistura de referência .....	126
Figura 56 - Variação da estabilidade Marshall (kgf) nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação com a mistura de referência .....	127
Figura 57 - Variação da fluência Marshall nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação com a mistura de referência.....	128
Figura 58 - Resistência à tração das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência lodo têxtil .....	129
Figura 59 - Módulo de resiliência das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência lodo têxtil .....	131
Figura 60 - Modelo de fadiga de N° de ciclos X diferença de tensões .....	133
Figura 61 - Modelo de fadiga de N° de ciclos X deformação resiliente .....	134
Figura 62 - Microscopia ótica do CBUQ com 3,0% de lodo têxtil CAP .....	135
Figura 63 - Resultados do ensaio de <i>flow number</i> das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência .....	136
Figura 64 - Desgaste médio do ensaio Cântabro das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência.....	138
Figura 65 - Corpos de prova após o desgaste no ensaio Cântabro, seta no 3,0% lodo CAP .....	139
Figura 66 - Resistência ao dano por umidade induzida das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência .....	141
Figura 67 - Microscopia do mástique com de lodo têxtil (37% CAP + 63% lodo) ....	142
Figura 68 - Microscopia da interface do agregado com o ligante modificado com 3,0% de lodo têxtil .....	142

Figura 69 - FTIR dos extratos lixiviados das misturas asfálticas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência.....	144
Figura 70 - FTIR do lodo têxtil .....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de diferentes amostras de lodo têxtil .....	32
Tabela 2 - Resumo das aplicações do lodo têxtil na engenharia civil. ....	38
Tabela 3 - Revisão de alguns resíduos usados como finos alternativos em misturas asfálticas. Teor em relação à massa total da mistura asfáltica .....	54
Tabela 4 - Revisão de alguns resíduos usados como finos alternativos em misturas asfálticas. Teor do resíduo em relação à massa total do fíler .....	55
Tabela 5 - Revisão de alguns resíduos usados como finos alternativos em misturas asfálticas. Teor do resíduo em relação à massa total dos agregados.....	56
Tabela 6 - Revisão de alguns resíduos usados como fíleres alternativos em misturas asfálticas. Teor do resíduo em relação à massa total do ligante asfáltico.....	57
Tabela 7 - Influência dos resíduos finos nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas .....	57
Tabela 8 - Compilação das técnicas empregadas para análise ambiental em misturas asfálticas contendo resíduos .....	64
Tabela 9 - Técnicas empregadas para caracterização microestrutural .....	67
Tabela 10 - Resultados da caracterização do CAP 50/70 .....	68
Tabela 11 - Parâmetros observados no ligante modificado com lodo têxtil.....	70
Tabela 12 - Carga abrasiva para o ensaio de abrasão “Los Angeles” .....	72
Tabela 13 - Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles” .....	72
Tabela 14 - Especificações granulométricas para agregados para traço de CBUQ da faixa C .....	78
Tabela 15 - Especificações de Concreto Asfáltico CA. ....	78
Tabela 16 - Quantitativo de corpos de prova para ensaio Marshall. ....	83
Tabela 17 - Quantitativo de corpos de prova para ensaios mecânicos .....	84
Tabela 18 - Metodologias e equipamentos utilizados na análise dos extratos solubilizados.....	96
Tabela 19 - Resumo das metodologias empregadas na concepção e análises das misturas asfálticas.....	101
Tabela 20 - Composição química do lodo têxtil.....	105
Tabela 21 - Propriedades do CAP 50/70 modificado com lodo têxtil.....	111
Tabela 22 - Temperaturas de aquecimento e compactação dos ligantes modificados com lodo têxtil .....	111

Tabela 23 - Composição granulométricas dos esqueletos de agregados e lodo têxtil seco.....	115
Tabela 24 - Caracterização física dos agregados .....	116
Tabela 25 - Processamento digital de imagens das misturas de referência, com 2,0% de lodo seco e 3,0% de lodo seco.....	118
Tabela 26 - Parâmetros volumétricos da metodologia Marshall – lodo úmido (lodo CAP).....	120
Tabela 27 - Parâmetros volumétricos da metodologia Marshall – Lodo seco .....	120
Tabela 28 - Fluorescência de Raios X pó de corte das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência .....	143
Tabela 29 - Elementos presentes nos extratos solubilizados.....	146
Tabela 30 - Composição de custos do beneficiamento do lodo têxtil.....	148
Tabela 31 - Síntese qualitativa das amostras contendo lodo têxtil em comparação com a referência sem lodo têxtil.....	149

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APDI	Área do Processamento Digital de Imagens
APL	Arranjo Produtivo Local
ASTM	American Society for Testing Materials
BET	Brunauer, Emmett e Taller
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
Cetene	Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste
DNIT	Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte
DRX	Difratometria ao Raios X
DUI	Dano por Umidade Induzida
FRX	Fluorescência de Raios x
GMM	Densidade relativa máxima medida
LODO CAP	Lodo têxtil adicionado ao ligante
LODO SECO	Lodo têxtil adicionado aos agregados
LVDT	Linear Variable Diferencial Transducers
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MR	Módulo de resiliência
NBR	Norma Brasileira
Propesq	Pró-Reitoria para Assuntos de Pesquisa
RBV	Relação Betume Vazios
RMR	Região Metropolitana do Recife
RT	Resistência à tração
Sebrae	Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas
Sinapi	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TCE	Tribunal de Contas do Estado
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>21</b>
1.1.1	Objetivos específicos.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>APL de confecções do Agreste pernambucano e a produção de lodo têxtil .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Aplicações do lodo têxtil na engenharia civil .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3</b>	<b>Misturas betuminosas e suas propriedades .....</b>	<b>38</b>
2.3.1	Ensaio convencionais .....	41
2.3.2	Ensaio de módulos .....	42
2.3.3	Ensaio de ruptura .....	43
2.3.4	Ensaio de deformação permanente.....	44
<b>2.4</b>	<b>Material de enchimento e sua influência em misturas asfálticas.....</b>	<b>46</b>
<b>2.5</b>	<b>Uso de resíduos como enchimento em misturas asfálticas e suas formas de adição .....</b>	<b>48</b>
<b>2.6</b>	<b>Indicativos de eficácia de misturas asfálticas como imobilizadoras de resíduos.....</b>	<b>58</b>
<b>2.7</b>	<b>Avaliação de caráter ambiental do uso de resíduos em misturas asfálticas .....</b>	<b>61</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1</b>	<b>Lodo têxtil .....</b>	<b>65</b>
<b>3.2</b>	<b>Ligantes utilizados .....</b>	<b>68</b>
3.2.1	Incorporação do lodo têxtil.....	69
3.2.1.1	<i>Incorporação do lodo têxtil aos agregados.....</i>	<i>69</i>
3.2.1.2	<i>Incorporação do lodo têxtil no ligante asfáltico.....</i>	<i>70</i>
<b>3.3</b>	<b>Ensaio para propriedades dos agregados .....</b>	<b>71</b>
3.3.1	Granulometria.....	71
3.3.2	Ensaio de Abrasão “Los Angeles” .....	71
3.3.3	Forma das partículas.....	73
3.3.4	Massa específica e absorção .....	73
3.3.5	Ensaio de adesividade .....	73
3.3.6	Equivalente de areia.....	75

3.3.7	Densidade real .....	75
3.3.8	Massa específica real .....	76
3.3.9	Densidade específica <i>Rice</i> (Gmm) .....	76
3.3.10	Sanidade .....	77
<b>3.4</b>	<b>Metodologia de dosagem.....</b>	<b>77</b>
3.4.1	Determinação da faixa granulométrica .....	77
3.4.2	Metodologia Marshall .....	79
<b>3.5</b>	<b>Ensaio para propriedades mecânicas .....</b>	<b>84</b>
3.5.1	Resistência à tração .....	84
3.5.2	Módulo de resiliência .....	87
3.5.3	Resistência à fadiga .....	88
3.5.4	Ensaio Cântabro .....	89
3.5.5	<i>Flow number</i> .....	90
<b>3.6</b>	<b>Avaliação da durabilidade e do caráter ambiental .....</b>	<b>91</b>
3.6.1	Resistência ao dano por umidade induzida (DUI) .....	92
3.6.2	Lixiviação .....	94
3.6.3	Solubilização .....	95
3.6.4	Análise química do resíduo do corte dos corpos de prova .....	97
3.6.5	Análise microestrutural da mistura .....	98
<b>3.7</b>	<b>Viabilidade operacional.....</b>	<b>99</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>104</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do lodo têxtil.....</b>	<b>104</b>
4.1.1	Caracterização granulométrica do lodo têxtil.....	104
4.1.2	Caracterização microestrutural e química do lodo têxtil .....	105
<b>4.2</b>	<b>Ligante asfáltico modificado por lodo têxtil.....</b>	<b>110</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterização dos agregados.....</b>	<b>113</b>
<b>4.4</b>	<b>Metodologia de dosagem Marshall .....</b>	<b>119</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio para propriedades mecânicas .....</b>	<b>129</b>
4.5.1	Resistência à tração .....	129
4.5.2	Módulo de resiliência .....	130
4.5.3	Resistência à fadiga .....	133
4.5.4	Deformação permanente ( <i>Flow number</i> ).....	136
4.5.5	Desgaste via ensaio Cântabro.....	138
<b>4.6</b>	<b>Avaliação da durabilidade e caráter ambiental.....</b>	<b>139</b>

4.6.1	Resistência ao dano por umidade induzida.....	139
4.6.2	Microscopia petrográfica óptica.....	141
4.6.3	Fluorescência de Raios X do pó de corte.....	143
4.6.4	Análise qualitativa dos extratos lixiviados.....	143
4.6.5	Análise quantitativa dos extratos solubilizados.....	145
<b>4.8</b>	<b>Compilação de resultados e discussões.....</b>	<b>149</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>153</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>155</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS.....</b>	<b>176</b>
	<b>APÊNDICE B - CURVAS GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS.....</b>	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE C – PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DA DOSAGEM MARSHALL.....</b>	<b>182</b>
	<b>APÊNDICE D – VALORES E STATUS DO TESTE F E T- STUDENT.....</b>	<b>191</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As lavanderias e o beneficiamento do *jeans* são elementos cruciais para o arranjo produtivo local - APL de confecções do Agreste pernambucano. Esse é um importante polo produtor têxtil do Brasil e os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama têm maior notoriedade.

Nesse contexto, percebe-se uma concentração regional de micro, pequenas e médias empresas, especializadas em diversos segmentos do ramo de têxtil. Conhecido nacionalmente como APL de confecções do Agreste pernambucano, esse conglomerado é atualmente considerado como o segundo maior produtor de artigos têxteis do país. Estima-se que o faturamento anual bruto do polo está próximo de R\$ 1 bilhão. São cerca de 20 mil unidades produtoras que empregavam em 2013 aproximadamente 130 mil pessoas nas cidades circunvizinhas, de acordo com pesquisa do (Sebrae) (2013).

Segundo o Sebrae (2019), o município de Toritama é conhecido como a capital do *jeans*, sendo considerado o segundo maior polo de confecção *jeanswear* do Brasil. Este segmento têxtil é um dos pilares do polo de têxtil de confecções do Agreste pernambucano. Tomando como base apenas o município de Toritama, tem-se mais de mil fábricas de *jeans* e 60 mil empregos, sendo 15 mil diretos. Os municípios de Surubim, Caruaru e Santa Cruz do Capibaribe, além de Toritama, integram o Arranjo Produtivo Local (APL), no qual 120 mil empregos diretos e 360 mil indiretos têm algum tipo de ligação com a cadeia do *jeans*.

A Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) (2018) expressa que, do ponto de vista econômico, as lavanderias têxteis contribuem para um impulsionamento comercial, gerando emprego e renda. Contudo, do ponto de vista ambiental, o segmento precisa de melhorias, sobretudo com iniciativas que contribuam para minimizar os impactos negativos ao meio ambiente. Esse tipo de indústria tem um relevante potencial degradador ao meio ambiente, promovendo poluição hídrica, atmosférica e do solo, além do uso eventual de madeira ilegal, devido ao elevado gasto energético, e de volumes significativos de água, por causa do alto consumo e do pouco reaproveitamento, além de gerar significativas quantidades de resíduos sólidos.

O lodo têxtil do APL de confecções do Agreste pernambucano é um resíduo semissólido, proveniente das lavanderias de beneficiamento têxtil, especializadas

prioritariamente no beneficiamento do *jeans*. Este é composto de matéria orgânica e inorgânica, que apresenta difícil processo de tratamento e alto custo de disposição final por causa de sua complexidade e estado físico. Atualmente, é realizado apenas o descarte desse material, que, por vezes, vem causando sérios danos ambientais, quando tal processo acontece de maneira inadequada.

No entanto, quando seco e destorroado em baixa energia, o lodo têxtil adquire características físicas (de material de granulometria fina) e químicas que sugerem a possibilidade de sua utilização como componente da construção civil na forma de fíler alternativo. De acordo com Cogo (2011), o efluente e o lodo têxtil podem conter metais pesados como chumbo, cádmio, manganês, cromo, cobre, níquel, além de alumínio, ferro e zinco, provenientes dos corantes. No caso de um dos lodos têxteis gerados no APL de Confecções Pernambucano, Leloup (2013), por meio de FRX (Fluorescência de Raios X), identificou prioritariamente a presença de silício, alumínio, enxofre, cálcio, ferro, entre outros elementos químicos em quantidades menores.

Sobretudo, vislumbra-se a possibilidade de uso de fíler alternativo em matrizes asfálticas. Amaro *et al.* (2018) endossam a possibilidade da inserção de lodo de lavanderia industrial em pavimento asfáltico. O segmento da pavimentação utiliza, de modo geral, fíleres de origem mineral que, por sua vez, têm quantidade finita. Além do elevado custo de extração, processamento e transporte desse material, se comparado a um fíler alternativo produzido localmente. Diante do exposto, a utilização desse resíduo diminui a busca por novas explorações e promove um destino mais adequado para ele. Ressalta-se que, para localidades fora do APL de confecções, será necessário o estudo da viabilidade econômica para o transporte desse material.

Diversos autores corroboram com a premissa de que a incorporação de resíduos a pavimentos asfálticos é uma alternativa viável à destinação de diversos resíduos como: cinzas volantes (CHAN *et al.*, 1996; ÇELIK, 2008; SOBOLEV *et al.* 2014); pó calcário; pó de resíduo de carvão e suas cinzas (MODARRES; RAHMANZADEH, 2014; MODARRES *et al.*, 2015); cinzas volantes com escória de alto forno (ALI; FIAZ, 2009); cinzas volantes associadas com resíduo de plástico (RONGALI *et al.*, 2013); cinza de bagaço de cana-de-açúcar (LHWAINI *et al.*, 2015; HUWAE; PARERA; TANIJAYA, 2016; ZAINUDIN *et al.*, 2016); cinza de casca de arroz (SARGIN *et al.*, 2013; XUE *et al.*, 2014; AL-HDABI, 2016); pó de concha marinha triturada (ARABANI; BABAMOHAMMADI; AZARHOOSH, 2014); cinza de algaroba do

APL têxtil Pernambucano (MOURA *et al.*, 2015; MOURA, 2017); lodos de estação de tratamento de água e esgoto (MARTINEZ, 2014; LENG *et al.*, 2018).

Segundo Lucena (2012), o pavimento contendo resíduos tóxicos incorporados tende a formar uma matriz sólida altamente impermeável, aprisionando-os ou fixando-os nesta estrutura. Embora tal afirmação seja para camadas de bases e sub-bases, essa capacidade pode se estender ao revestimento asfáltico. Dessa maneira, misturas asfálticas se tornam uma boa alternativa para estabilização e utilização de resíduos ou contaminantes que não tenham descarte adequado.

A quantidade de lodo gerado em uma lavanderia depende diretamente da eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes que são adotados, sejam físico-químicos e/ou biológicos. Entre outros fatores, a possibilidade de ser carreado, tornou sua disposição no ambiente um problema ambiental para as lavanderias têxteis (DIAS JÚNIOR, 2013). Segundo a empresa Norte Visual (2010 apud SOUTO, 2017), uma lavanderia industrial têxtil de médio porte, que processa 100 mil peças de vestuários por ano, gera aproximadamente 6 toneladas de lodo têxtil seco nesse período, sendo essa quantidade de resíduo atrativa para as obras de pavimentação e compatível com a ordem de grandeza dos materiais utilizados para recapeamento asfáltico no Agreste pernambucano no ano de 2020, conforme indicado no portal “Tome conta” do Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE) (2020).

Nesse cenário, deseja-se avaliar a viabilidade da incorporação do lodo têxtil, gerado no APL de confecções do Agreste pernambucano, em concreto betuminoso usinado a quente, nas camadas de rolamento. Sobretudo, definir tecnicamente a metodologia mais eficiente e adequada para incorporação desse lodo às misturas asfálticas, seja diretamente com os agregados ou previamente misturado ao ligante. Para tal, foram realizadas análises no tocante à resistência mecânica e durabilidade dos pavimentos, bem como também estudos ambientais, a fim de comprovar a eficácia do aprisionamento deste resíduo na matriz asfáltica. Por fim, realizou-se uma abordagem em termos de viabilidade operacional e de custos. Com estas análises, pretendeu-se concluir se as misturas asfálticas podem ser uma opção segura para incorporar o lodo gerado pelo ciclo do beneficiamento do jeans ratificando, assim, as misturas asfálticas como uma opção segura de imobilização para esse tipo de material.

## 1.1 Objetivos

Avaliar a incorporação do lodo têxtil gerado no APL de confecções do Agreste pernambucano como adição alternativa e constituinte de misturas asfálticas a quente, verificando a viabilidade técnica e a eficiência da mistura asfáltica na imobilização desse tipo de resíduo.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Para avaliar e verificar, pretende-se realizar três objetivos específicos:

1. Formular e avaliar as propriedades volumétricas e mecânicas do concreto asfáltico com incorporação de lodo têxtil seco e destorroadado;
2. Estabelecer a técnica adequada de incorporação do lodo têxtil: no agregado ou no ligante asfáltico;
3. Avaliar o impacto técnico, financeiro e ambiental da incorporação do lodo têxtil em misturas asfálticas e suas interações microestruturais com a matriz asfáltica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas as revisões e o estado da arte.

### 2.1 APL de confecções do Agreste pernambucano e a produção de lodo têxtil

O Agreste pernambucano abriga um importante polo produtor têxtil no Brasil, que tem como protagonistas os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, cuja especialização é em confecção de vestuário. Focado na produção de diversos itens da indústria da moda como casual, brim, malharia, *jeans*, infantil e íntima, destacando-se a presença predominante de micro, pequenas e médias empresas.

Hoje consolidado como fonte de renda e ocupação, o APL de confecções do Agreste pernambucano surgiu como alternativa para contrapor às adversidades climáticas, geográficas e econômicas enfrentadas na prática da agricultura de subsistência e pecuária impostas pela aridez de algumas regiões do Nordeste brasileiro. Partindo da iniciativa de homens e mulheres situados em áreas preponderantemente rurais do estado de Pernambuco no fim dos anos 1940, com o passar dos anos, nas décadas de 1950 e 1960, a produção têxtil, conjuntamente às tradicionais feiras da “sulanca” em Caruaru, começou a ganhar força no Agreste de Pernambuco. Ebrahim (2014) relembra que nos primeiros momentos surgiram os fabricos, inicialmente de roupas feitas com retalhos maiores a preços populares e, ao longo do tempo, outros segmentos foram incluídos, de tal forma que, cinco décadas depois, o APL de confecções do Agreste pernambucano chegou ao patamar atual. Na contemporaneidade, segundo Febratex Group (2019), nas cidades de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama são produzidas cerca de 800 milhões de peças de vestuário todos os anos, tanto para o comércio nacional, quanto para o internacional, movimentando bilhões de reais.

Um fato relevante é que a região tem notória expertise na produção do *jeans*, especialmente a cidade de Toritama, que se destaca nesse sentido. Além de dezenas de empresas de confecção, ela também concentra várias indústrias de beneficiamento, as quais realizam lavagens e customizações desses artefatos. Com isso, o polo se tornou o segundo maior distribuidor de *jeans* nacional, representando uma parcela significativa do mercado, sendo responsável por 14% da produção,

ficando atrás apenas do Polo Paulista, que já tem décadas de tradição (FEBRATEX GROUP, 2019). Por fim, Santa Cruz do Capibaribe dispõe do Moda Center que, segundo Esteves (2019), atualmente é composto por seis módulos que ocupam uma área coberta de 120 mil m<sup>2</sup>, 6 mil vagas de estacionamento, situado em um espaço de 32 hectares. A ampla estrutura do Moda Center Santa Cruz, considerado o maior shopping atacadista de confecções da América Latina, reúne mais de 10 mil pontos comerciais, entre lojas e boxes. Nos períodos de maior movimento, o local chega a receber mais 150 mil clientes por semana, vindos de todas as regiões país.

Em relação a Recife, o município de Caruaru está localizado a 129,4 km; já Toritama, a 164 km e Santa Cruz do Capibaribe, a 184,4 km, sendo esses destacados na Figura 1.

Figura 1 - Croqui de localização do APL de confecções do Agreste pernambucano.



Fonte: Esteves (2019).

Atualmente, o alcance do APL de confecções do Agreste pernambucano é de 13 cidades: Agrestina, Belo Jardim, Bom Jardim, Brejo da Madre de Deus, Caruaru, Cupira, Riacho das Almas, Santa Cruz do Capibaribe, Santa Maria do Cambucá, Surubim, Taquaritinga do Norte, Toritama e Vertentes. Também segundo dados de Esteves (2019), esse APL é de notória relevância na economia pernambucana. Para

o entendimento do processo que origina o lodo têxtil, é primordial o conhecimento da indústria e dos processos que originam o efluente têxtil. Cometti *et al.* (2016) reiteram que as “lavanderias” são responsáveis pelos processos de lavagem, amaciamento, tingimento, descoloração e demais processos de modificação no produto têxtil. O termo generalizador, “lavanderia de *jeans*”, tem origem no uso do senso comum. No APL de Confecções do Agreste, as lavanderias são de grande importância para a qualidade do produto final, mas também grandes geradoras de poluentes ambientais e consumidoras de recursos naturais, principalmente a água.

Os insumos empregados nas lavanderias industriais dependem diretamente dos processos de beneficiamento que serão realizados, proporcionando diferentes acabamentos ao *jeans*. De acordo com Souto (2017), a variação nas peças está ligada à passagem por determinados processos, como os citados por Silva (2016).

**Amaciado:** consiste em favorecer melhoria em relação ao toque do tecido, ficando mais agradável para o uso, sendo aplicados processos químicos apenas de desengomar o tecido e amaciar para melhorar a sensação ao toque.

**Destroyed:** aplicação de procedimentos físicos em que o *jeans* pode ter infinitas combinações de desgaste ou cortes para aparentar muito gasto, muito apreciado pela população jovem.

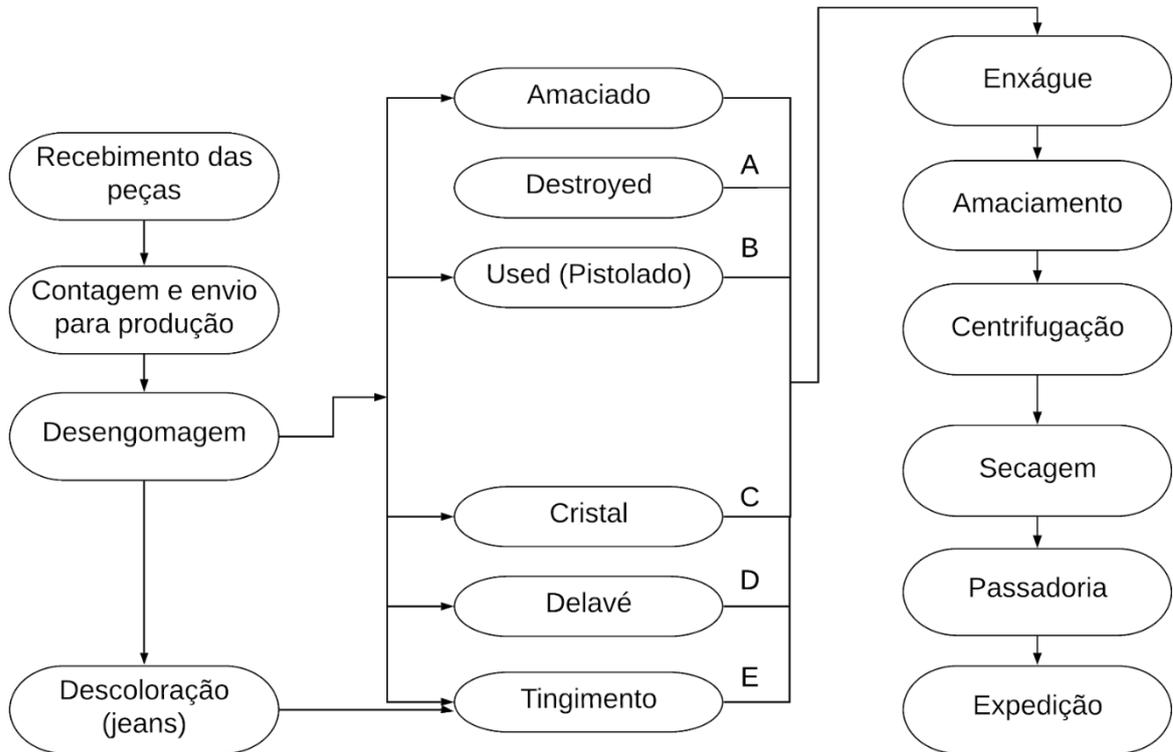
**Used:** consiste na aplicação de uma solução de permanganato de potássio para que ocorra assim a descoloração na área aplicada simulando também desgaste na peça, este processo é bastante utilizado no beneficiamento do *jeans*.

**Cristal (azul claro):** consiste em coloração bem clara no *jeans*. É preferível utilizar uma substância oxidante forte, como o hipoclorito de sódio.

**Délavé (azul médio):** consiste na obtenção da coloração mais forte no tecido. Normalmente é aplicado o peróxido de hidrogênio, sendo sua aplicação bastante recomendada principalmente pela facilidade de sua neutralização e ausência de resíduo, pois ao utilizar enzimas para a neutralização da peça se decompõe e um dos seus produtos é a água (SILVA, 2016, p. 73).

Essa etapa está inserida em um processo produtivo que é apresentado na Figura 2. Inicialmente, as peças são recebidas pela lavanderia, posteriormente são contadas e encaminhadas para a produção, a qual se inicia com a etapa de desengomagem, ou seja, retirada da goma que é aplicada na tecelagem; em seguida, são realizadas as transformações citadas anteriormente.

Figura 2 - Processo de beneficiamento e tingimento do *jeans*



Fonte: Adaptado de Silva (2016).

É possível visualizar o tipo de *jeans* gerado em cada processo de transformação na Figura 2, indicados pelas letras A, B, C, D e E na Figura 3.

Figura 3 - Acabamento dos processos de beneficiamento



Fonte: Silva (2016).

Após cada peça passar pelo processo de diferenciação específico, todas são encaminhadas para o enxágue, seguido do amaciamento, da centrifugação, secagem, passadoria e, por fim, expedição. À medida que o processo de beneficiamento têxtil se encaminha para o fim, dá-se início ao processo de tratamento do efluente residual. Segundo Souto (2017), esse efluente carrega 90% dos produtos químicos empregados nos procedimentos realizados, os quais são de composição heterogênea, em decorrência dos diferentes processos realizados e relatados anteriormente. O lodo têxtil pode conter materiais tóxicos e coloração intensa, provenientes dos pigmentos empregados. (Figura 4)

Figura 4 - Efluente têxtil sendo descartado sem tratamento



Fonte: Philozon (2019).

Motivado por essas características, é crucial realizar tratamentos prévios nesse material antes que seja encaminhado para um corpo hídrico receptor ou direcionado para reuso, por exemplo. É importante ressaltar, ainda, que alguns componentes como cloreto e sulfato de sódio podem ser reutilizados, não impactando, assim, na salinização dos solos (SOUTO, 2017).

A maior parte das lavanderias utilizam o procedimento de coagulação-floculação, seguido de filtragem. Como essas empresas estão localizadas, na maioria das vezes, nas regiões urbanas, é preciso que as estações sejam compactas, conforme afirma Lima (2014) e é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Estação de tratamento do efluente de uma lavanderia de *jeans*

Fonte: CPRH (2018).

O primeiro procedimento realizado com o efluente bruto é a remoção de resíduos e, em seguida, por decorrência da variada composição do líquido, há um processo de equalização. O material é, então, submetido a decantadores, nos quais se inicia a separação da porção sólida. Segundo Souto (2017), o líquido não decantado é filtrado em meio filtrante com carvão ativado, em um fluxo ascendente, proporcionando que sejam retiradas as substâncias que afetam na turbidez — redutora de transparência — e coloração da mistura.

Essa primeira etapa de remoção é necessária para evitar a passagem de sólidos com grandes dimensões que estejam imersos, podendo dificultar os processos seguintes. No tanque de equalização, os materiais são homogeneizados com o auxílio de bolhas de ar ejetadas e, assim, as etapas seguintes podem se dar sem grandes variações nos indicadores (LIBÂNIO, 2010).

No decantador, é adicionado o hidróxido de sódio (NaOH), que, devido ao íon hidróxido, promove a coagulação, o que impulsiona uma maior velocidade de sedimentação, aumento da resistência do sólido às tensões cisalhantes e, também, redução do pH.

Em seguida, ainda são adicionados outros agentes coagulantes, como o policloreto de alumínio  $[Al_2(OH)_3Cl_3]$  ou sulfato de alumínio  $(Al_2SO_4)$ , que auxiliam na formação de sólidos quando adicionado o polímero que intensifica a solidificação e a posterior separação entre sólidos e líquidos. Por fim, nesses decantadores, os materiais de maior densidade, sólidos, se depositam na parte inferior dos tanques, gerando o lodo têxtil. Esse material passa pelo leito de secagem e, finalmente, é depositado. É possível visualizar o efluente antes e depois do processo de decantação na Figura 6.

Figura 6 - Processo de decantação



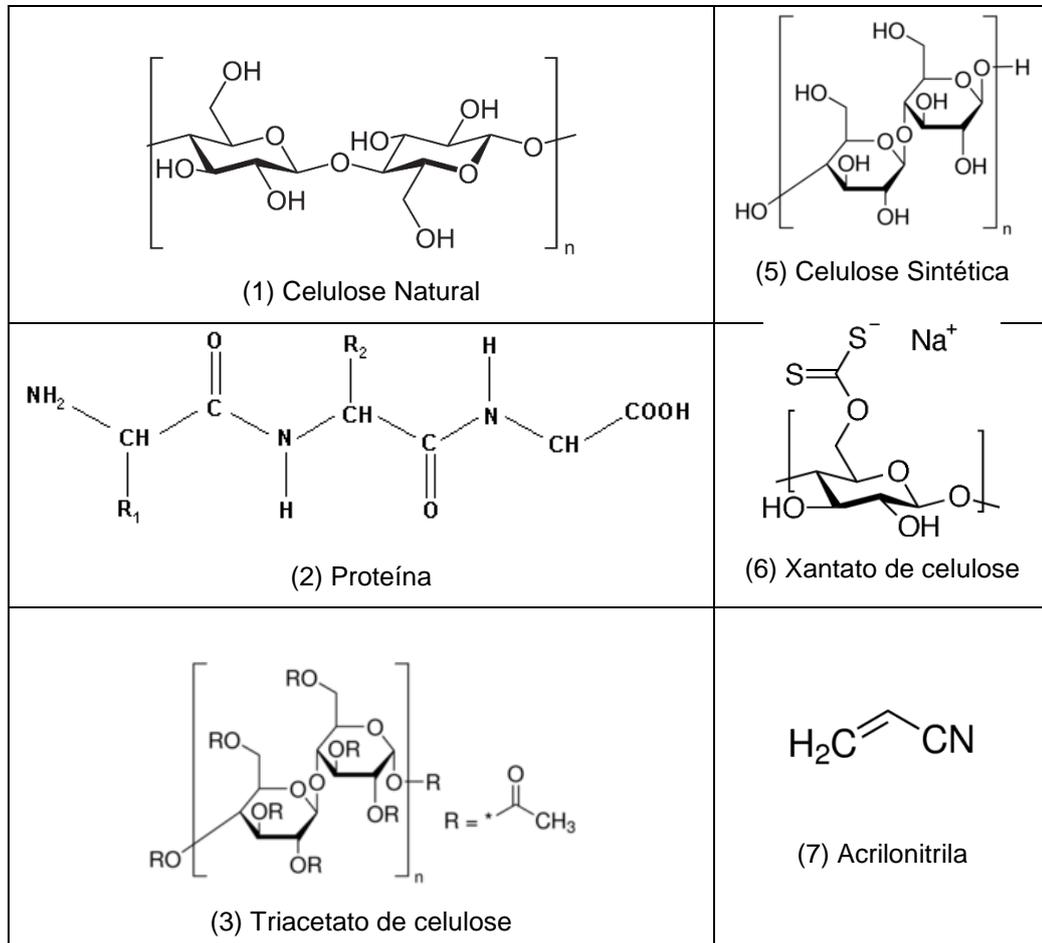
Fonte: Couto Junior (2012).

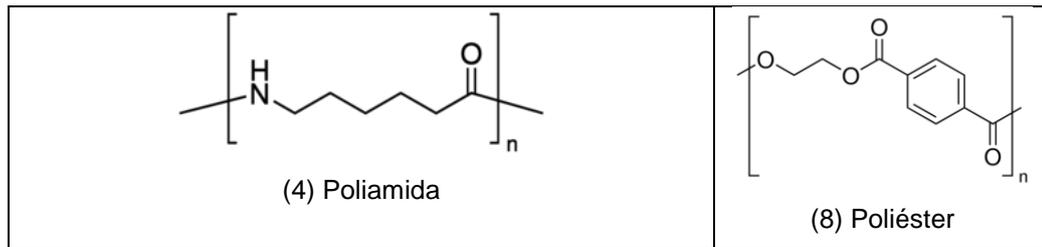
Segundo a CPRH (2018), o lodo têxtil, ou lodo industrial, é o principal resíduo sólido gerado pelas lavanderias, e é classificado pela mesma como resíduo não perigoso (Classe II), conforme a norma da ABNT NBR 10004:2004. Esse material apresenta uma composição química variada, contendo a possibilidade da concentração de metais pesados, entre outros componentes químicos, como alumínio, manganês, ferro, sódio, cálcio, fósforo, silício, carbono total, carbono orgânico e cloretos, conforme apresentado por Souto (2017).

Quanto ao material orgânico presente no lodo têxtil, vários compostos presentes estão relacionados com os tecidos que foram beneficiados no processo. Segundo Guaratini e Zanoni (2000), as fibras têxteis podem ser divididas em dois grandes grupos denominados fibras naturais e sintéticas, cuja estrutura química principal é mostrada na Figura 7.

As fibras naturais mais utilizadas são baseadas em celulose (cadeias poliméricas lineares de glucose) (Figura 7.1) e proteína (polímero complexo composto de diferentes aminoácidos) (Figura 7.2), presentes na lã, seda, algodão e linho. As fibras sintéticas (Figura 7.5) são comercializadas como viscose (xantato de celulose obtida da madeira) (Figura 7.6), acetato de celulose (triacetato de celulose obtido da madeira) (Figura 7.3), poliamida (condensação do ácido adípico e hexametileno diamina) (Figura 7.4), poliéster (polímero do ácido tereftálico e etilenoglicol) (Figura 7.8) e acrílico (polimerização da acrilonitrila) (Figura 7.7) (GUARATINI; ZANONI, 2000).

Figura 7 - Estrutura química dos principais grupos presentes em fibras têxteis naturais e sintéticas.



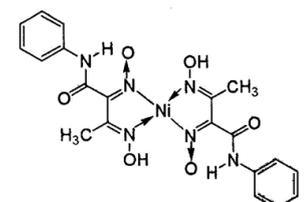
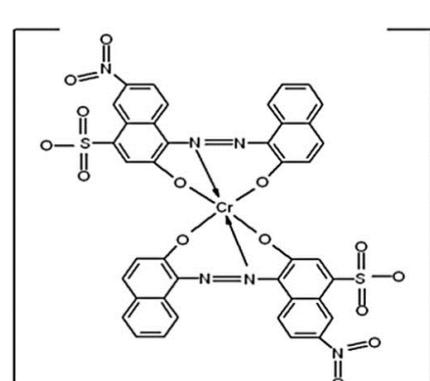


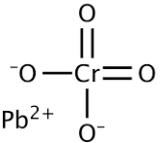
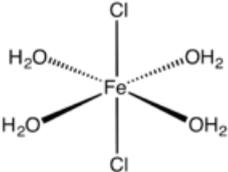
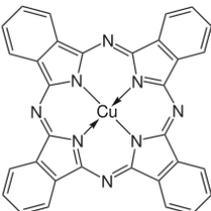
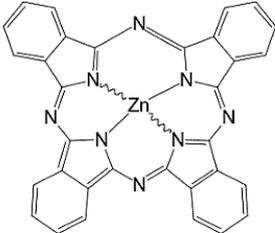
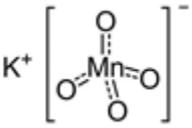
Fonte: Guaratini e Zanoni (1999, adaptado).

Além disso, outros compostos orgânicos estão relacionados com alguns corantes de origem orgânica empregados no decorrer da preparação das peças, por exemplo, após o processamento de *jeans* azul (Azul monastrol), o lodo tende a se manter nessa escala de cor e apresentar a presença de cobre, no entanto, apesar da variação, as oscilações permanecem em tons azulados, devido aos demais produtos empregados.

Souto (2017) descreve o comportamento dos pigmentos mais utilizados na indústria têxtil. A Figura 8 mostra um resumo dos corantes, bem como um modelo para a liberação de metais presentes no lodo, que são originários dos corantes de acordo com os mecanismos de reação indicado.

Figura 8 - Corantes utilizados na indústria têxtil, origem dos metais e mecanismo de liberação.

Metal	Molécula	Mecanismo	Origem
<b>Ni</b>	 <p>PubChem CID: 136257965</p>	$\text{C}_{20}\text{H}_{20}\text{N}_6\text{NiO}_6 \rightarrow$ $\text{CH}_4 + \text{NH}_4 + \text{O}_2 +$ $\text{Ni}^{2+}$	(Pigmento) Amarelo 153
<b>Cr</b>	 <p>PubChem CID: 53488188</p>	$\text{C}_{40}\text{H}_{20}\text{CrN}_6\text{Na}_3\text{O}_{14}$ $\text{S}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{NH}_4 +$ $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 + \text{CrOH}^{2+}$	(Pigmento) Acid Black 172

<b>Pb</b>	 <p>PubChem CID: 16686006</p>	$\text{PbCrO}_4 + 4 \text{OH}^- \rightarrow [\text{Pb}(\text{OH})_4]^{2-} + \text{CrO}_4^{2-}$	(Pigmento) Cromo amarelo
<b>Fe</b>	 <p>PubChem CID: 16211588</p>	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOH}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	(Coagulante) Cloreto de ferro
<b>Cu</b>	 <p>PubChem CID: 475701</p>	$\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{NH}_4 + \text{O}_2 + \text{Cu}^{2+}$	(Pigmento) Azul monastral
<b>Cd</b>	<p><b>Cd=S</b></p> <p>PubChem CID: 14783</p>	$\text{CdS} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + \text{S}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{Cd}^+$	(Pigmento) Cádmio Amarelo
<b>Zn</b>	 <p>PubChem CID: 2735172</p>	$\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Zn} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{NH}_4 + \text{O}_2 + \text{Zn}^{2+}$	(Pigmento) Zinco Ftalocianina
<b>Mn</b>	 <p>PubChem CID: 516875</p>	$\text{KMnO}_4 \rightarrow \text{K}^+ \text{MnO}_4^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{K}^+ + \text{O}_2$	(Agente oxidante) Permanganato de potássio

Fonte: Souto (2017, adaptado).

Considerada a variabilidade da composição química, foi realizado pelo autor da presente pesquisa um levantamento de dados, analisando-se a composição química de diferentes amostras de lodo. Fica evidente na Tabela 1 que, apesar da grande variabilidade existente, tanto dos elementos constituintes quanto de suas proporções, há alguns padrões. Em sublinhado duplo, são indicados componentes em maior

concentração em cada amostra; para a segunda maior taxa, a indicação se dá pelo sublinhado simples; para a terceira, sublinhado pontilhado.

Tabela 1 - Composição química de diferentes amostras de lodo têxtil

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Origem	PE-BR	PB-BR	PB-BR	RJ-BR	SC-BR	SC-BR	SC-BR	Índia	China	Malásia
CaO	8,92%	<u>11,71%</u>	<u>10,52%</u>	<u>8,68%</u>	3,01%	<u>63,10%</u>	<u>24,51%</u>	<u>33,50%</u>	0,94%	2,14%
MgO	-	<u>6,53%</u>	<u>5,86%</u>	1,11%	-	<u>6,30%</u>	0,51%	1,00%	-	4,86%
SiO <sub>2</sub>	<u>36,82%</u>	<u>59,59%</u>	<u>69,73%</u>	<u>41,93%</u>	<u>16,33%</u>	5,10%	<u>43,25%</u>	<u>3,80%</u>	2,50%	<u>49,29%</u>
SO <sub>3</sub>	<u>11,07%</u>	3,51%	5,55%	-	2,52%	4,10%	-	0,40%	<u>18,23%</u>	<u>15,71%</u>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>22,13%</u>	2,51%	0,92%	<u>37,81%</u>	<u>55,96%</u>	<u>17,00%</u>	<u>25,23%</u>	0,30%	<u>4,56%</u>	6,64%
MnO	1,55%	-	-	1,12%	-	-	0,10%	-	0,60%	4,57%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,16%	1,28%	0,60%	3,48%	3,71%	0,30%	1,44%	<u>18,90%</u>	<u>44,51%</u>	1,50%
Na <sub>2</sub> O	-	-	0,40%	1,32%	-	1,20%	0,62%	0,06%	-	0,57%
K <sub>2</sub> O	3,49%	-	1,05%	1,38%	1,42%	0,40%	2,37%	0,04%	-	1,00%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,23%	2,62%	3,92%	2,80%	<u>14,85%</u>	2,20%	1,65%	-	2,05%	<u>8,57%</u>
<b>OUTROS</b>	0,63%	12,25%	5,37%	0,37%	2,20%	0,30%	0,32	42,00%	26,61%	5,15%

Adaptado de (1) LELOUP (2013); (2) OLIVEIRA (2014); (3) AQUINO *et al.* (2015); (4) FERREIRA (2018); (5) SONAI *et al.* (2016); (6) ANJOS (2017); (7) ZANONI (2013); (8) GOYAL *et al.* (2019); (9) ZHAN *et al.* (2019); (10) AZIZ *et al.* (2017).

Fonte: elaborado pelo autor, de acordo com as adaptações acima (2021).

A partir das composições químicas de cada lodo estudado, é possível construir uma correlação entre os processos de diferenciação do *jeans* e do tratamento realizado no efluente. Ao observar a Tabela 1, é evidente que há altas concentrações de silício no lodo industrial que se justificam pelo emprego de argila expandida na estonagem, sendo a maior ou segunda maior taxa de composição em oito das 11 amostras. A estonagem é um processo realizado nas lavanderias industriais que desgasta o tecido por motivos estéticos e o prepara para receber os alvejantes e corantes. Esse termo “estonagem” vem do neologismo do procedimento conhecido por *stone washed*, ou seja, “lavadas à pedra”, como apresentam Silva Filho *et al.* (2021). Geralmente, utiliza pedras de argila expandida, como citado outrora, que possui silício, alumínio e ferro, em sua composição química.

Nas amostras 1, 2, 5, 6, 7 e 8 é possível identificar uma alta concentração de alumínio, que tem ligação direta com o emprego de sulfato ou policloreto de alumínio na etapa de floculação. Soluções férricas também são utilizadas para promover a solubilização, ficando evidente essa substituição nas amostras 9 e 10, que apresentam um teor elevado de ferro e baixa concentração de alumínio.

Os elementos presentes e não citados são provenientes das demais etapas do processo de lavagem e tratamento, como o amaciamento e tingimento. Em relação ao estado físico, o lodo se apresenta em um estado semissólido e ao passar pelo leito de secagem perde parcialmente a água, podendo ser coletado em placas. Quando completamente seco, pode se tornar um material pulverulento com um simples destorroamento à baixa energia.

Em síntese, de acordo com os autores que pesquisaram sobre o lodo têxtil, é possível constatar que de modo geral, mesmo tendo composição química variável, ele apresenta composição prioritária de orgânicos provenientes do tecido, amaciantes e corantes; diversos óxidos minerais provenientes dos processos de lavagem e do tratamento do efluente; e metais oriundos das reações químicas dos corantes.

## **2.2 Aplicações do lodo têxtil na engenharia civil**

O uso e a aplicação do lodo têxtil vêm despertando o interesse e têm sido discutidos por pesquisadores de forma multidisciplinar, pois se trata de uma demanda crescente de cunho ambiental. Uma das principais iniciativas de êxito é a incorporação aos materiais de construção, constituindo cerca de 59% das aplicações, segundo Balota *et al.* (2019).

Pietrobon *et al.* (2002) estudaram a solidificação/estabilização de lodo de tratamento de lavanderia têxtil em pastas e argamassas de cimento. As argamassas com substituição de até 25% atingiram cerca de 40% da resistência da argamassa padrão aos 28 dias. A lixiviação ocorrida nos corpos de prova de argamassa sem lodo incorporado foi da mesma ordem de grandeza das que continham lodo.

Pietrobon *et al.* (2004) realizaram estudos sobre a lixiviação de contaminantes de compostos lodo-cimento. Os resultados mostraram que na amostra com 30% de lodo têxtil, as concentrações dos elementos presentes no extrato lixiviado ficaram abaixo dos limites estabelecidos na ABNT NBR 10004.

Balasubramanian *et al.* (2006) avaliaram a substituição parcial de 30% do cimento por lodo têxtil. Constatou-se que tal formulação de argamassas com a referida substituição não era apropriada para aplicações estruturais.

Herek *et al.* (2012) realizaram a caracterização de blocos cerâmicos com incorporação de lodo têxtil de lavanderia. Foram coletadas diversas amostras que, após secas, passaram pelo processo de homogeneização e foram misturadas em quantidades de 0% (para controle), 5%, 10%, 15% e 20%, em massa. Os resultados obtidos mostraram que a adição do lodo em até 20% culminou em tijolos de boa qualidade, estando suas propriedades mecânicas em consonância com a legislação brasileira. Observou-se, também, pelos testes de lixiviação e solubilização, que os tijolos são inertes, assim os resíduos adicionados são imobilizados.

Leloup (2013) estudou o efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland. A incorporação de até 4% dos resíduos têxteis estudados em argamassa garante uma alternativa segura de disposição para estes e possibilita a aplicação do produto para assentamento de blocos e/ou revestimento.

Zanoni (2013) analisou a utilização do lodo têxtil, por ela denominado lodo de ETE, em cerâmica vermelha, com frações mássicas de 5%, 10% e 15%. Os resíduos foram misturados à massa cerâmica após ambos serem secos em estufa, moídos e caracterizados. Formadas as composições desejadas, contendo resíduos e massa cerâmica, a cada mistura se incorporou 7% em massa de água e os procedimentos comuns para finalização desse tipo de material foram executados.

Foi concluído que as características do resíduo são referentes à porção sólida de toda água de processamento e da adição de cal no decorrer do tratamento dela. Observou-se que, devido ao acréscimo do lodo, a densidade aparente reduziu, aumentou-se a retração durante a queima, e a absorção de água diminuiu. Para adição de até 5% do resíduo, a resistência mecânica foi aumentada, já para maiores adições ocorreu aumento da absorção de água e conseqüente redução da resistência. Assim, é proposto esse valor como ideal para promover utilização.

Zhan e Poon (2015) investigaram a inserção do lodo têxtil na fabricação de blocos de concreto. Empregou-se o cimento Portland ASTM Tipo O, adotando na mistura razões de agregado/cimento (A/C) de 6, 10 e 12 e porções de lodo variando de 0% a 30%, em massa. A partir dos resultados, constatou-se que é possível empregar o material na produção dos blocos que disponham de condições específicas

de aplicação. Ficou evidente que a resistência à compressão por parte dos blocos sofreu uma redução considerável com a adição do resíduo. Pelos testes realizados, o nível de amônia foi uma das causas principais. Foram propostos alguns tratamentos prévios para reduzir as concentrações dos componentes indesejados.

Aquino *et al.* (2015) estudaram a inserção do lodo têxtil na fabricação de blocos cerâmicos de vedação, por meio de sua incorporação na massa argilosa. Foram analisadas amostras de blocos com adição do resíduo na proporção de 0% (padrão), 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em massa. Foram preparadas as seis formulações citadas, das quais se separou 80g, destinados à secagem em estufa e posterior adição de 8% de água, em massa. Em todos os corpos de prova foram alteradas as características físicas, mecânicas e químicas, em decorrência da adição do lodo. Observou-se que a absorção de água aumentou com a adição do material, levando à fabricação de peças mais porosas e, por consequência, menos resistentes. A formulação com 2% de resíduo apresentou pequenas mudanças em relação ao padrão; assim, sua utilização nessa quantidade é viável, inclusive em escala de produção industrial.

Velumani, Senthilk e Premalatha (2016) avaliaram os efeitos da incorporação de lodo têxtil em tijolos de cinzas volantes. O material foi adicionado à mistura de lodo de cal, gesso, cinzas volantes e pó de pedra, em porções de 15 a 35%, variando os incrementos em intervalos de 5%. Os resultados das cinco combinações mostraram que a resistência à compressão está diretamente ligada às porções de lodo adicionado. Foi observado também que a absorção de água sofreu incremento com o aumento do percentual de lodo, nas adições até 25%. Acima disso, notou-se que ocorre um decréscimo da absorção.

Anwar *et al.* (2017) realizaram a inserção de lodo têxtil em tijolos cerâmicos, em porções de 0,5%, 1,5%, 3,5% e 5,25%, em massa, e ainda o estudo do risco de tal resíduo para a saúde pública. Do ponto de vista mecânico e físico, observou-se que ao passo que se aumentou a concentração de resíduo, cresceu a absorção de água e decresceu a resistência mecânica. Nas análises químicas, os tijolos se apresentaram como eficiente instrumento de aprisionamento do material contaminante, evitando que esse realize contato com o solo ou promova maiores prejuízos à saúde e ao meio ambiente.

Hossain *et al.* (2018) estudaram a adição de lodo têxtil em tijolos ecológicos, sendo o resíduo desintoxicado previamente, submetido à radiação gama. Essa radiação também proporciona que o lodo aumente sua afinidade com as partículas de

argila. Foram fabricados tijolos com proporção de 0%, 10%, 25% e 50% do resíduo já seco em estufa por processos anteriores. Em algumas das amostras, usou-se na mistura apenas o solo e o lodo; já outras tiveram adição de areia. Pôde-se observar, então, que o material apresenta bom comportamento na substituição do solo, em concentração de até 50% em massa, na fabricação dos tijolos ecológicos. No aquecimento dos tijolos, a matéria orgânica presente no lodo é queimada (por volta de 450°C), levando à criação de vazios que proporcionam menor densidade no produto final e maior capacidade de absorção de água, tornando-o menos resistente mecanicamente.

Ferreira (2018) realizou a adição de lodo têxtil de lavanderia industrial em cerâmica vermelha. Os percentuais de inserção do material foram de 0%, 2,5%, 5% e 10%, em massa, sendo os corpos de prova elaborados por extrusão e queimados, submetendo-os a temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C. Foi observado que a absorção de água se mostrou diretamente proporcional à quantidade de lodo adicionada, assim estiveram dentro do padrão apenas as amostras queimadas a 1000°C e com até 5% de lodo em sua composição. Já em relação à resistência mecânica, notou-se uma relação inversamente proporcional ao teor de resíduo, sendo justificada pelo aumento dos poros, que facilita a entrada de ar e água. Assim, é indicada a incorporação do material residual na cerâmica vermelha em até 5%, em massa, proporcionando um destino mais adequado a esse elemento do que aterros e de outras técnicas de deposição.

Gunavel *et al.* (2019) realizaram estudos acerca da fabricação de tijolos a partir da inserção de lodo têxtil e cimento. A porção de resíduo inserido variou entre 1,5 e 1,7, em volume; já o cimento, 0,75. Pelas análises, a utilização dos tijolos é considerada válida, sendo considerados econômicos e apresentando resultados mecânicos satisfatórios, ao compará-los aos convencionais. Foi observada uma alta resistência à compressão e valores baixos de absorção de água, o que leva a melhores desempenhos por parte do produto.

Zhan *et al.* (2019) analisaram a incorporação de lodo de efluente têxtil em elementos construtivos à base de cimento, estudando os efeitos do incremento na dosagem no intervalo entre 0% e 20%. Por meio dos ensaios realizados, foi possível observar que a presença do resíduo retardou a hidratação do cimento no início da idade em decorrência da presença de matéria orgânica, metais e compostos de amônia. Observou-se também que as resistências à compressão e à flexão sofreram

redução significativa já com 5% de adição do lodo e, ao atingir 20% de substituição, a resistência à compressão caiu 71% e, 42%, à flexão, após 28 dias de cura. Foi notado, também, um incremento do volume de poros no material.

Goyal *et al.* (2019) estudaram a inserção de lodo têxtil em argamassa e pasta de cimento, mantendo-o em quantidades de até 20%, em massa. Nas misturas, utilizou-se cimento Portland comum e o material residual utilizado foi previamente seco e convertido em pó. Os resultados dos testes realizados confirmaram que para adições de até 5% de lodo, as propriedades da argamassa e da pasta não são alteradas negativamente. Observou-se também que, com o acréscimo do material, a fluidez da pasta cimento-lodo foi reduzida, assim como a resistência à compressão, devido ao aumento do número de poros.

Sakthivel *et al.* (2019) avaliaram a incorporação de lodo têxtil como substituto parcial de agregados finos em concreto. As substituições se deram em proporções de 10%, 20% e 30%. Foi observado que a inserção deve ser inferior a 30%, visto que, com o incremento do resíduo, há uma diminuição da resistência à compressão. Apesar de observar diminuição em alguns parâmetros com a adição do resíduo, as amostras se mantiveram dentro dos padrões especificados pelas normas técnicas.

No tocante à utilização do lodo têxtil em componentes relacionados à área rodoviária, Souza e Lucena (2012) realizaram o estudo da aplicação da mistura solo-lodo têxtil em base e sub-base de pavimentos. Os resultados dos ensaios mecânicos realizados com a mistura do solo e lodo foram satisfatórios em virtude do incremento da resistência mecânica, avaliada por meio do índice de suporte califórnia - CBR, resistência à tração - RT e resistência à compressão simples - RCS.

Oliveira *et al.* (2020) avaliaram o lodo têxtil calcinado como material constituinte de base e sub-base de pavimentos. O resíduo foi incorporado numa proporção de 10%, 15% e 20%, em relação à massa de solo. Dando continuidade à pesquisa foi necessário empregar adicionalmente uma estabilização química da mistura (solo + lodo) com percentuais de 1%, 3%, 5% e 7% de cimento Portland. Foi observado que a incorporação de 10% de lodo proporcionou os melhores desempenhos mecânicos na estabilização física; entretanto, ainda é necessária a estabilização química, promovida pelo incremento de cimento nos teores de 5% e 7%, devido às características do resíduo. Dessa forma, fica evidente que o uso do solo adicionado de 10% de lodo nas camadas de base e sub-base em pavimento com baixo volume

de tráfego é possível. Porém, os aditivos adicionados podem onerar os custos da implementação.

Um resumo das aplicações do lodo têxtil na engenharia civil encontra-se exposto na Tabela 2. Destacam-se os estudos em materiais cimentícios (50%) e cerâmicos (40%) com número relevante de publicações. No setor rodoviário, as pesquisas têm o enfoque em camadas subjacentes do pavimento. Dentro desse contexto, embasado nas características físicas e químicas reportadas pelos autores, o lodo têxtil se apresenta como possível fíler alternativo para misturas asfálticas, podendo melhorar as propriedades do pavimento, ao passo que proporciona uma aplicação para esse resíduo.

Tabela 2 - Resumo das aplicações do lodo têxtil na engenharia civil.

<b>MATERIAL</b>	<b>CIMENTÍCIOS</b>	<b>CERÂMICOS/TIJOLOS</b>	<b>PAVIMENTAÇÃO</b>
<b>AUTORES</b>	Zhan et. al (2019)	Gunavel et. al (2019)	Oliveira et. al (2020)
	Goyal et al. (2019)	Herek et al. (2012)	Souza e Lucena (2012)
	Sakthivel et. al (2019)	Zanoni (2013)	
	Pietrobon et al. (2002)	Aquino et al. (2015)	
	Pietrobon et al. (2004)	Velumani et al. (2016)	
	Balasubramanian et al. (2006)	Anwar et al. (2017)	
	Leloup (2013)	Hossain et al. (2018)	
	Zhan e Poon (2015)	Ferreira (2018)	
	Zhan et al. (2019)		
	Goyal et al. (2019)		

Fonte: O autor (2021).

### 2.3 Misturas betuminosas e suas propriedades

De modo geral, as misturas betuminosas são materiais constituídos de elementos heterogêneos quanto à sua natureza, sendo frequentemente compostos pela mistura de agregados graúdos e miúdos, comumente de origem pétreo e material de enchimento (definido como passante em sua maior parte na peneira nº 200), recobertos através de um filme de ligante asfáltico normalmente obtido da destilação fracionada do petróleo.

Segundo Bernucci et al. (2008), as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e o uso de material de enchimento. Nas misturas a quente, destacam-se os três tipos mais usuais: a graduação aberta, que

apresenta a curva granulométrica uniforme com agregados quase que exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino, sendo utilizada como revestimento drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Pode-se citar também a graduação descontínua, que é curva granulométrica com a proporção dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por finos. Essa graduação tem como objetivo tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos; por fim, as misturas densas, presentes no concreto asfáltico convencional e mais utilizado nas ruas e rodovias, apresentam a curva granulométrica contínua e bem graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que os agregados de dimensões menores ocupam os vazios dos maiores. Na

Figura 9, é apresentado o esquema dos constituintes e proporções frequentes que compõem o concreto asfáltico.

Figura 9 - Proporções usuais dos constituintes do concreto asfáltico.

<b>AGREGADOS</b> (Mineral) (85,5 – 95,0%)	<b>LIGANTE</b> (Modificado ou não) (4,0 – 6,5%)
	<b>ADIÇÕES</b> (Material de enchimento) (0,5 – 8,0%)

\*Valores aproximados pela literatura.

Fonte: O autor (2021).

Essas misturas são habitualmente usadas na camada de revestimento dos pavimentos, passando a suportar diretamente a ação do tráfego e das intempéries.

Um revestimento asfáltico deve conter características de modo a proporcionar os requisitos mecânicos de estabilidade, durabilidade, impermeabilidade, flexibilidade, resistência ao trincamento térmico e à fadiga, de acordo com o clima e com o tráfego para que foram idealizados (BERNUCCI *et al.*, 2008).

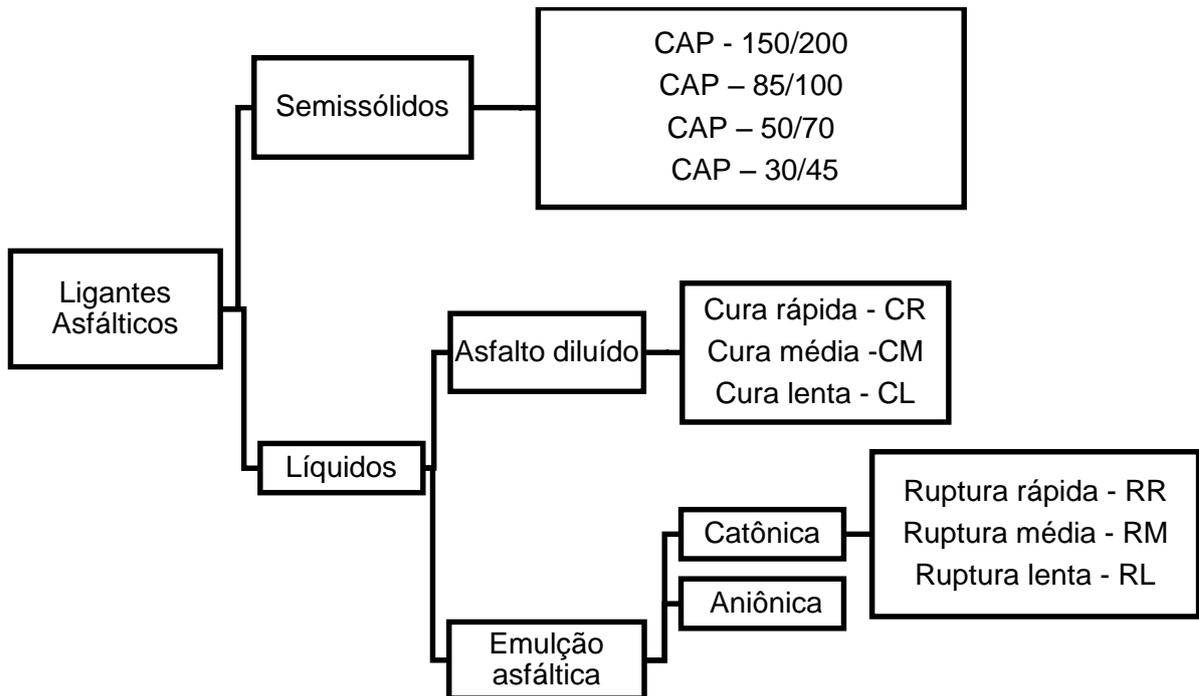
Ainda de acordo Bernucci *et al.* (2008), o tipo de ligante asfáltico pode distinguir as misturas betuminosas, podendo ser preparado a quente com uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP), valendo-se do incremento térmico, denominando-se concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) ou concreto asfáltico CA (termo mais usado atualmente), ou a frio, por meio do uso de emulsão asfáltica de petróleo ou asfalto diluído (hoje só usado para imprimação), comumente conhecidos como misturados a frio.

Aprofundando nas características do ligante asfáltico, este é um material de construção de cor escura, derivado do petróleo com propriedades aglutinantes, utilizado principalmente na pavimentação, sendo constituído principalmente de betume e outros elementos químicos em pequena proporção, tais como: oxigênio, nitrogênio e enxofre, com destaque para o elemento predominante, o betume, com cerca de 99,5% (ROBERTS; KANDHAL; BROWN, 1996).

Alencar *et al.* (2006) reiteram que esses ligantes são materiais viscoelásticos que podem apresentar comportamento elástico ou viscoso, segundo as condições de temperatura e tempo de aplicação da carga.

No Brasil, com a finalidade de distingui-los dos asfaltos utilizados na construção civil e para finalidades industriais, utiliza-se a já mencionada denominação CAP, para os ligantes semissólidos a temperaturas baixas, viscoelásticos à temperatura ambiente, líquidos a altas temperaturas. Estes enquadram-se em limites de consistência obtidos a 25°C. A consistência do asfalto é diminuída com a elevação da temperatura (EILER, 2009). Na Figura 10 pode-se visualizar o esquema das subdivisões dos ligantes asfálticos. Na pavimentação a quente atualmente só se utilizam os CAPs 50/70 e 30/45. Não são comercializados os de consistência mais moles (85/100 e 150/200), utilizados eventualmente para produzir as emulsões e o asfalto diluído.

Figura 10 - Classificação dos ligantes asfálticos.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008, adaptado).

No tocante à distribuição granulométrica, as misturas asfálticas podem admitir configurações do tipo densas, abertas, contínuas e descontínuas. As propriedades das misturas betuminosas podem ser avaliadas mediante diversas análises e parâmetros.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), no que diz respeito aos ensaios de caracterização mecânica, são citados como principais: ensaios convencionais, ensaios de módulos, ensaios de ruptura e ensaios de adesividade.

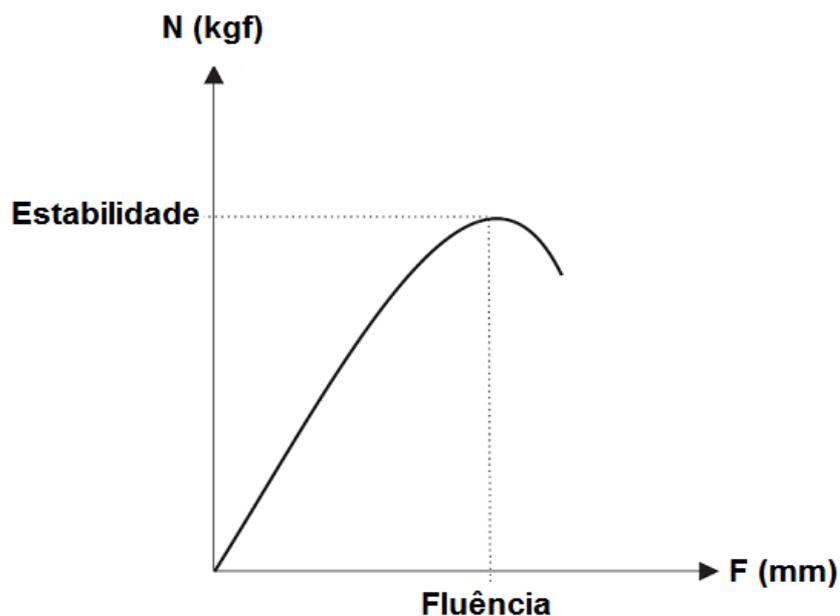
### 2.3.1 Ensaios convencionais

No ensaio Marshall, um corpo de prova cilíndrico regular, também intitulado Marshall (com dimensões de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura), é submetido a uma carga compressiva, aplicada por meio de cabeçotes curvos padronizados. Esse procedimento deve ocorrer à temperatura de 60 °C e uma taxa de carregamento referente a 5 cm/min. De maneira geral, a prensa utilizada para realização do ensaio possui o prato inferior móvel, o qual se desloca para cima seguindo a taxa

anteriormente definida, enquanto a porção superior se mantém fixa (DNIT 043/1995-ME).

Para que o prato inferior realize a movimentação na taxa ideal, a força que o conserva em movimento deve ser crescente, de forma que, num ponto específico do ensaio, o material perde a estabilidade e ocorre o deslocamento ou quebra de agregados. A carga máxima que gera a instabilidade nesse ponto é definida como estabilidade Marshall, sendo expressa em unidade de força, e o deslocamento vertical até esse ponto é denominado fluência, expressa em unidade de deslocamento (BERNUCCI *et al.*, 2008). É possível visualizar na Figura 11 a curva característica da variação da carga, em kgf, em função do deslocamento, em mm, até o ponto em que se atinge a fluência e a estabilidade Marshall.

Figura 11 - Curva do ensaio de estabilidade Marshall.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

### 2.3.2 Ensaio de módulos

O Módulo de Resiliência (MR) é obtido pelo ensaio de mesmo nome por meio da aplicação de uma carga de forma repetida no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular solicitado em compressão diametral. São originadas, então, tensões de tração, na direção transversal ao plano de aplicação da carga, que ocasionam um deslocamento diametral recuperável, na direção horizontal referente à

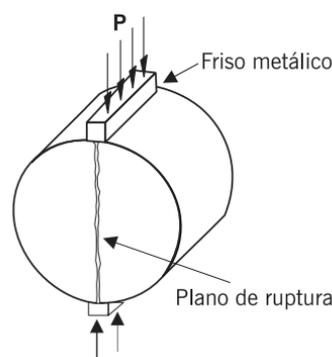
tensão provocada. Conforme a norma brasileira DNIT 135/2018-ME, o cálculo do Módulo de Resiliência está relacionado à carga que é aplicada ao deslocamento resiliente, à altura do corpo de prova e, por fim, ao coeficiente de Poisson.

Para obter o Módulo Complexo nas misturas asfálticas, é aplicado um carregamento senoidal na direção axial de corpos de prova cilíndricos, sendo o procedimento efetuado para diferentes frequências de carregamento e temperaturas, a fim de construir uma curva mestra, incorporando a influência das duas variáveis (frequência e temperatura). São cada vez mais frequentes as pesquisas que utilizam como parâmetro o módulo dinâmico, que representa o valor absoluto do módulo complexo. São utilizados ensaios ou modelos de previsão para definir o módulo complexo e, conseqüentemente, o módulo dinâmico. Para essa determinação, são variáveis importantes a frequência do ensaio, a viscosidade do ligante e o percentual de vazios. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

### 2.3.3 Ensaios de ruptura

O ensaio para obter a Resistência à Tração (RT) estática se dá pela aplicação de duas forças concentradas, diametralmente opostas, comprimindo o corpo de prova cilíndrico (Figura 12). No diâmetro de aplicação da carga, são geradas tensões de tração uniformes e na direção perpendicular a ele tensões de compressão. Conforme a norma DNIT ME 136/2018, para a análise do ensaio, é assumido o comportamento estritamente elástico e, quanto à ruptura no decorrer do diâmetro solicitado, admite-se que foi ocasionada exclusivamente pelas tensões de tração geradas uniformemente, de forma que  $\sigma_{adm} = RT$  (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 12 - Esquema de aplicação do carregamento no ensaio de RT.

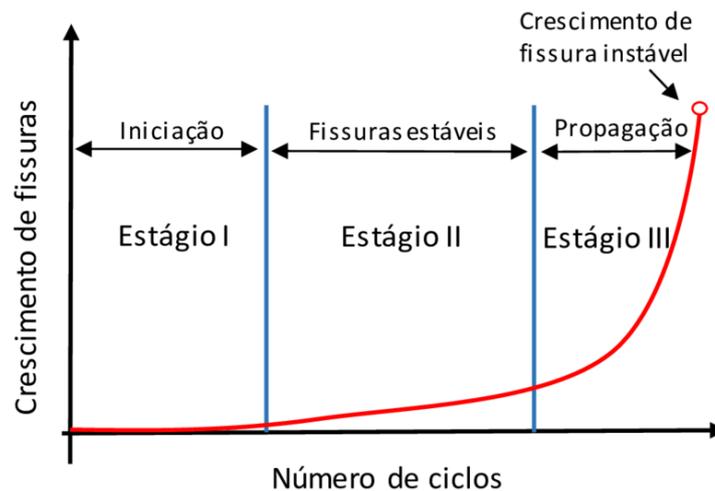


Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

Para as cargas aplicadas de forma cíclica, valores de tensão inferiores aos de ruptura estática ocasionam falhas no material, devido repetição das aplicações. O fenômeno ocorrido nesses materiais é a fadiga, que é uma mudança permanente, progressiva e localizada no material (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nas estruturas submetidas a carregamento cíclico, é possível observar alguns estágios de comportamento durante o processo de fadiga (Figura 13).

Figura 13 - Estágios da fadiga nas estruturas.



Fonte: Colpo (2019) adaptado de Bernucci *et al.* (2008).

Na região I, ocorrem as primeiras alterações microestruturais e são formadas microfissuras, havendo um aumento na densidade dos deslocamentos e sendo iniciadas as zonas de danos irreversíveis. Na região II, a junção das microfissuras ocasiona o aparecimento de microfissuras. Por fim, na região III, as microfissuras sofrem aumento, levando rapidamente ao colapso total da estrutura.

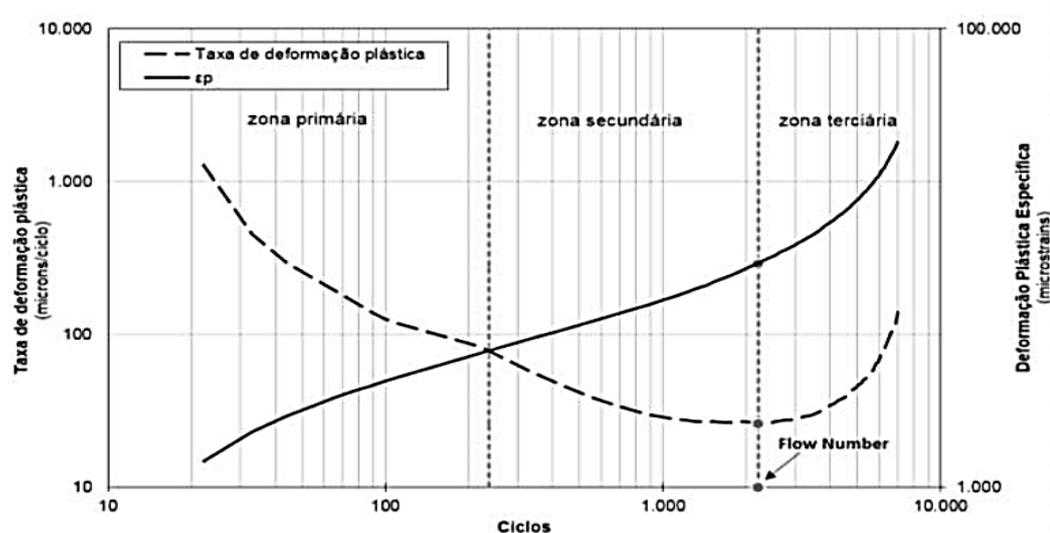
#### 2.3.4 Ensaio de deformação permanente

Com o intuito de compatibilizar as ações solicitantes (fatores ambientais, tráfego e parâmetros de deformabilidade dos materiais) com a capacidade intrínseca dos materiais (trincamento de fadiga e afundamento de trilha de roda), os métodos de dimensionamento de pavimentos visam prever o desempenho ao longo da vida útil do pavimento. Para isto, são utilizados os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que

tentam simular as condições reais do tráfego e permitem caracterizar mecanicamente o comportamento das misturas betuminosas (CEZARO JUNIOR, 2008).

Por meio do ensaio denominado de *flow number* DNIT ME 184/2018, é possível realizar uma simulação das deformações permanentes sofridas pelo revestimento asfáltico em decorrência do tráfego de veículos. A partir dos resultados desse ensaio, pode-se gerar uma curva da deformação vertical ( $\epsilon$ ) em função do número de ciclos (N). Essa curva pode ser subdividida em três zonas, conforme demonstrado na Figura 14: zona primária, evidente pela concavidade voltada para baixo; zona secundária, comportamento aproximadamente linear; e zona terciária, concavidade voltada para cima.

Figura 14 - Zonas da curva referente ao ensaio de *flow number*.



Fonte: DNIT 184 (2018).

No decorrer da zona primária, os corpos de prova apresentam comportamento predominantemente elástico, há modificação da microestrutura e reorientação das partículas do agregado, levando à densificação da mistura, o que proporciona maior resistência. Na zona secundária, a deformação é aproximadamente constante, podendo a inclinação da curva ser empregada na análise da susceptibilidade à deformação permanente por parte das misturas betuminosas. Por fim, na zona terciária, o corpo de prova apresenta comportamento plástico; dessa forma, ocorre sua ruptura. O número de ciclos referentes à transição da zona secundária para a

zona terciária é denominado *Flow number* (FN), sendo este parâmetro utilizado na análise do ensaio.

### 2.3.5 Ensaio complementares

É denominada desgaste a retirada progressiva dos agregados da capa de rolamento, devido ao efeito do atrito gerado entre o pneu e o pavimento. Para analisar a resistência a esse desgaste, é realizado o ensaio Cântabro, conforme NBR 15140. No ensaio, são submetidos os corpos de prova Marshall ao aparelho de abrasão Los Angeles, de forma que o valor máximo para o desgaste de misturas porosas é de 25%.

Outra avaliação importante é acerca do dano produzido nas misturas asfálticas pela umidade, pois tem influência direta na vida de serviço dos pavimentos. Analisando de forma mais profunda, esse dano tem ligação direta com a adesividade agregado-ligante. Para análise dessa característica, são utilizados corpos de prova submetidos a condições específicas de umidade em ensaios de resistência à tração; os valores obtidos são comparados aos não condicionados (BERNUCCI *et al.*, 2008; DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2018).

Nas últimas décadas, com o avanço das pesquisas e o advento de novas tecnologias, bem como o auxílio computacional, os estudos com misturas asfálticas contam cada vez mais com análises acuradas com a utilização de recursos tecnológicos, embora técnicas empíricas ainda sejam presentes.

## 2.4 Material de enchimento e sua influência em misturas asfálticas

As adições usadas como material de enchimento são materiais granulares que possuem um importante papel em misturas asfálticas. São definidos nas normas clássicas de misturas asfálticas, como provenientes de britagem de rochas e neste caso devem atender a uma granulometria passante na peneira de 0,42 mm e ao menos 65% na peneira de 0,075 mm (n° 200). Esses materiais preenchem os espaços vazios entre as partículas de agregados graúdos e miúdos de modo a melhorar a estabilidade e a trabalhabilidade da mistura além de diminuir os vazios do esqueleto mineral. Em geral a fração mais fina deste material é denominado de fíler.

Como exemplos de materiais de enchimento comumente utilizados no concreto asfáltico as adições minerais, tem-se o pó de pedra e pó calcário, bem como adições

industrializadas como a cal hidratada e cimento Portland, que não é hidratado, uma vez que não existe água na mistura. Quando oriundo de agregados minerais, é importante que esteja devidamente pulverizado e livre de matéria orgânica, silte e mica.

O mástique é a combinação formada por ligante asfáltico, fíler e ar. Segundo exposto no manual de procedimento da AASHTO (1991), o mástique tende a ser composto por frações de fíler com partículas ultrafinas menores que 20  $\mu\text{m}$ .

Devido à finura dos grãos e área superficial ativa, o fíler é capaz de modificar as propriedades dos ligantes asfálticos atuando como parte ativa do mástique (BARDINI; KLINSKY; FERNANDES, 2010). Além disso, é notório o incremento da consistência no ligante asfáltico, uma vez que as partículas finas das adições tendem a ficar em suspensão no conjunto (TUNNICLIFF, 1962 apud BARDINI *et al.*, 2013). Tais partículas, quando incorporadas ao ligante asfáltico, são capazes de envolver e recobrir as superfícies das partículas de agregados de diferentes tamanhos.

Motta e Leite (2000) analisaram o desempenho de três tipos de adições de enchimento: pós calcário e de pedra, e cimento Portland na formação do mástique. A partir de ensaios mecânicos, os autores verificaram que a rigidez da mistura asfáltica tem como fator determinante a granulometria do fíler. Assim, a rigidez que é dada pelo potencial de incorporação a partir da relação entre o volume de ligante livre e volume total de ligante deverá ser tão maior quanto menor for o tamanho das partículas do fíler.

Para Gouveia (2013), ao aumentar o teor de material fino na mistura betuminosa, os vazios do esqueleto mineral são preenchidos de forma a melhorar a trabalhabilidade. Entretanto, quando ultrapassado um determinado teor, o fíler passa a ter efeito contrário, sendo prejudicial não só à trabalhabilidade da mistura, mas também à estabilidade do esqueleto mineral e à compactação da mistura, uma vez que diminui o contato entre partículas de diâmetros superiores.

Segundo Bardini (2010), o mástique, ante a dosagem da mistura, influencia a lubrificação das partículas de agregados maiores, podendo afetar os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor ótimo do ligante.

Portanto, é primordial conhecer detalhadamente a granulometria das adições de enchimento, não somente considerar como material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$ , haja visto que na distribuição granulométrica dos grãos menores que 75  $\mu\text{m}$ , os que têm tamanho ainda menor direcionam-se ao mástique. Ressalta-se também a

importância o conhecimento da composição química, pois esse pode ser ativo no meio asfáltico.

## **2.5 Uso de resíduos como enchimento em misturas asfálticas e suas formas de adição**

O concreto asfáltico é o material mais utilizado como revestimento na pavimentação rodoviária, dadas as devidas considerações quanto à carga e ao volume de tráfego. Esse material flexível garante desempenho superior, pois agrega maior conforto, estabilidade, durabilidade e impermeabilização, quando comparado a outros tipos de revestimento. Entretanto, a busca por redução de custos na obra motiva engenheiros rodoviários a explorarem recursos alternativos igualmente ou mais eficazes para o emprego na construção de estradas (YILMAZ; KÖK; KULOĞLU, 2011).

Associado a isso, Bock *et al.* (2009) relatam pesquisas com o objetivo de encontrar novos materiais para a construção rodoviária que apresentem desempenho satisfatório e custos relativamente baixos como os apresentados por Specht, Paludo e Ceratti (2002) e Bernucci, Leite e Moura (2002), entre outros. Esses estudos objetivam a melhoria da qualidade dos revestimentos asfálticos, de modo a proporcionar benefícios de conforto e segurança aos usuários, possibilitando também uma redução dos custos.

Com o intuito de promover os estudos com misturas asfálticas ecológicas, diversos autores buscaram desenvolver pesquisas com a utilização de resíduos. Chan *et al.* (1996) afirmaram que quando da inserção de 2% de cinzas volantes de carvão, o módulo de resiliência da mistura asfáltica apresentou um incremento de 3,5%, tanto em misturas submetidas a altas, quanto a baixas temperaturas. Segundo Churchill e Amirkhanian (1999), concretos asfálticos modificados com cinzas de carvão são recomendados para uso em pavimentos secundários com reduzido volume de tráfego, como acostamentos e estacionamentos.

Já Modarres e Rahmanzadeh (2014) investigaram três diferentes tipos de fíler, o pó calcário, utilizado na mistura de referência, e o pó de resíduo de carvão e suas cinzas. Por meio da comparação, foi possível aferir expressivo aumento na estabilidade Marshall, resistência à tração e o módulo de resiliência da mistura com

cinza de carvão, já o pó residual de carvão resultou com uma mistura com maior fidelidade.

Visando também à substituição parcial dos materiais, Ali e Fiaz (2009) analisaram a substituição parcial de fíler convencional por cinzas volantes e escória de alto forno em revestimentos asfálticos. Os resultados apontam que a estabilidade Marshall da mistura modificada pelo conjunto apresentou menor variabilidade quando comparada à mistura de referência. Em relação à estabilidade, os melhores resultados são referentes ao nível de substituição de 30% do material fino em teor de ligante de 4,5%. Os autores chamam a atenção que os resultados são favoráveis para a construção de pavimentos em países com altas temperaturas no verão, como o Paquistão.

Enquanto Çelik (2008) utilizou cinzas volantes de termoelétricas em quantidades de 5%, 6%, 7% e 8% em relação à massa total do agregado. Os resultados apontaram que os valores de estabilidade obtidos a partir de misturas com cinzas volantes são superiores àqueles das misturas que empregam enchimento convencionais. O maior valor de estabilidade Marshall foi obtido a partir de 5% de mistura de cinzas volantes, que foi de 1.630 kgf em condições ótimas.

Modarres *et al.* (2015) estudaram o uso de resíduos provenientes de instalações de lavagem de carvão e resíduo de cinza de carvão comparativamente aos materiais de enchimento convencionais, sendo o pó calcário, o pó zeolítico e o cimento Portland. Todos os fíleres tiveram fixados em 7% o teor de adição. Os autores apontaram que a utilização do resíduo de lavagem de carvão e cinza de carvão aumentou a estabilidade da mistura cerca de 17% e 44%, respectivamente, comparado aos fíleres de pó calcário e zeólito. Para as misturas contendo cimento Portland, obteve-se um acréscimo na estabilidade de aproximadamente 19% em relação ao resíduo de lavagem de carvão; já o resíduo de cinza de carvão obteve a mesma ordem de grandeza. Além disso, concluiu-se, por meio de ensaios de lixiviação, que o betume contido na mistura asfáltica a quente pode estabilizar e solidificar metais pesados presentes nos resíduos de carvão e suas cinzas.

Cinzas volantes de carvão puderam ser utilizadas como fíler, na proporção de 5,3% em relação à mistura asfáltica, associadas com resíduo de plástico em 0,75% do teor do ligante. A incorporação do composto aumentou os valores do módulo de resiliência a 35°C e 45°C (RONGALI *et al.*, 2013). Assim, especialmente nas áreas onde as cinzas volantes normalmente são descartadas, estas podem ser usadas

como alternativa de substituição do material de enchimento usual, para apoiar a sustentabilidade global (MISTRY; ROY, 2016).

A cinza volante pode ser usada como opção de baixo custo para melhorar a qualidade e o desempenho de cimentos asfálticos. Além disso, as estradas locais construídas com um orçamento limitado podem especificar cinzas como fíler para pavimentos asfálticos (SOBOLEV *et al.*, 2014). É importante destacar que nesses casos os custos de transporte podem ser um fator restritivo para a utilização das cinzas em localidades distantes do ponto gerador.

Huwae, Parera e Tanijaya (2016) abordaram o uso da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na Indonésia como alternativa de material de enchimento para mistura asfáltica. Esta cinza se resume a 1% da massa original e é composta prioritariamente por 73% de sílica. Essa apresenta tamanho dos grãos e propriedades volumétricas semelhantes a outros materiais de enchimento utilizados. Os resultados apontaram que a adição de cinza na ordem de 60% da massa do ligante obteve melhores resultados pela metodologia Marshall, frente a outras proporções estudadas (20%, 40%, 80% e 100%). Contudo, mesmo tendo ficado abaixo da amostra de referência, a referida mistura foi enquadrada dentro dos limites técnicos aceitáveis na Indonésia.

Para misturas com adição de 3% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em relação à massa total, realizadas por Lhwaint, Setyawan e Astuti (2015), concluiu-se que a cinza poderia ser substituta do cimento Portland utilizado como fíler em regiões áridas, haja vista que é tolerante à temperatura na casa dos 60°C, podendo assim evitar prejuízo ao revestimento asfáltico.

Na Malásia, também foram realizados estudos com a inserção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados laboratoriais revelaram que as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram eficazes no aumento da estabilidade de Marshall e módulo de resiliência da mistura asfáltica convencional. A cinza de bagaço de cana de açúcar aumentou a estabilidade Marshall em 0,6% e módulo de resiliência em 17,4% (ZAINUDIN *et al.*, 2016).

Melotti *et al.* (2013) estudaram diferentes tipos de cinzas coletadas em 21 centrais elétricas da Suécia e da Itália, nas quais diferentes biomassas eram utilizadas separadamente como combustível, incluindo palha, lascas e cascas de madeira e cascas de arroz. O objetivo desses estudos era de destinar a utilização das cinzas como carga na mistura asfáltica. Apenas a cinza proveniente de lascas de madeira, queimadas na unidade de Sondrio na Itália, satisfaz os limites de distribuição

granulométrica compatível com as cargas minerais convencionais empregadas nas misturas betuminosas. Isso indica que para outras cinzas era necessário um processo de moagem para obter uma classificação granulométrica adequada. Os autores também chamaram a atenção para a condição de estocagem das cinzas, pois pode influenciar no teor de umidade delas.

A combinação de 2,5% de pó calcário e 2,5% de cinza de casca de arroz (queimada a 700°C) proporcionou um acréscimo de aproximadamente 15% na estabilidade Marshall quando comparado ao uso exclusivo de fíler calcário, segundo Sargin *et al.* (2013). Os autores destacaram que em locais onde existe presença abundante de resíduos de casca de arroz, recomenda-se o uso como fíler em substituição ao fíler calcário. A estabilidade Marshall de misturas asfálticas quentes pode ser acrescida significativamente quando o fíler convencional é substituído por cinza de casca de arroz. Conforme afirma Al-Hdabi (2016), esse aumento pode chegar a até 65%.

Xue *et al.* (2014) estudaram ligantes modificados com dois tipos de cinzas de biomassa, serragem de madeira e cinza de casca de arroz. Os autores destacaram que não ocorreu reação química entre a cinza de biomassa e o ligante asfáltico.

Arabani (2010) utilizou resíduo de vidro na mistura asfáltica, com uma variação de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%; com isso, observou-se que as misturas com presença de resíduo de vidro apresentaram menor sensibilidade às variações de temperatura quando comparadas com a amostra de referência. Também foi possível observar que 15% de adição de resíduo de vidro proporcionou um ganho de até 100% na rigidez comparativamente com a amostra padrão, tanto em temperaturas baixas (5°C) quanto em temperaturas mais elevadas (40°C).

Jony, Al-Rubaie e Jahad (2011) observaram que o conteúdo ótimo de pó de vidro nessa situação é de 7% em relação à massa total; quando essa mistura é utilizada, nota-se na estabilidade um acréscimo de até 13%, em comparação com a mistura que usa o fíler de cimento Portland e pó calcário.

Para Salem *et al.* (2017), os resíduos de vidro triturado podem ser usados em concreto asfáltico com o tamanho máximo de 2,36 mm; para essas dimensões, o valor ótimo de substituição é de 10%. Este contém frações que se enquadram granulometricamente como agregado miúdo, bem como fíler. O uso desse material nas misturas asfálticas quentes pode contribuir com a diminuição da poluição e dos descartes que ocasionam problemas ambientais.

Outra alternativa para substituição de materiais de enchimento convencionais é o pó de rejeito de cimento Portland. Este é um subproduto da fabricação do cimento Portland, constituído em sua maioria por óxido de cálcio. Segundo Ahmed, Othman e Mahmoud (2006), este pó pode substituir 100% do pó calcário normalmente utilizado. O autor observou um aumento da resistência à tração em cerca de duas vezes e meia, comparativamente ao pó calcário.

O pó de mármore também é uma alternativa aos fíleres convencionais, entretanto Karasahine e Terzi (2007) recomenda que as misturas asfálticas com presença de pó de mármore sejam indicadas para estradas secundárias e vias locais de baixo tráfego, uma vez que a mistura asfáltica com essa composição tem deformações plásticas ligeiramente mais elevadas do que as com fíler de pó calcário.

Arabani, Babamohammadi e Azarhoosh (2014) indicam que o pó de concha marinha triturada pode ser utilizado como material de enchimento. Essas misturas com conchas apresentaram menor susceptibilidade à umidade do que o concreto betuminoso usinado a quente convencional. O uso de 3% do enchimento de conchas de Periwinkle (tipo de caramujo), mostrou uma melhoria de aproximadamente 10% no comportamento do concreto asfáltico, como também despertou o conhecimento da possibilidade de produzir misturas mais duráveis em algumas localidades da Nigéria com maior resistência ao desgaste (NWAOLAKATA; AGWUNWAMBA, 2014).

Segundo Vasudevan (2013), a combinação de 1% da cinza de carvão com a cal hidratada como fíler é benéfica ao pavimento por contribuir com a diminuição do volume de vazios. O autor também destaca a importância desse tipo de pesquisa por conseguir utilizar esse resíduo na matriz asfáltica, dessa forma diminuindo os impactos poluidores no meio ambiente.

Embora o lodo têxtil apresente um bom potencial para ser utilizado como fíler em misturas asfálticas, não são reportados muitos estudos que comprovem e fomentem essa aplicação. Esse tipo de iniciativa é relevante, pois existem localidades em plena expansão urbana e com abundância desse resíduo sem utilização. Essas iniciativas além de promover a sustentabilidade podem promover a melhoria dos revestimentos asfálticos e de certa forma uma redução nos custos. O aproveitamento combinado do lodo têxtil no revestimento asfáltico, como também nas camadas de base e sub-base, pode potencializar o aproveitamento desse resíduo, sobretudo nas cidades do Agreste pernambucano que se encontram em constante expansão.

Para Huang, Bird e Heidrich (2007), o uso de materiais reciclados em revestimentos asfálticos é considerado uma alternativa viável, porém, para alguns casos, os custos podem ser uma notável restrição técnica. Os custos de processamento e captação podem ser superiores à aquisição de agregados comerciais. Para melhoria desse cenário, os esforços dos governos locais, na maioria dos casos, são essenciais para fornecer serviços de pesquisa livres de restrições comerciais e aumentar a atratividade para seu uso por meio de legislação ou incentivos financeiros.

Para elaboração das misturas asfálticas contendo resíduos, é importante definir qual a função almejada para esse resíduo na mistura. Como relatado anteriormente, o lodo têxtil apresenta características compatíveis com os fíleres da pavimentação asfáltica. Para viabilizar essa premissa, existem diferentes formas de incorporação de materiais finos ao concreto asfáltico; as mais comuns são a adição ao ligante asfáltico ou aos agregados na forma seca.

Martinez (2014) utilizou misturas com adição de lodos de estações de tratamento de esgoto e água, tanto de forma úmida como seca. O autor verificou que a mistura com lodo de ETA adicionado ao ligante asfáltico apresentou maiores valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência que as misturas de referência. De maneira análoga, as misturas do lodo de ETE adicionado diretamente ao agregado graúdo apresentaram melhoria das propriedades mecânicas quando comparadas às amostras de referência.

Comparativamente, Bock(2009) realizou estudos dos métodos de incorporação de cal ao concreto asfáltico, relatando que pode ser adicionada seca como filer, ou de forma úmida, em calda, sobre o agregado graúdo. Determinou, assim, que a forma mais satisfatória é acrescentando a cal sobre o agregado graúdo seco, e não substituindo na forma de filer da faixa granulométrica.

Bernucci *et al.* (2008) descrevem duas formas de incorporação de borracha moída ao concreto asfáltico. A primeira forma é denominada via úmida, quando a borracha é acrescentada diretamente no ligante asfáltico; a segunda forma é a via seca, quando a borracha é adicionada aos agregados. Notou-se que a presença da borracha afeta o processo de compactação. Associado ao ganho ambiental, a incorporação da borracha de pneus a misturas asfálticas pode melhorar o desempenho mecânico dos pavimentos (PATRIOTA, 2004).

Diversos autores que incorporaram resíduos em misturas asfálticas reportam essas técnicas em suas pesquisas. De forma seca, foram estudadas cinzas volantes de combustível derivadas de pneus (CHOI, 2019), cinzas volantes de arroz (PUTRA *et al.*, 2018; AL-HDABI, 2016), resíduos da indústria de papel (PASANDIN *et al.*, 2015), pó de forno de cimento (MODARRES, 2015), pó de resíduos de carvão (MODARRES (1), 2015), cinzas volantes (WOSZUK *et al.*, 2019) e pó de forno de cal (JITSANIGAM *et al.*, 2018). De forma úmida, previamente misturados ao ligante, cinzas volantes (NASSAR *et al.*, 2016), cinzas volantes e cimento (JAMSHIDI *et al.*, 2018), cinzas de biomassa (MELOTTI, 2013) e pós de granito e calcário (BARRA *et al.*, 2014).

As Tabelas 3 a 6 apresentam uma síntese dos dados dos autores que utilizaram resíduos finos em sistemas betuminosos. O agrupamento dos dados nas quatro tabelas seguintes foram baseados na formulação e na metodologia de incorporação desses resíduos.

A Tabela 3 representa a formulação e a forma de incorporação mais utilizada, considerando o teor de fíler em relação à massa total da mistura asfáltica (ANWAR PARVEZ *et al.*, 2014; ÇELIK, 2008; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016; MISTRY; ROY, 2016; NWAObAKATA; AGWUNWAMBA, 2014; NWAObAKATA; ELUOZO, 2015; PASANDÍN *et al.*, 2016; RONGALI *et al.*, 2013; SARGIN *et al.*, 2013; CHANDRA; CHOUDHARY, 2013; VISHAL *et al.*, 2010; XIE *et al.*, 2012; XUE *et al.*, 2009; ZOOROB; CABRERA, 1997). Essas porcentagens variam de 2% a 16%, com valores intermediários predominantemente entre 3% e 8%. Alguns autores variaram as porcentagens de 0,25% a 2,5%, porém, tem-se uma combinação de cinza e cimento (LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016).

Tabela 3 - Revisão de alguns resíduos usados como finos alternativos em misturas asfálticas. Teor em relação à massa total da mistura asfáltica

Referência	Resíduo	Processo de inserção	Formulação (% da mistura)	Teor ótimo de ligante (%)
(Vishal <i>et al.</i> , 2010)	Cinzas de casca de arroz	seca	7	5,5
(Sargin <i>et al.</i> , 2013)	Cinzas de casca de arroz	seca	4 – 7	3,5 – 6,5
(Chandra e Choudhary, 2013)	Cinzas de resíduo industrial	úmida	até 7	4,0

(Rongali <i>et al.</i> , 2013)	Cinzas volantes de resíduos plásticos	úmida	0,25 – 1	5,4
(Likitlersuang e Chompoorat, 2016)	Cinzas volantes + cimento	úmida	0,5 – 2,5 + 0,5 – 1,5	5,0
(Xie <i>et al.</i> , 2012)	Cinzas volantes	seca	4	4,8
(Çelik, 2008)	Cinzas volantes	úmida	5 – 8	5,05 – 5,30
(Mistry e Roy, 2016)	Cinzas volantes	úmida	2 – 8	3,5 -6,5
(Zoorob e Cabrera, 1997)	Cinzas volantes	seca	10	7,0
(Nwaobakata e Eluozo, 2015)	Cinzas de concha de moluscos	úmida	até 5	-
(Nwaobakata e Agwunwamba, 2014)	Cinzas de concha de moluscos	seca	1 – 5	-
(Anwar Parvez <i>et al.</i> , 2014)	Cinzas volantes de óleo tratadas com ácido	úmida	2 – 8	-
(Yongjie Xue <i>et al.</i> , 2009)	Cinzas do incinerador de resíduos sólidos municipais	seca	8 – 16	5,3
(Pasandín <i>et al.</i> , 2016)	Resíduo da indústria de papel	úmida	0,05	3,25 – 5,25

Fonte: O autor (2021).

O teor do resíduo é relacionado com a massa total do fíler na Tabela 4 (EYMAEL *et al.*, 1994; HUDALES, 1994; HUWAE; PARERA; TANIJAYA, 2016; MURANA; SANI, 2015; SATO *et al.*, 2013). Essa técnica é utilizada comumente para substituições parciais de fíler. As substituições de fíler convencional variaram entre 15% e 100%, sendo a maioria entre 25% e 60%.

Tabela 4 - Revisão de alguns resíduos usados como finos alternativos em misturas asfálticas. Teor do resíduo em relação à massa total do fíler

Referência	Resíduo	Processo de inserção	Formulação (% de fíler)	Teor ótimo do ligante (%)
(Hudales, 1994)	Cinzas volantes do incinerador de resíduos sólidos municipais	seca	35	-
(Eymael <i>et al.</i> , 1994)	Cinzas de fundo do incinerador de resíduos sólidos municipais	seca/úmida	25 / 50	4,5 - 6 / 5,2 - 6,4
(Murana e Sani, 2015)	Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar + cimento	seca	até 50	5,5
(Huwaie <i>et al.</i> , 2016)	Cinza de bagaço	seca	60	-

(Sato <i>et al.</i> , 2013)	Cinza de lodo de esgoto	seca/úmida	15 - 100	-
-----------------------------	-------------------------	------------	----------	---

Fonte: O autor (2021)

O teor do resíduo alternativo, quando é relacionado com a massa total de agregados, é apresentado na Tabela 5 (AHMAD *et al.*, 2012; HASSAN, 2005; ZAINUDIN *et al.*, 2016). As cinzas são incorporadas aos agregados por meio do processo de incorporação seca. A substituição dos agregados variou de 0,5% a 40%, especificamente em três escalas: até 10%, entre 0,1% e 0,5% e até 40%.

Tabela 5 - Revisão de alguns resíduos usados como finos alternativos em misturas asfálticas. Teor do resíduo em relação à massa total dos agregados

Referência	Resíduo	Processo de inserção	Formulação (% dos agregados)	Teor ótimo de ligante (%)
(Ahmad, et al, 2012)	Cinzas de combustível de óleo de palma	seca	até 10	5,1 ± 0,5
(Zainudin <i>et al.</i> , 2016)	Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar	seca	0,1 – 0,5	4 – 6
(Hassan, 2005)	Cinzas do incinerador de resíduos sólidos municipais	seca	até 40	3,5 - 12

Fonte: O autor (2021)

Por fim, na Tabela 6, o último grupo quantifica a cinza referenciada em relação ao ligante asfáltico (XUE *et al.*, 2014; FOROUTAN MIRHOSSEINI *et al.*, 2016) com intervalo de 5% a 25%. As cinzas são incorporadas na forma úmida.

Tabela 6 - Revisão de alguns resíduos usados como fíleres alternativos em misturas asfálticas. Teor do resíduo em relação à massa total do ligante asfáltico

Referência	Resíduo	Processo de inserção	Formulação (% do ligante asfáltico)	Teor ótimo de ligante (%)
(Yongjie Xue <i>et al.</i> , 2014)	Duas cinzas de biomassa	úmida	até 20	-
(Foroutan Mirhosseini <i>et al.</i> , 2016)	Cinzas de semente de tâmara	úmida	5 - 25	-

Fonte: O autor (2021).

Outros autores (MELOTTI *et al.*, 2013) não reportaram a metodologia utilizada na aplicação das cinzas de biomassas. A variabilidade considerável de cinzas incorporadas em todos os grupos pode estar relacionada à metodologia de formulação e ao processo de inserção (seca ou úmida). As variações granulométricas dos agregados, assim como das misturas, também são de extrema importância. O teor de ligante utilizado variou, em geral, de 3,25% a 12% e, na maioria, de 4,0% a 6,5%.

Algumas das possíveis influências desses resíduos, quando aplicados em sistemas betuminosos, são compiladas na Tabela 7. Em geral, resíduos melhoram as propriedades do pavimento, principalmente em relação à resistência à tração, módulo de resiliência, resistência à fadiga e suscetibilidade à umidade.

Tabela 7 - Influência dos resíduos finos nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas

Referência	Propriedades			
	Resistência à tração	Módulo de resiliência	Resistência à fadiga	Dano por umidade induzida (DUI)
(Yongjie Xue <i>et al.</i> , 2009) <sup>1</sup>	"-"	"="	"="	∅
(Hassan, 2005) <sup>2</sup>	"+"	∅	∅	∅
(Pasandín <i>et al.</i> , 2016) <sup>3</sup>	"-"	"-"	∅	∅
(Al-Hdabi, 2016) <sup>4</sup>	"+"	∅	∅	∅
(Chandra e Choudhary, 2013) <sup>5</sup>	"-"	∅	"+"	∅
(Rongali <i>et al.</i> , 2013) <sup>6</sup>	"+"	"+"	∅	∅
(Nassar <i>et al.</i> , 2016) <sup>7</sup>	"-"	∅	∅	∅
(Likitlersuang e Chompoorat, 2016) <sup>8</sup>	"+"	"+"	∅	∅
(Xie <i>et al.</i> , 2012) <sup>9</sup>	"+"	∅	"+"	"+"
(Çelik, 2008) <sup>10</sup>	"+"	"+"	∅	∅
(Ahmad, et al, 2012) <sup>11</sup>	"+"	"+"	∅	∅

(Nwaobakata e Eluozo, 2015) <sup>12</sup>	"+"	"+"	"-	∅
(Zainudin <i>et al.</i> , 2016) <sup>13</sup>	"+"	"+"	∅	∅
(Nwaobakata e Agwunwamba, 2014) <sup>14</sup>	"+"	"+"	"+"	∅
(Foroutan Mirhosseini <i>et al.</i> , 2016) <sup>15</sup>	"+"	∅	∅	∅
(Sung Do <i>et al.</i> , 2008) <sup>16</sup>	"+"	"+"	"+"	"+"

<sup>1,2</sup>Cinzas do incinerador de resíduos sólidos municipais; <sup>3</sup>cinzas de resíduo da indústria de papel; <sup>4</sup>cinzas de casca de arroz; <sup>5</sup>cinzas de resíduo industrial; <sup>6</sup>cinzas volantes de resíduos plásticos; <sup>7</sup>diferentes tipos de filer; <sup>8,9,10</sup>cinzas volantes; <sup>11</sup>cinzas de combustível de óleo de palma; <sup>14</sup>cinzas de concha de moluscos; <sup>12,13</sup>cinzas de bagaço; <sup>15</sup>cinzas de semente de tâmara; <sup>16</sup>cinzas de subproduto reciclado de resíduos de cal ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). ∅ - não informado.

Fonte: O autor (2021).

## 2.6 Indicativos de eficácia de misturas asfálticas como imobilizadoras de resíduos

Ao incorporar resíduos dentro de materiais de construção, são recorrentes as indagações sobre a eficácia deste material na tarefa de aprisionar o resíduo em questão. Se determinado material não tem as características necessárias para reter resíduos incorporados, pode provocar contestações sobre a sua viabilidade ambiental. Para Lucena (2012), os resíduos podem ser misturados com os materiais constituintes das bases e sub-bases do pavimento. Esses tendem a se unir em uma matriz compacta e sólida altamente impermeável. Os resíduos dentro dessa estrutura ficaram aprisionados. Assim como as camadas subjacentes, as camadas de rolamento do pavimento também demonstram essa capacidade.

Choi *et al.* (2019) estudaram o comportamento do concreto asfáltico com adições de enchimento oriundo de combustível derivado de pneus, sendo os resultados comparados aos da inserção de três adições convencionais, cimento, pó de pedra e cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Foi concluído que o resíduo adicionado atendeu aos critérios de fileres da Coreia, assim como apresentou desempenho satisfatório nos padrões de estabilidade Marshall. Observou-se também que, devido à adição do material, foi notado um incremento na resistência ao desgaste superficial e à umidade por parte do revestimento asfáltico, o que indica uma boa aderência do resíduo à mistura.

Já Wozzuk *et al.* (2019) analisaram os efeitos da adição de cinzas volantes “classes F”, obtida a partir da combustão de carvão, e “C”, produzidas como resultado da combustão de lignito, em misturas asfálticas. Foi observado que as forças de adesão na cinza de “tipo C” se apresentaram mais fortes, em decorrência de sua natureza química e mineral, gerando um incremento na resistência à tração diretamente proporcional à concentração do material. Constatou-se que a substituição de parte do fíler por cinzas volantes foi positiva, tendo as amostras apresentado boa resistência ao contato com água e gelo. Fica evidente que devido à boa adesão das partículas do resíduo à mistura asfáltica os corpos de prova apresentam boa coesão, mesmo quando são submetidos à umidade.

Jamshidi *et al.* (2018) realizaram a análise das propriedades do asfalto com incorporação de cinzas volantes. Os resultados apresentaram que a resistência à umidade da amostra com adição do resíduo foi melhor que a referente à adição de cimento; também ficou evidente que a energia total utilizada para o seu processamento sofreu um decréscimo, assim como a emissão de gases de efeito estufa.

Putra Jaya *et al.* (2018) investigaram os efeitos da inserção de cinza de casca de arroz negro em revestimento asfáltico, em porções de 0% a 6% por massa de ligante. Em todas as análises realizadas, o asfalto com adição do resíduo apresentou melhores desempenhos que os convencionais, tais como maiores densidade, estabilidade e rigidez. Ressalta-se, entretanto, que para manter os bons desempenhos é necessário manter um limite ideal do material, sendo este definido como 6%. Por meio do apresentado, fica evidente que as cinzas apresentam uma boa adesão a mistura asfáltica.

Jitsanigam *et al.* (2018) observaram a variação das propriedades do CBUQ devido à inserção de pó de forno de cal. Por meio das análises experimentais, foi possível constatar que o ligante com a adição do resíduo apresenta boas propriedades de viscoelasticidade e uma melhor cobertura. Observou-se, também, que emissões de gases do efeito estufa apresentam redução de 18,5% e a demanda de gastos energéticos, de 2,4%, mensurando-os por meio de valores tabelados.

Al-Hdabi (2016) realizou o estudo acerca da adição de cinzas de casca arroz em concreto asfáltico, tendo o comportamento comparado ao do cimento Portland convencional. Observou-se que as amostras com porções de resíduo sofreram menos danos ao serem submetidas à umidade, em comparação às convencionais, assim

como na análise de envelhecimento. Portanto, ficou claro que a inserção do material levou ao aumento da durabilidade do pavimento asfáltico, sugerindo que este se encontra bem aderido.

Pasandín *et al.* (2015) estudaram os efeitos da inserção de dois resíduos da indústria de papel em CBUQ, *dregs*, que são resíduos não decantados no processo de fabricação da celulose, e as cinzas volantes de biomassa. Ao se analisar a resistência das amostras à água, ficou evidente que o emprego de tais materiais em revestimento asfáltico deve ser descartado, sendo o desempenho de ambos abaixo do definido pela norma. Por possuir alto teor de material orgânico, os *dregs* tiveram resultados menos satisfatórios que as cinzas de biomassa.

Modarres *et al.* (2015) investigaram o comportamento de CBUQ com a inserção do pó do forno de cimento, analisando sua durabilidade à baixa temperatura e sua fadiga com o decorrer do tempo. As amostras apresentaram bons desempenhos nas análises de durabilidade, assim como nos ensaios de simulação da fadiga a baixas temperaturas. Foi constatado que as concentrações de metais pesados no material asfáltico lixiviado foram consideravelmente menores do que no resíduo original. Dessa forma, do ponto de vista ambiental, a inserção do resíduo no revestimento asfáltico acarreta resultados positivos, reduzindo os riscos de contaminação do solo e da água.

Modarres *et al.* (2015) também efetuaram o estudo da adição de pó de resíduo de carvão em misturas asfálticas, analisando seus efeitos mecânicos e ambientais. Foi observado que a mistura com o resíduo se apresentou mais estável, e o comportamento em relação à fadiga também foi melhorado. Do ponto de vista ambiental, a concentração de metais pesados no CBUQ foi semelhante a outros fíleres e mesmo sendo observados níveis de Cr e As, estes se encontram abaixo dos regulamentados naquele país.

Barra *et al.* (2014) analisaram os efeitos da incorporação de pós de granito e calcário em misturas asfálticas. Para os autores, fica evidente a boa adesão dos resíduos, justificada pela integração de componentes físicos e químicos. No aspecto físico, a forma e a textura porosa das partículas do material residual acarretaram uma ligação firme com o ligante. Já no aspecto químico, o aumento do campo elétrico e a natureza mineral foi determinante para o aumento da atração das partículas. Tendo sido observada a eficiente aderência entre o ligante e o resíduo, fica claro que este é bem imobilizado.

De acordo com Furlan (2006), os agregados que possuem menor concentração de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em sua composição tendem a desenvolver melhores ligações com o betume que com a água; esses são chamados hidrofóbicos. Lucas Júnior e Soares (2018) propuseram o método de processamento digital de imagens (PDI) para análise da adesividade agregado-ligante em misturas asfálticas. O procedimento tem o propósito de complementar o estudo da adesividade, revelando um resultado quantitativo percentual do deslocamento da película do ligante. Por meio do uso dessa metodologia que lança mão de auxílio computacional e equipamento de imagem, é possível observar se o ligante modificado por um outro material recobriu toda superfície do agregado.

Moura (2017) considera que a camada de revestimento em concreto betuminoso usinado a quente é uma alternativa para a destinação de resíduos, contudo deve-se observar as proporções. Em algumas situações, a utilização de resíduos como adições de enchimento pode ser benéfica ao pavimento.

Diante do exposto, é possível observar uma convergência dos autores no que se refere à eficiência de misturas asfálticas como agentes imobilizadores de resíduos, sendo indicadas, assim, para resíduos ou contaminantes que não tenham reuso ou descarte apropriado. Os autores citados anteriormente relacionam de forma análoga a melhoria das propriedades mecânicas a uma boa adesão dos resíduos ao ligante, conseqüentemente levando a um bom aprisionamento dessa adição dentro da matriz asfáltica. Essa adesão é percebida nos materiais que têm menor concentração de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e que tenham uma forma e a textura porosa para proporcionar uma boa ligação física com o ligante, bem como uma composição química ativa para melhoria da atração das partículas. Assim, observa-se que a adesão das adições de enchimento ao ligante está relacionada à forma e à mineralogia dele e não exclusivamente ao tamanho das partículas.

## **2.7 Avaliação de caráter ambiental do uso de resíduos em misturas asfálticas**

Para a avaliação ambiental da eficiência das misturas asfálticas, podem ser empregadas diversas metodologias; mas de modo geral, observa-se a coesão da mistura frente a intempéries simuladas e aplicação de cargas, tendo como principal agente imobilizador o ligante asfáltico que envolve as partículas constituintes das misturas asfálticas.

Pode-se afirmar que Choi *et al.* (2019) avaliaram a imobilização do material por meio do teste de resistência à remoção de película por imersão dinâmica, no qual foi possível observar quais tipos de partículas realizaram melhor adesão ao ligante asfáltico. Dentre os materiais analisados, os fragmentos de pneu apresentaram o segundo melhor desempenho, em decorrência da estrutura esférica de suas partículas.

Woszuk *et al.* (2019) analisaram as amostras de asfalto com adição de cinzas volantes de forma mecânica e estrutural, para compreender a interação do resíduo com o material asfáltico. Os ensaios mecânicos realizados analisaram a resistência dos corpos de prova com a variação da porção do resíduo e também com a variação da umidade, por meio do dano por umidade induzida (DUI). Já as análises estruturais foram baseadas nas variações da densidade e vazios existentes. Por meio dessas observações, foi possível confirmar a eficiente adesão do resíduo.

Apesar de Putra Jaya *et al.* (2018) não terem efetuado ensaios de análise direta do aprisionamento das cinzas de arroz negro à mistura, os ensaios realizados deixaram evidente a forte ligação do betume com o resíduo, ocasionada pela eficiente dispersão de suas partículas na mistura.

Jitsanigam *et al.* (2018) confirmaram a boa aderência do pó de forno de cal à mistura asfáltica a partir de ensaios em que analisaram o comportamento físico e mecânico do revestimento, constatando que esse manteve valores dentro dos padrões para densidade, teor de vazios, estabilidade e fluência. Além disso, analisou-se que tanto os gastos energéticos, quanto a emissão de gases do efeito estufa apresentaram uma considerável redução.

Dentre os ensaios realizados por Al-Hdabi (2016), os que podem evidenciar de forma mais clara a boa aderência das cinzas de arroz à mistura asfáltica são os referentes à análise de durabilidade do pavimento. Para estudo dos efeitos gerados pela umidade, foi utilizado o dano por umidade induzida (DUI), que observa o comportamento do corpo de prova seco comparado ao que foi submetido a contato com água. Já para estudo da ação do tempo no pavimento, são realizados procedimentos do método “*Long Term Aging (LTA)*” que pode simular em cinco dias os efeitos de desgaste de cerca de dez anos.

Para analisar a interação dos corpos de prova com a água, Pasandín *et al.* (2015) realizaram o ensaio de resistência à tração e também foi calculado o dano por umidade induzida (DUI), comparando as amostras secas e as submetidas à umidade.

Ambos mostraram que, ao entrar em contato com água, a interação dos resíduos da indústria do papel com o material asfáltico foi amplamente afetada. Jamshidi *et al.* (2018) também utilizaram o teste de resistência à tração para estudar a suscetibilidade das amostras à umidade. Modarres *et al.* (2015) realizaram a lixiviação dos corpos de prova, a fim de analisar a retenção dos resíduos ali depositados, por meio da qual se constatou que, ao se comparar com a amostra inicial de resíduo, os níveis de metais pesados reduziram bruscamente. Fica evidente, portanto, que o material foi imobilizado de forma eficiente.

Ao observar os impactos ambientais para a utilização de pó de resíduo de carvão, Modarres *et al.* (2015) efetuaram ensaios de lixiviação, também apresentando resultados satisfatórios, deixando evidente a redução dos valores de metais pesados existentes. Tendo essas análises como base, o betume se apresenta como um bom estabilizador para esses resíduos, que se mantiveram imobilizados.

Barra *et al.* (2014) discutiram a aderência dos pós de calcário e granito com base em aspectos físicos e químicos. Para tais análises, foram realizados ensaios de estudo da composição do material, por meio do FRX (Fluorescência de Raios X), granulometria e MEV (microscopia eletrônica de varredura); já para estudo do comportamento da mistura asfáltica, como teste de adesividade, usou-se o ensaio do ponto de amolecimento e de penetração.

Embora diversos autores não incluam análises ambientais nos estudos utilizando resíduos como constituintes das misturas asfálticas, é possível notar uma convergência dentre os que reportam esse tipo de análise. O principal método utilizado é dano por umidade induzida (DUI) e os autores que o utilizaram relacionam a capacidade da mistura asfáltica de não sofrer dano excessivo por umidade induzida como indicativo de bom aprisionamento dos resíduos por meio da adesividade (PASANDÍN *et al.* 2015; AL-HDABI, 2016; JAMSHIDI *et al.* 2018; WOSZUK *et al.* 2019). Outros autores relacionam o desempenho mecânico das misturas com a capacidade do ligante de unir todos os constituintes, inclusive os resíduos (JITSANIGAM *et al.*, 2018; PUTRA JAYA *et al.*, 2018). Além desses métodos, é possível observar a utilização de métodos não convencionais como: adesividade, FRX, MEV, imersão dinâmica e lixiviação (BARRA *et al.*, 2014; CHOI *et al.*, 2019; MODARRES *et al.*, 2015). Os autores e técnicas empregadas podem ser visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Compilação das técnicas empregadas para análise ambiental em misturas asfálticas contendo resíduos

Resíduo	Técnica Empregada	Autor
Cinzas volantes	(DUI)**	Wozzuk <i>et al.</i> (2019)
Resíduos de papel	(DUI)**	Pasandín <i>et al.</i> (2015)
Cinza volante e cimento	(DUI)**	Jamshidi <i>et al.</i> (2018)
Cinza de arroz	(DUI)** e (LTA)***	Al-Hdabi (2016)
Pó de forno de cal	Ensaio mecânicos	Jitsanigam <i>et al.</i> (2018)
Cinza de arroz negro	Ensaio mecânicos	Putra Jaya <i>et al.</i> (2018)
Pó calcário e granítico	FRX, MEV, Adesividade	Barra <i>et al.</i> (2014)
Cinza volante TDF*	Imersão dinâmica	Choi <i>et al.</i> (2019)
Pó de carvão	Lixiviação	Modarres <i>et al.</i> (2015)

\*Cinza de combustível derivado de pneus \*\* Dano por umidade induzida \*\*\* Long Term Aging

Fonte: O autor (2021).

É possível notar que embora sejam empregadas diversas técnicas para indicar um bom desempenho das misturas asfálticas que contêm resíduos, ainda são necessárias análises químicas de cunho quali-quantitativo dos extratos lixiviados e solubilizados das misturas asfálticas para ratificar essa premissa.

Para Bernucci *et al.* (2008), a análise da microscopia petrográfica permite a obtenção de informações importantes sobre a caracterização de partículas. Por tal motivo, sua utilização deve ser estimulada na pavimentação asfáltica.

É cada vez mais recorrente o emprego de métodos microestruturais para a análise das misturas asfálticas. Além disso, é possível observar de forma ótica a interação microscópica entre o resíduo e o ligante, e suas possíveis interferências químicas e físicas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa descrever os materiais e as metodologias utilizados para os seguintes aspectos: obtenção e coleta do lodo têxtil, caracterização do lodo e agregados, elaboração do concreto asfáltico e realização dos ensaios de caracterização mecânicos, microestruturais e de avaliação ambiental.

O estudo divide-se em cinco etapas:

- A primeira corresponde à caracterização dos materiais e à avaliação da interação do lodo têxtil dentro da faixa granulométrica;
- A segunda engloba os ensaios experimentais para avaliação da consistência do ligante betuminoso com adição do lodo têxtil;
- A terceira corresponde à avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto asfáltico utilizando a incorporação de lodo têxtil;
- A quarta trata das avaliações microestruturais;
- Por fim, a quinta etapa consiste da avaliação ambiental da incorporação do lodo têxtil em misturas asfálticas.

#### 3.1 Lodo têxtil

O lodo têxtil foi coletado no leito de secagem de uma lavanderia de médio porte no APL de confecções pernambucano, situada em Caruaru-PE. O leito de secagem é o local onde ocorre a etapa final do tratamento físico-químico do efluente têxtil. Neste espaço o lodo têxtil perde maior parte da umidade, aglomerando-se em placas, conforme pode ser visto na Figura 15.

Após a coleta em tambores, o lodo têxtil foi seco em bandejas ao ar livre por 24 horas, seguido de estufa a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$  por 24 horas para evaporação da umidade remanescente. Concluída a secagem total do lodo têxtil, ele foi colocado em um moinho de barras/bolas de baixa energia Sonnex, com tambor em chapa dupla de aço 1045, diâmetro interno de 380x420mm para volume de 47 litros, com 20 barras de 1"x390mm. Foram processados 5kg por batelada durante 30 minutos apenas para destorroar as partículas aglutinadas.

Por fim, o material foi peneirado em malha #200, para garantir a granulometria máxima de 75  $\mu\text{m}$  do material, viabilizando sua utilização como fíler. Ao fim desses

processos, é esperado um material que seja rico em óxidos de cálcio, magnésio e silício, que não é inerente ao processamento, mas sim de sua própria constituição, porém finamente cominuído.

Figura 15 - Lodo têxtil no leito de secagem



Fonte: CPRH (2018).

A seguir são apresentadas as técnicas utilizadas para avaliações físicas, químicas, cristalográficas e microestruturais de caracterização do lodo têxtil (Tabela 9), juntamente a seus objetivos, equipamentos, condições experimentais e relevância dos parâmetros a serem obtidos. As análises foram realizadas no Laboratório de Química (LQ) do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e em cooperação com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Tabela 9 - Técnicas empregadas para caracterização microestrutural

<b>Técnica</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Condições Experimentais</b>	<b>Relevância do parâmetro</b>
<b>Massa Específica</b>	Obtenção da massa específica do lodo têxtil, de acordo com a ABNT NBR NM 23:2001.	Frasco Volumétrico de Le Chatelier ( <b>LQ/ UFPE/CAA</b> )	-	Utilizado para a cálculo da dosagem.
<b>Área Específica (Blaine)</b>	Obtenção da área específica do lodo têxtil, de acordo com a ABNT NBR NM 76:1998.	Permeabilímetro de Blaine ( <b>UFPG</b> )	-	Elucida os fenômenos relacionados à granulometria.
<b>Granulometria a laser</b>	Obtenção da curva granulométrica do lodo têxtil, para as partículas menores que 75 µm.	S3500 / Microtrac ( <b>UFPG</b> )	-	Elucida os fenômenos relacionados ao mástique.
<b>Fluorescência de Raios X (FRX)</b>	Identificação dos elementos químicos na composição do lodo têxtil.	Rigaku – Primini ( <b>LQ/ UFPE/CAA</b> )	-	Composição química para caracterização.
<b>Difração de Raios X (DRX)</b>	Caracterização qualitativa da estrutura cristalina do lodo têxtil. A partir dela é feita a identificação dos compostos cristalinos.	Rigaku Miniflex 600 ( <b>LQ/ UFPE/CAA</b> )	Com radiação CuK $\alpha$ (40 kV/30 mA), velocidade do goniômetro de 0,02° 2 $\theta$ por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de 10 a 80° 2 $\theta$	Elucida características cristalinas inertes.
<b>Termogravimetria/Análise Térmica Diferencial (TGA)</b>	Acompanha a variação de massa de uma amostra, em função de incrementos de tempo ou temperatura.	Netzsch – STA 2500 Regulus ( <b>LQ/ UFPE/CAA</b> )	Realizado em atmosfera de ar com taxa de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura de 900 °C	Complementar na caracterização dos elementos indicando as temperaturas de degradação.
<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b>	Visualização de forma ampliada de estruturas microscópicas.	Shimadzu SSX550 SUPESCAR e Metalizador Shimadzu IC 50	Ampliação de 1200 a 5000 X	Elucida iteração dos grãos em relação a sua geometria e textura.
<b>Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</b>	Identificação dos grupos funcionais por meio da vibração dos átomos no infravermelho.	Shimadzu Prestige-21 ( <b>LQ/ UFPE/CAA</b> )	As amostras em pó foram misturadas com KBr e comprimidas em pastilhas, varridas na faixa espectral em 4000 para 400 cm <sup>-1</sup>	Complementar na caracterização dos elementos químicos constituintes.

Fonte: O autor (2021).

### 3.2 Ligantes utilizados

O ligante asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa foi o CAP de penetração 50/70, produzido na Refinaria Landulpho Alves (RLAM), Bahia; o boletim técnico com o resultado da caracterização do ligante está apresentado na Tabela 10. O CAP 50/70 é o tipo de cimento asfáltico de petróleo de maior disponibilidade e utilização nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Tabela 10 - Resultados da caracterização do CAP 50/70

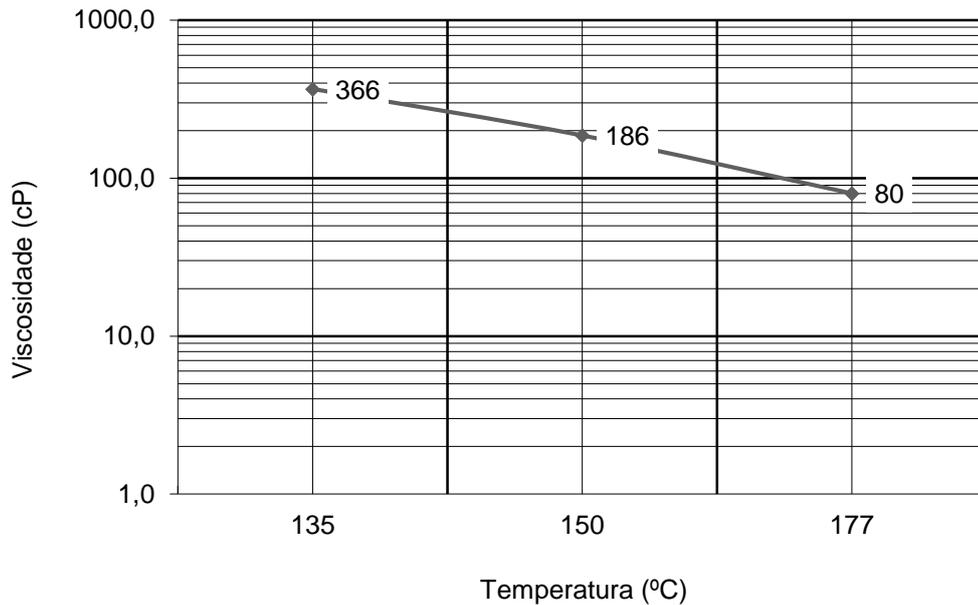
ENSAIOS	Método (ASTM)	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	50	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D36	46 min	50,2	°C
Viscosidade rotacional 135°C GCSP21	D 4402	274 min	366	Cp
Viscosidade rotacional 150°C GCSP21	D 4402	112 min	186	Cp
Viscosidade rotacional 177°C GCSP21	D 4402	57 a 285	80	Cp
RTFOT- penetração retida	D 5	55 min	68	%
RTFOT- aumento do ponto de amolecimento	D 36	8 max	6,0	°C
RTFOT- ductilidade a 25°C	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT - variação em % massa	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,034	%
Ductilidade a 25°C	D 113	60 min	>150	Cm
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de fulgor	D 92	235 min	324	°C
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-1,1	N/A
Densidade relativa a 20/4 °C	D 70	Anotar	1,004	N/A
Aquecimento a 177°C	X 215	NESP (2)	NESP	N/A

Nota: (2) NESP = Não Espuma

Fonte: Ficha técnica Refinaria Landulpho Alves (RLAM) (2308-18G:07/2018).

As faixas das temperaturas de usinagem e de compactação foram obtidas dentro dos limites de viscosidade estabelecidos pela norma DNIT 043/1995 e DNIT 031/2006, a partir da curva de viscosidade versus temperatura que é apresentada na Figura 16.

Figura 16 - Curva de viscosidade versus temperatura do ligante



Fonte: O autor (2021)

Assim, as temperaturas de aquecimento do ligante foram fixadas em  $160^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , equivalente à viscosidade de  $170 \text{ cP} \pm 20 \text{ cP}$ , bem como de compactação  $146^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , correspondente à viscosidade de  $280 \text{ cP} \pm 30 \text{ cP}$ . Os agregados foram aquecidos a  $10^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura de aquecimento do ligante, ou seja  $170^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , conforme indicado pela norma DNIT ES 031/2006. Assim, o agregado encontrava-se a temperatura inferior a  $177^{\circ}\text{C}$ , temperatura crítica na qual costumeiramente considera-se que ocorre envelhecimento acelerado do ligante.

### 3.2.1 Incorporação do lodo têxtil

A incorporação do lodo têxtil foi dividida em duas técnicas possíveis:

#### 3.2.1.1 Incorporação do lodo têxtil aos agregados

O lodo têxtil já seco, destorroado e peneirado foi adicionado na proporção pré-estabelecida diretamente aos agregados antes do aquecimento. Somente após ocorreu a mistura com o ligante asfáltico, conforme indicam vários autores (AHMAD, 2012; HASSAN, 2005; MURANA; SANI, 2015; NWAOLAKATA; AGWUNWAMBA, 2014; SARGIN, 2013; XIE *et al.*, 2012; XUE, 2009; ZAINUDIN *et al.*, 2016). Esta é a

forma mais comum para adição de fíler nas misturas a quente. Tal configuração foi aqui denominada de lodo seco.

### 3.2.1.2 Incorporação do lodo têxtil no ligante asfáltico

Na adição do lodo têxtil ao ligante asfáltico, existem pequenas variações metodológicas. De modo geral, mistura-se o material seco ao ligante previamente aquecido de forma rotativa (ÇELIK, 2008; SUNG DO; HEE MUN; SUK KEUN, 2008; CHANDRA; CHOUDHARY, 2013; RONGALI, 2013; ANWAR PARVE *et al.*, 2014; XUE *et al.*, 2014; FOROUTAN MIRHOSSEINI, 2016; LIKITLERSUANG, 2016; MISTRY; ROY, 2016). Para essa adição úmida, foi adotada a mistura manual até que a incorporação total fosse percebida de forma visual do lodo têxtil ao ligante (Figura 17), fato ocorrido geralmente em 2 minutos. Essa configuração a título da pesquisa é denominada lodo CAP.

Figura 17 - Incorporação do lodo têxtil ao ligante asfáltico.



Fonte: O autor (2021).

Após a adição do lodo têxtil ao ligante, foram realizados os ensaios para caracterizar o ligante asfáltico modificado e avaliar as implicações dessa adição, conforme compilados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros observados no ligante modificado com lodo têxtil

<b>Parâmetro</b>	<b>Metodologia</b>
Penetração	DNIT 155/2010 - ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010 - ME
Viscosidade rotacional cinemática	NBR 15184/2004

Fonte: O autor (2021).

Espera-se que o ligante modificado apresente um incremento nos parâmetros de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, entretanto de forma a não inviabilizar a sua utilização como ligante nas misturas em questão. Caso sejam notadas mudanças excessivas nessas propriedades, a utilização dos ligantes modificados por lodo têxtil serão operacionalmente inviáveis.

### **3.3 Ensaios para propriedades dos agregados**

Os agregados graúdos e miúdos empregados na fabricação do concreto asfáltico foram definidos de modo a satisfazer a faixa média da granulometria do tipo “C” do manual de pavimentação do DNIT (2006); faixa granulométrica essa destinada para camadas de rolamento densas, muito comum na pavimentação de vias urbanas.

Foram utilizadas pedras graníticas britadas provenientes da Pedreira Brical LTDA, localizada em Caruaru (8°18'3.48"S; 35°53'26.70"O), dentro do APL de confecções do Agreste pernambucano. A escolha desses agregados foi motivada pela disponibilidade local e por se tratar de um material já utilizado tanto pela iniciativa pública como privada para essa finalidade. Os procedimentos para caracterização desses materiais encontram-se detalhados a seguir dos subitens 3.2.1 ao 3.2.10.

#### **3.3.1 Granulometria**

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados para os agregados graúdos e miúdos de acordo com a norma do DNIT ME 083/1998. Este procedimento pode ser realizado de forma manual ou mecânica, a fim de obter a distribuição dos tamanhos dos grãos do agregado. Nesta pesquisa foi utilizado o peneiramento mecânico.

#### **3.3.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles”**

O ensaio de abrasão seguiu os parâmetros da norma DNIT ME 035/1998 determinação da abrasão “Los Angeles”. No ensaio, o agregado é submetido a uma carga abrasiva por meio de esferas de aço, que pode variar de 6 a 12 a depender da granulometria do agregado, conforme indicado na Tabela 12.

Tabela 12 - Carga abrasiva para o ensaio de abrasão “Los Angeles”

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: ME 035/1998 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1998).

O número de revoluções determinadas de 30 rpm a 33 rpm até completar 500 ou 1000 revoluções, a depender da graduação do agregado, pode ser visto forma detalhada na Tabela 13.

Tabela 13 - Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles”

PENEIRAS ABERTURA EM (mm)		AMOSTRA – MASSA PARCIAL EM GRAMAS						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250±25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250±25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500±10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500±10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: ME 035/1998 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1998), adaptado.

O desgaste é expresso pela percentagem do material que passa pela peneira de 1,7 mm após o ensaio. Os resultados do ensaio são expressos com aproximação de 1%.

### 3.3.3 Forma das partículas

Os ensaios para definir a forma das partículas foram realizados de acordo com a metodologia da norma DNIT ME 424/2020 intitulada: “– Agregado – Determinação do índice de forma com crivos”. A forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f). Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando  $f = 1,0$  e lamelar quando  $f = 0,0$ . O limite mínimo para aceitação do agregado é de  $f = 0,5$  e partículas lamelares menores que 10%.

### 3.3.4 Massa específica e absorção

Os ensaios para determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo que, na condição saturada superficialmente seca, são passíveis de reter água, foram realizados de acordo com a metodologia da norma DNIT ME 081/1998.

### 3.3.5 Ensaio de adesividade

O ensaio de adesividade do agregado ao CAP seguiu diretrizes, procedimentos e parâmetros das normas ME DNIT 078/1994 e DNIT ME 079/1994. O ensaio consistiu em aferir o deslocamento numa película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura entre o agregado e o ligante foi submetida a uma temperatura de 40°C sob ação de água destilada durante 72 horas. Na Figura 18, pode-se visualizar os agregados recobertos pelo ligante submersos em água. O resultado é tido como satisfatório quando não são visualmente identificados deslocamentos do filme asfáltico ao fim das 72 horas.

Figura 18 - Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico



Fonte: O autor (2021).

De forma complementar, a adesividade da brita 19 também foi analisada quantitativamente pelo método de processamento digital de imagens. O método proposto por Lucas Júnior e Soares (2018) se baseia na implementação de 3 (três) imagens de cada amostra dos agregados, dispostas espaçadamente sobre um fundo branco e capturadas por câmera de *smartphone*, conforme a Figura 19. Posteriormente, as imagens foram processadas com auxílio do *software Matlab*, assim determinando o percentual de área do agregado recoberto por ligante asfáltico.

Figura 19 - Imagem para processamento digital



Fonte: O autor (2021).

Um histograma de frequência de pixels foi determinado para traduzir a distribuição de tons de cinza da imagem. Duas regiões de interesse foram explicitadas

por meio da segmentação por limiarização, sendo a zona do agregado e a zona do agregado recoberto por ligante. O comando “*BWAREA*” foi utilizado para calcular cada uma das áreas de interesse, sendo  $P_L$  o número de pixels do ligante e  $P_A$  o número de pixels do agregado. O percentual da área coberta pelo ligante asfáltico  $A_{PDI}$  é calculado pela Equação 1.

$$A_{PDI} = \frac{P_L}{P_A} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

### 3.3.6 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia foi realizado conforme a norma DNIT ME 054/1997. Este se fundamentou na relação volumétrica entre duas alturas de níveis, superior e inferior, da suspensão argilosa numa proveta, com uma quantidade de agregado miúdo em condições estabelecidas pelo método. O resultado foi expresso em porcentagem com base na média aritmética de três amostras. Foi utilizado pó de pedra granítica britada como agregado miúdo. O agregado miúdo deve ser um material limpo e livre de impurezas tais como: vegetação, argilas, grumos, podendo ser toleradas quantidades insignificantes.

### 3.3.7 Densidade real

O método para a determinação da densidade real ou massa específica de agregados miúdos foi realizado dentro dos parâmetros da norma DNIT ME 084/1995. O método de ensaio consistiu em colocar 500g de material em um picnômetro de 500 ml. Esse material foi previamente seco em estufa e resfriado em dessecador. Após aquecer a amostra no picnômetro, realizou-se a expulsão de todo o ar existente, introduzindo a ponta do papel toalha dentro do picnômetro. Assim, dispersava-se a espuma que porventura se formava quando as bolhas de ar eram sendo eliminadas, esfriando em banho maria. O cálculo da massa específica dos grãos foi realizado por meio da diferença de pesos do picnômetro vazio, cheio de água e com a mistura de agregado miúdo mais água.

### 3.3.8 Massa específica real

O método utilizado para a determinação da massa específica real foi o de massa específica de solos finos e material de enchimento. Este é definido pela norma DNIT ME 085/1994, tanto para os agregados finos, quanto para o lodo têxtil.

### 3.3.9 Densidade específica *Rice* (Gmm)

Foram realizados os ensaios de densidade específica pelo *Rice test* com as amostras sem lodo (0% lodo), 2% de lodo seco, bem como 2% e 3% de lodo CAP, todos com o teor de 5,5% de ligante. A metodologia seguiu as diretrizes da norma DNIT 427/2020 – ME, cujo esquema de bancada encontra-se na Figura 20. Para Bernucci *et al.* (2008), a principal vantagem do procedimento é considerar, além da obtenção da massa específica da mistura asfáltica, a absorção de ligante pelos agregados sem a necessidade da aferição das massas específicas dos seus constituintes separadamente.

Figura 20 - Metodologia para determinação da Gmm



Fonte: O autor (2021).

### 3.3.10 Sanidade

A característica de resistência à desintegração química é quantificada por meio de ensaio que consiste em atacar o agregado com solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio, em cinco ciclos de imersão com duração de 16 a 18 horas, à temperatura de 21°C, seguidos de secagem em estufa (BERNUCCI *et al.*, 2008). Na corrente pesquisa, os agregados foram submetidos em uma solução saturada de sulfato de sódio, conforme a DNIT ME 089/1994. A perda de massa resultante desse ataque químico ao agregado deve ser de no máximo 12%.

## 3.4 Metodologia de dosagem

A Metodologia de dosagem foi dividida em duas etapas, primeiro a determinação da faixa granulométrica e a posteriori a metodologia Marshall.

### 3.4.1 Determinação da faixa granulométrica

A metodologia adotada para especificar as proporções da mistura ocorreu por meio do método gráfico de Rothfuchs. Este método consiste em traçar as curvas granulométricas dos materiais disponíveis para a mistura em um gráfico que tenha sido construído de forma que sua diagonal represente a curva média da faixa granulométrica especificada. Dessa forma, os agregados graúdos e miúdos foram utilizados em proporções tais que a mistura final se enquadrasse na faixa granulométrica “C” especificada na norma DNIT 031/2006 ES, utilizada para uma camada de rolamento de pavimento. Os limites granulométricos estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Especificações granulométricas para agregados para traço de CBUQ da faixa C

Peneira de malha quadrada		% Faixa C	Tolerâncias
Série ASTM	Abertura (mm)		
3/4"	19,1	100	±7
1/2"	12,7	80-100	±7
3/8"	9,5	70-90	±7
N 4	4,8	44-72	±5
N 10	2,00	22-50	±5
N 40	0,42	8-26	±5
N 80	0,18	4-16	±3
N 200	0,075	2-10	±2

Fonte: ES 031/2006, (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

Contudo, o fator limitante foi a máxima incorporação do lodo têxtil. Por se tratar de um método gráfico e necessitar de verificação posterior, foi estabelecido que seriam adotadas três porcentagens além da que continha a máxima adição de lodo, decrescendo em 1% cada. Assim, foram adotadas quatro distribuições granulométricas dentro da faixa granulométrica "C" do DNIT, além da mistura de referência, que não contém lodo têxtil, com função de controle.

A quantidade de ligante na mistura asfáltica deve proporcionar ao revestimento asfáltico que ele atinja as características de estabilidade mínima, como também atenda aos valores indicados na

Tabela 15 quanto à porcentagem de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e resistência à tração por compressão diametral de acordo com a DNIT 031/2006 ES.

Tabela 15 - Especificações de Concreto Asfáltico CA.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de vazios, %	DNIT-ME 043/1995	3 a 5
Relação betume/vazios, %	DNIT-ME 043/1995	75 – 82
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNIT-ME 043/1995	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNIT-ME 138/2009	0,65

Fonte: ES 031/2006 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

### 3.4.2 Metodologia Marshall

A metodologia de dosagem utilizada nesta pesquisa foi a Marshall, que se fundamenta nos procedimentos da norma DNIT ME 043/1995 para misturas betuminosas a quente. A dosagem foi realizada objetivando identificar o teor ótimo de ligante para a concepção do concreto asfáltico com os agregados em questão.

Os procedimentos do método Marshall consistem em moldar, por compactação a quente, um conjunto de corpos de prova, no qual a mistura dos agregados para confecção deles é definida como a condição necessária para obtenção de um corpo de prova com 1200 g, 6,3 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A energia de compactação empregada nos corpos de prova foi de 75 golpes por face, tendo sido empregada por meio de um compactador de laboratório tipo Marshall (Figura 21).

Figura 21 - Compactador de laboratório Marshall



Fonte: O autor (2021).

Posteriormente à compactação, as amostras repousaram nos moldes ao ar livre durante 24 horas e, em seguida, foram extraídas dos mesmos. Esses corpos de prova foram, então, imersos em banho-maria a 60°C por um tempo de 30 a 40 minutos. Retirando-os do banho, os corpos de prova foram imediatamente submetidos à compressão diametral semi-confinada, aplicada por uma prensa hidráulica (Figura 22), por meio de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall.

Figura 22 - Prensa hidráulica para compressão diametral



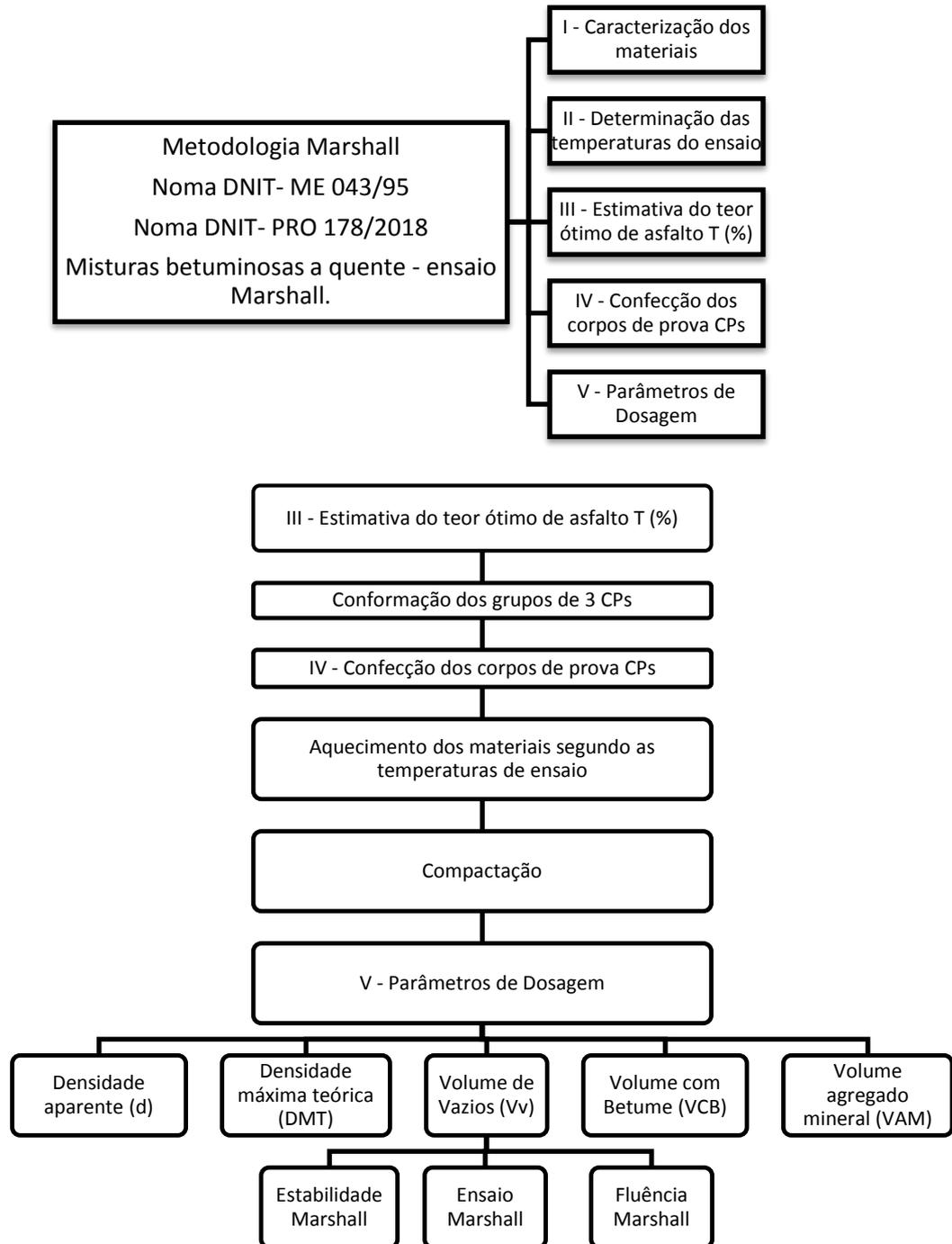
Fonte: O autor (2021).

O valor da carga máxima suportada pelos corpos de prova é conhecido como estabilidade Marshall e a deformação de ruptura como fluência. Além desses dois parâmetros, foram calculados também a densidade, o volume de vazios e a relação betume/vazios; esta última que representa a quantidade de vazios do agregado mineral preenchido por betume.

Os valores de estabilidade e fluência foram determinados a 60°C e corrigidos em função da altura ou volume do corpo de prova, conforme preconiza a metodologia proposta na norma DNIT ME 043/1995: “Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall”.

Na Figura 23, pode-se visualizar o fluxograma adaptado do inicialmente proposto por Martinez (2014) que descreve de forma esquemática a metodologia Marshall.

Figura 23 - Metodologia Marshall

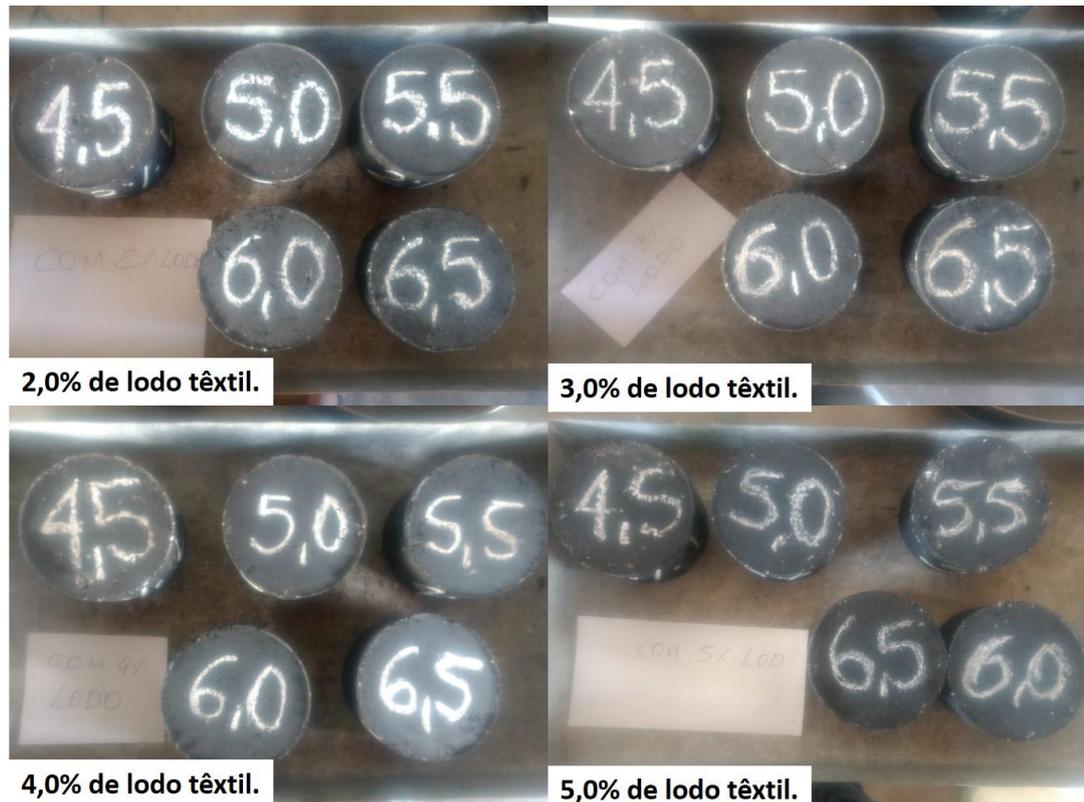


Fonte: Martinez (2014), adaptado.

Na análise do desempenho das misturas asfálticas, por meio do método Marshall, foram realizadas cinco dosagens 0%; 2,0%; 3,0%; 4,0%; e, 5,0% de lodo têxtil, com cinco teores de ligante asfáltico: 4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0%; e, 6,5%. O aspecto dos corpos de prova moldados com diferentes teores de lodo têxtil e ligante asfáltico pode ser visto na Figura 24. A escolha foi calcada no fato de uma grande

monta de trabalhos na literatura adotar esses valores para curvas granulométricas semelhantes. Assim, pôde-se obter um intervalo mais amplo do teor de ligante. Após esse procedimento, os gráficos foram pautados em cinco pontos, referentes aos teores de ligante.

Figura 24 - Corpos de prova moldados com diferentes teores de lodo têxtil e ligante asfáltico



Fonte: O autor (2021).

Após análise e interpretação dos resultados, foi possível determinar para a mistura em estudo o teor de CAP de projeto, juntamente à proporção dos agregados em massa e à máxima incorporação de lodo têxtil. Foram moldadas 3 amostras por traço, totalizando 75 corpos de prova, tanto para a inserção seca (lodo seco), quanto na forma úmida (lodo CAP), como se pode visualizar na Tabela 16.

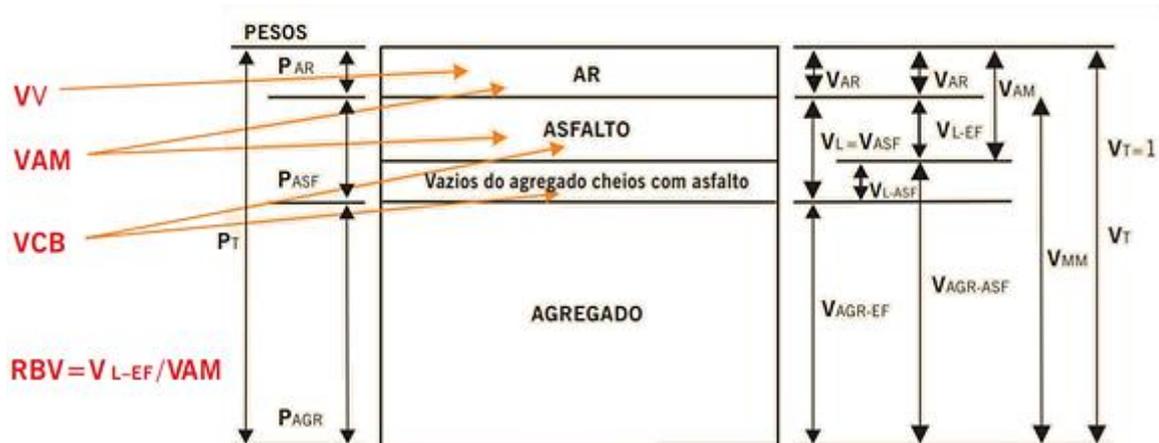
Tabela 16 - Quantitativo de corpos de prova para ensaio Marshall.

Teor de CAP	% de lodo têxtil utilizado				
	0 % (Ref.)	2,0%	3,0%	4,0%	5,0%
4,5%	6	6	6	6	6
5,0%	6	6	6	6	6
5,5%	6	6	6	6	6
6,0%	6	6	6	6	6
6,5%	6	6	6	6	6
Total:				150	

Fonte: O autor (2021).

Assim, este processo volumétrico tem o propósito de determinar o volume de asfalto e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades projetadas. Um esquema da volumetria de uma mistura asfáltica pode ser visto na Figura 25, na qual são apresentados os parâmetros volumétricos utilizados para a definição do teor ótimo de ligante. Bernucci *et al.* (2008) destacam os parâmetros de volumes de vazios  $V_v$  e de vazios nos agregados minerais (VAM), além disso é possível visualizar os vazios cheios com betume (VCB), que diz respeito tanto ao asfalto disponível para a mistura quanto àquele absorvido pelo agregado, e a relação betume-vazios (RBV), dada pela razão Asfalto Efetivo/VAM

Figura 25 - Esquema da volumetria de uma mistura asfáltica



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008)

### 3.5 Ensaios para propriedades mecânicas

Para realização dos ensaios mecânicos, foram selecionadas 3 proporções de misturas diferidas pelo teor de lodo têxtil constituinte (2,0% lodo seco, 2,0% lodo CAP e 3,0% lodo CAP), mantendo-se sempre constante o melhor resultado quanto ao teor de ligante. Foram confeccionados 112 corpos de prova para a determinação das propriedades mecânicas, conforme expostos na Tabela 17.

Tabela 17 - Quantitativo de corpos de prova para ensaios mecânicos

Ensaio	% de lodo têxtil utilizado			
	0 % (Ref.)	2,0% lodo seco	2,0% lodo CAP	3,0% lodo CAP
Fadiga	12	12	12	12
Resistencia à tração	3	3	3	3
Resiliência	3	3	3	3
Lottman	4	4	4	4
Cantabro	3	3	3	3
<i>Flow number</i>	3	3	3	3
			Total:	112

Fonte: O autor (2021).

Para maior confiabilidade na interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos, as médias foram analisadas e comparadas pela distribuição de probabilidade e estatística T de Student. Foi utilizado um nível de confiança de 95% unicaudal e os graus de liberdade variaram de acordo com o número de corpos de prova utilizados em cada ensaio, conforme previamente exposto na Tabela 17. A escolha entre a análise por variação igual ou desigual das amostras foi norteadada pelo método estatístico denominado teste-f, a fim de identificar o modelo que melhor se ajusta à cada família de dados.

#### 3.5.1 Resistência à tração

A resistência à tração é um importante parâmetro para a caracterização das misturas betuminosas, pois o seu resultado está diretamente relacionado à capacidade resistiva no tocante à tração do revestimento em serviço, além de ser

utilizado como referência para outros ensaios como os de módulo de resiliência e de fadiga.

O ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme padronizações da norma Brasileira DNIT ME 136/2018. Este consiste na aplicação de duas forças concêntricas e diametralmente opostas de compressão, aplicadas por frisos metálicos em um cilindro (corpo de prova), que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro. Assumindo que a ruptura do corpo de prova ocorre por tração ao longo do diâmetro, quando solicitado, as tensões geradas se igualam à tensão admissível do material.

O procedimento do ensaio iniciou-se pela caracterização geométrica dos corpos de prova (Figura 26), medindo-se a altura do corpo de prova com paquímetro, em quatro posições de forma equidistante. Após isso, adotou-se a altura média das quatro leituras como o valor da altura. De forma semelhante, mediu-se o diâmetro do corpo de prova em três posições paralelas, adotando-se também a média das leituras como diâmetro.

Figura 26 - Caracterização geométrica dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2021).

Em seguida, colocou-se os corpos de prova em um espaço com temperatura controlada e constante de  $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$  por um período de 2 horas, garantindo assim a estabilização da temperatura dos corpos de prova. O aspecto dos corpos de prova em repouso pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 - Corpos de prova em repouso



Fonte: O autor (2021).

Após esse período, os corpos de prova eram colocados com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, ajustando-se os pratos da prensa até que fosse obtida uma leve compressão, capaz de manter o corpo de prova fixo no lugar, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Realização do ensaio de resistência à tração



Fonte: O autor (2021).

A carga foi aplicada de forma progressiva, com uma velocidade de deformação entre 0,8 e 0,1 mm/s, até que se tivesse a ruptura. Por fim, anotou-se o valor da carga de ruptura. Foram utilizados três corpos de prova e o valor médio foi admitido como o valor de resistência a tração.

### 3.5.2 Módulo de resiliência

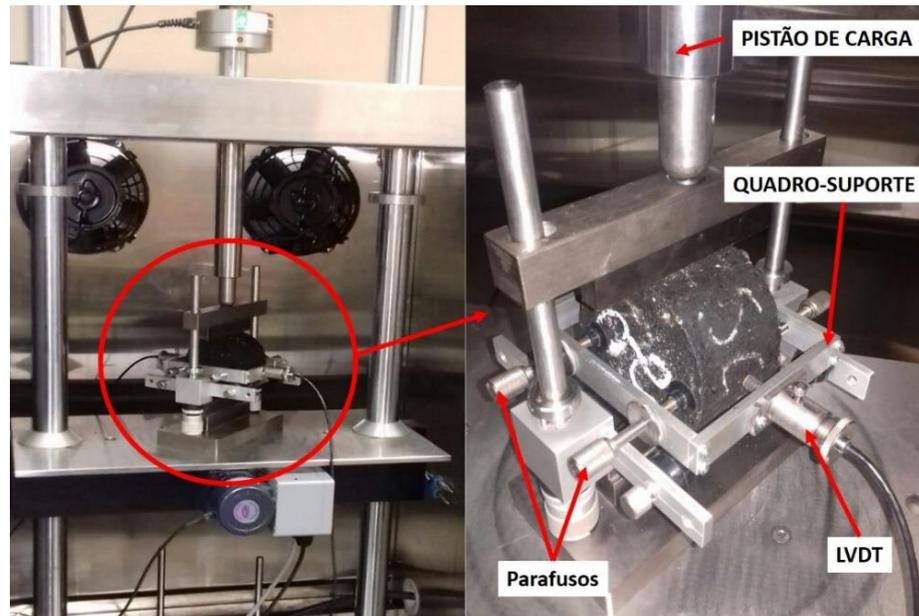
O módulo de resiliência (MR) é um importante parâmetro utilizado para avaliar a durabilidade do pavimento, pois está ligado diretamente à capacidade do material de absorver energia quando é deformado elasticamente e depois de descarregado, possibilitando a recuperação dessa energia. No Brasil, o ensaio de módulo de resiliência em misturas asfálticas é padronizado pela norma DNIT ME 135/2018, intitulada: “Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio”. O ensaio também foi realizado seguindo a norma americana ASTM D7369 – 20.

Os ensaios por ambos os métodos são semelhantes. No primeiro método calcula-se o MR instantâneo e no outro o módulo total. Um, chamado módulo de resiliência instantâneo, que é calculado usando a deformação horizontal recuperável que ocorre durante a fase de descarregamento de um ciclo de carga descarga. Já o outro é chamado módulo de resiliência total, e calcula-se usando a deformação total recuperável, que inclui tanto a deformação recuperável instantânea, quanto a que depende do tempo durante a fase de descarregamento ou período de repouso de um ciclo (MARQUES, 2004). Esses foram computados de forma automática pelo *software UTS000 maintenance utility v 2.03* da IPC Global UTS.

O ensaio consistiu na aplicação de duas forças concêntricas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que gera tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro. O primeiro passo foi prender o quadro suporte, por meio de dois parafusos nas faces extremas do corpo de prova cilíndrico, que devia estar apoiado em sua superfície cilíndrica segundo uma geratriz. Em seguida, colocou-se o corpo de prova na base da prensa, apoiado no friso côncavo inferior, para então assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com ele, diametralmente oposto ao friso inferior. Por fim, fixou-se e ajustou-se os transdutores LVDT (*Linear Variable Diferencial Transducers*), de modo a obter o registro no microcomputador, no início da escala linear desses.

Na Figura 29 se pode ver um corpo de prova devidamente preparado para a realização do ensaio de módulo de resiliência seguindo os passos descritos, com o indicativo de cada elemento componente do esquema experimental.

Figura 29 - Corpo de prova preparado para o ensaio de módulo de resiliência



Fonte: O autor (2021).

Foi adotada uma carga de 10% do valor resistência à tração, sendo este valor comumente utilizado segundo Bernucci *et al.* (2008) e compreendido dentro do intervalo definido pela norma do DNIT ME 135/2018 que estabelece cargas menores que 30% da resistência à tração. Para o ensaio de módulo de resiliência, foram moldados 3 (três) corpos de prova para cada mistura asfáltica avaliada, sendo o valor médio admitido como o valor do módulo de resiliência.

### 3.5.3 Resistência à fadiga

A resistência à fadiga está diretamente ligada à durabilidade da mistura asfáltica, pois se refere à diminuição gradual da resistência de um material por efeito de solicitações repetidas ciclicamente. O ensaio de resistência à fadiga por compressão diametral pode ser realizado por meio da tensão ou da deformação controlada. No Brasil, é mais utilizado o método à tensão controlada. A carga aplicada deve induzir tensões de tração máximas da ordem de 5% a 40% do valor de resistência à tração da mistura.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento com duração de 0,1 segundo a 0,9 segundo de intervalo, o que representa o tempo de intervalo entre a

aplicação de uma roda e outra. Neste tipo de ensaio, a frequência utilizada é de 1 Hz, sendo o corpo de prova sujeito a um estado biaxial de tensões (DNIT 183/2018 – ME).

O equipamento usado para determinação da vida de fadiga é o mesmo usado no ensaio de módulo de resiliência (IPC Universal Testing Machine (UTM 25)) da Universidade Federal de Campina Grande (Figura 30). O ensaio baseou-se em medidas em 12 (doze) corpos de prova individuais e 4 (quatro) níveis de tensão.

Foram então utilizadas cargas de 40%, 37,5%, 35% e 32,5% da resistência à tração para a determinação da resistência à fadiga de cada mistura asfáltica em avaliação. Adotou-se como critério de parada a falha dos corpos de prova em virtude das cargas aplicadas. Assim, se obteve o número de ciclos até a sua fadiga.

Figura 30 - Equipamento utilizado para os ensaios de fadiga e módulo de resiliência



Fonte: O autor (2021).

#### 3.5.4 Ensaio Cântabro

O ensaio Cântabro tem por finalidade avaliar o comportamento de misturas asfálticas quanto à perda de material quando submetidas à abrasão; de modo geral, avaliar o seu desgaste quando submetidos ao atrito externo, avaliando assim a sua coesão. Essa situação é comum no pavimento em serviço, incluindo tanto esse desgaste quanto a situação mais crítica de arrancamento de agregados da capa de rolamento, por efeito do atrito pneu com o pavimento.

O procedimento de ensaio foi baseado na norma NBR 15140/2014, sendo o método de ensaio semelhante ao utilizado para determinar o desgaste à abrasão do agregado graúdo, porém utilizando o CP sem as esferas de aço dentro do equipamento Los Angeles. O ensaio teve duração de 300 rotações no interior do equipamento, o qual gira a uma velocidade de 30 a 33 rpm. O desgaste da mistura asfáltica por abrasão é dado de forma percentual da variação em massa dos corpos de prova, antes e depois do desgaste induzido, sendo o resultado final a média aritmética de três amostras.

#### 3.5.5 *Flow number*

A realização do ensaio de *flow number* se deu por meio dos critérios estabelecidos pela norma DNIT 184/2018. Os corpos de prova foram preparados com altura de  $150,0 \pm 2,5$  mm e o diâmetro de  $102,0 \pm 2,0$  mm. Para a compactação, a altura foi fixada em 150,0 mm e ajustada a massa da mistura asfáltica de forma a atingir o grau de compactação de  $97,0 \pm 0,5$  % da densidade aparente de projeto. O ensaio foi realizado a 60°C e carga uniaxial compressiva de 200 kPa.

Utilizou-se o equipamento *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) da Universidade Federal de Campina Grande, representado na Figura 31. A aplicação do carregamento se deu no intervalo de 0,1 s e repouso de 0,9 s, e os critérios de parada adotados foram o alcance da zona terciária na curva de deformação plástica vertical uniaxial ou 7.200 ciclos, o que acontecesse primeiro. Todas as amostras obedeceram ao primeiro critério de parada.

Figura 31 - *Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*



Fonte: O autor (2021).

O ensaio foi efetuado com 12 corpos de prova, sendo 3 de cada tipo: referência (sem adição de lodo têxtil); com inserção de 2% na forma seca (lodo seco); e, com a inserção de 2% e 3% na forma úmida (lodo CAP).

### **3.6 Avaliação da durabilidade e do caráter ambiental**

Para tal, foram empregadas as técnicas de resistência ao dano por umidade induzida (DUI), análise dos extratos lixiviados e solubilizados. Por fim, análises químicas do pó de corte de corpos de prova e microscopia petrográfica óptica.

### 3.6.1 Resistência ao dano por umidade induzida (DUI)

O ensaio Lottman Modificado, ou ensaio de umidade induzida, possibilita verificar a sensibilidade à água de corpos de prova de misturas asfálticas, moldados em laboratório, avaliando a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água (DNIT 180/2018 – ME). Assim, avalia-se a ação deletéria causada pela água na mistura asfáltica. O ensaio compara a resistência à tração de corpos de prova condicionados ou não à água.

O ensaio consistiu em moldar e romper 4 corpos de prova para cada mistura asfáltica avaliada, sendo 0% (controle); 2% úmido e seco; e, 3% úmido, com o teor ótimo de ligante segundo a metodologia Marshall. A quantidade de golpes foi controlada de modo a conferir um índice de vazios entre 6% e 8%. Em seguida, saturou-se 2 corpos de prova entre 55% e 80% do seu volume de vazios com água (Figura 32-b) que foram, então, colocados em um local refrigerado com temperatura de -18°C durante 15 horas (Figura 32-d). Na sequência, os corpos de prova foram levados ao banho-maria a 60°C por 24 horas (Figura 32-e), seguidos de outro banho-maria a 25°C por 2 horas. Outros 2 (dois) corpos de prova não foram submetidos a acondicionamento da Figura 32, seguindo os critérios da norma (DNIT 180/2018 – ME).

Figura 32 - Sequência do procedimento para realização do ensaio Lottman



Fonte: Santos (2012).

Por fim, foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 32-f). Para uma mistura ser considerada aprovada, os corpos de prova condicionados em água devem atingir no mínimo 70% da resistência à tração dos corpos de prova não condicionados (DNIT 180/2018 – ME). Caso não seja atingida, tal relação pode ser um indicativo de que o agregado e o ligante não têm afinidade. Ressalta-se que a falta de adesividade e, conseqüentemente, dano excessivo por

umidade pode ser solucionado com o uso de aditivo melhorador de adesividade nos asfaltos aplicados a quente, conhecido como “dope”.

### 3.6.2 Lixiviação

O processo de lixiviação é realizado para se obter a capacidade de transferência de material orgânico e inorgânico ao ser submetido a um meio extrator. Segundo a norma NBR 10005 (2004), deve ser avaliada a porção de elementos constituintes do resíduo que, ao serem submetidos a meio ácido, são liberados (RAIMONDI, 2014).

Com a finalidade de reduzir os corpos de prova a grânulos passantes na peneira de 9,5 mm, eles foram aquecidos, fragmentados sem a quebra dos agregados e posteriormente passados na peneira indicada.

Posteriormente, pesou-se 5 g de cada amostra, a fim de determinar a solução extratora a ser utilizada. Por meio dos parâmetros da norma NBR 10005 (2004), foi definida a utilização da solução extratora nº 1. Para sua elaboração, em um béquer, foram adicionados 5,7 mL de ácido acético glacial, 64,3 mL de hidróxido de sódio (NaOH), a concentração de 1 molar, e completou-se o volume de 1 L com água destilada, procedimento realizado quatro vezes.

Na sequência, transferiu-se as 50 g da amostra para os frascos de agitação devidamente preenchidos com 1000 g da solução extratora, apresentados na Figura 33; os frascos foram, então, submetidos à agitação no agitador rotatório a cerca de 30 rpm por cerca de 18 horas e temperatura de 25°C.

Figura 33 - Agitador rotatório de frascos para ensaios de lixiviação



Fonte: O autor (2021).

Após esse período, as amostras foram filtradas. Por fim, os extratos lixiviados foram analisados qualitativamente por meio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), de forma que foi possível observar o indicativo de fixação no resíduo na matriz asfáltica de forma comparativa com a amostra padrão. Água destilada foi utilizada como branco, sendo seu espectro subtraído do espectro de cada amostra, de forma a não haver sobreposição de halos da água sobre a o extrato estudado.

### 3.6.3 Solubilização

Diferentemente do ensaio de lixiviação, em que a solução extratora é ácida, o ensaio de solubilização tem por objetivo avaliar a liberação metálica numa situação na qual o ambiente de contato é a água, por um período determinado (RAIMONDI, 2014).

Inicialmente, o resíduo foi seco em estufa a uma temperatura de 42°C. Na sequência, foram separados 250 g dessa porção que foi inserida em um frasco de 1500 mL. Adicionou-se, então, 1000 mL de água destilada e agitou-se em baixa velocidade por 5 min. Em seguida, os frascos foram devidamente cobertos com filme de PVC e deixados em repouso por 7 dias a 25°C (Figura 34).

Figura 34 - Amostras em descanso durante ensaio de solubilização



Fonte: O autor (2021).

Por fim, filtrou-se o material e foi aferido o pH do extrato solubilizado; com o material filtrado foram realizadas as devidas análises. Os procedimentos

experimentais foram desenvolvidos em conformidade com a norma ABNT NBR 10006:2004.

Os teores de bário, cálcio, cádmio, cobalto, cobre, magnésio, matéria orgânica, acidez, salinidade, molibdênio, níquel, nitrato, chumbo, fosfato, potássio, prata, antimônio, sódio, vanádio e zinco foram analisados no extrato solubilizado do lodo puro e das diferentes misturas asfálticas. Assim, foi possível observar a capacidade da mistura asfáltica de conter de forma mecânica esses elementos de forma total ou parcial dentro da matriz asfáltica. A eficiência da matriz asfáltica na imobilização do resíduo possibilita a comparação entre as metodologias de inserção, não somente pelo lado mecânico, mas também ambiental. As metodologias e os equipamentos utilizados na análise dos extratos solubilizados podem ser vistos na Tabela 18 e na Figura 35, respectivamente.

Tabela 18 - Metodologias e equipamentos utilizados na análise dos extratos solubilizados

<b>Parâmetro</b>	<b>Tipo de Análise</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Figura 35</b>
<b>pH</b>	Potenciometria	Medidor de pH HANNA, mod HI-2002-02 com eletrodo digital	I
<b>Salinidade</b>	Condutometria	Condutivímetro TECNOPON 150	III
<b>Acidez</b>	Tritrimetria de neutralização	Bureta	VI
	Tritrimetria de oxi-redução	Bureta	VI
<b>Matéria orgânica</b>			
<b>Fosfato</b>	Espectrometria VIS	Espectrofotômetro BEL,UV/VIS mod UV-M51	II
<b>Nitrato</b>	Espectrometria UV	Espectrofotômetro BEL,UV/VIS mod UV-M51	II
<b>Cálcio</b>	Complexometria com EDTA	Bureta	VI
<b>Magnésio</b>	Complexometria com EDTA	Bureta	VI
<b>Sódio</b>	Fotometria de Chama	Fotômetro de chama MICRONAL, mod 462	V
<b>Potássio</b>	Fotometria de Chama	Fotômetro de chama MICRONAL, mod 462	V
<b>Bário</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	IV
<b>Cobre</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Níquel</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Cádmio</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Chumbo</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Vanádio</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Zinco</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Antimônio</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	
<b>Prata</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240	

<b>Cobalto</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240
<b>Molibdênio</b>	Espectrometria	Espectrômetro AGILENT AA240

Fonte: O autor (2021).

Figura 35 - Equipamentos utilizados para análise dos extratos solubilizados



Fonte: O autor (2021).

### 3.6.4 Análise química do resíduo do corte dos corpos de prova

Também foram realizados ensaios de fluorescência de Raios X (FRX) do material proveniente dos cortes dos corpos de prova (Figura 36). Esses resíduos foram aparados em um filme plástico colocado na serra circular no momento do corte dos corpos de prova para preparação das amostras da mistura para as análises microestruturais. A análise desse material tem por finalidade a caracterização química, com isso será possível observar se, ao seccionar os corpos de prova, o lodo têxtil tem a tendência de se desprender do restante da mistura. Assim, será possível visualizar como o lodo têxtil está sendo absorvido na matriz em ambas as inserções, seja o lodo seco, seja o lodo CAP, bem como se há reações químicas ou apenas interações físicas.

Figura 36 - Corte de corpos de prova para caracterização microestrutural



Fonte: O autor (2021).

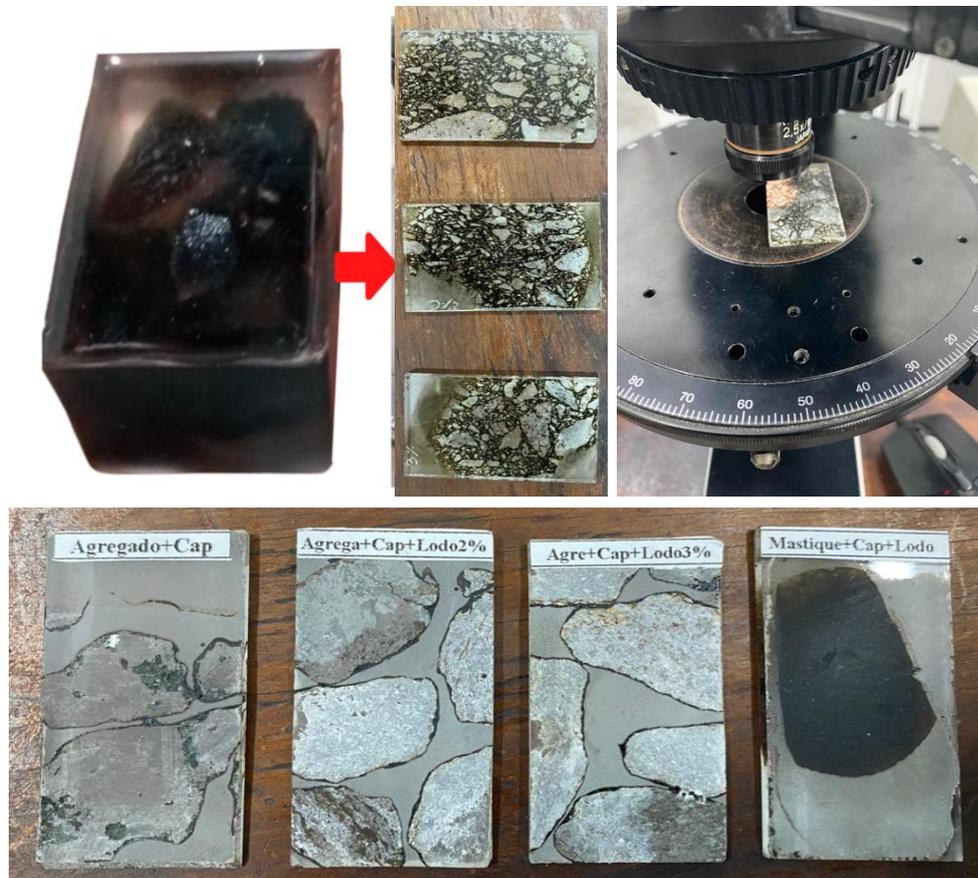
### 3.6.5 Análise microestrutural da mistura

Para a avaliação das interações microscópicas, foi realizada microscopia petrográfica óptica para o ligante com adição de lodo têxtil e sua interação com o agregado no ensaio de adesividade, como também dos diferentes concretos asfálticos estudados, bem como apenas do mástique de lodo e CAP. Para que fosse possível confeccionar as lâminas exclusivamente com lodo e CAP, foi adicionado lodo ao ligante até que ele ficasse suficientemente rígido ao ponto de prosseguir com as outras etapas da elaboração das lâminas. Por fim, chegou-se a uma proporção de 37% de CAP e 63% de lodo têxtil em massa para as análises do sistema lodo+ligante, proporção em que o mástique fica suficientemente rígido para possibilitar o corte.

De modo geral, a técnica de preparação das lâminas seguiu a metodologia semelhante à empregada por Rocha Filho *et al.* (2018). Inicialmente, foi realizado o corte de cada corpo de prova a fim de se obter uma amostra com representatividade de todos os constituintes de forma prismática 6 x 3 x 2cm aproximadamente, extraída do interior dos CPs. A superfície de análise foi devidamente polida com o uso de uma politriz com carga abrasiva de alumina nas granas de nº 220, 600 e 800 em sequência

por aproximadamente 8 minutos no total. Após a lavagem com sabão de pH neutro e água corrente, a esquirola e a lâmina de vidro foram colocadas em estufa à temperatura entre 50°C e 60°C para secagem total. A união das peças foi feita com auxílio de resina e colocada em estufa a 55°C por 24 horas para secagem. Por fim, foi feito mais um polimento a fim de obter lâminas com espessura padrão de 0,03 mm. A análise das lâminas foi realizada utilizando um microscópio ótico petrográfico Olympus bx40, Câmera sc30 e *software* AnalySiS. Um esquema sequencial do tratamento das amostras pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 - Microscopia petrográfica óptica.



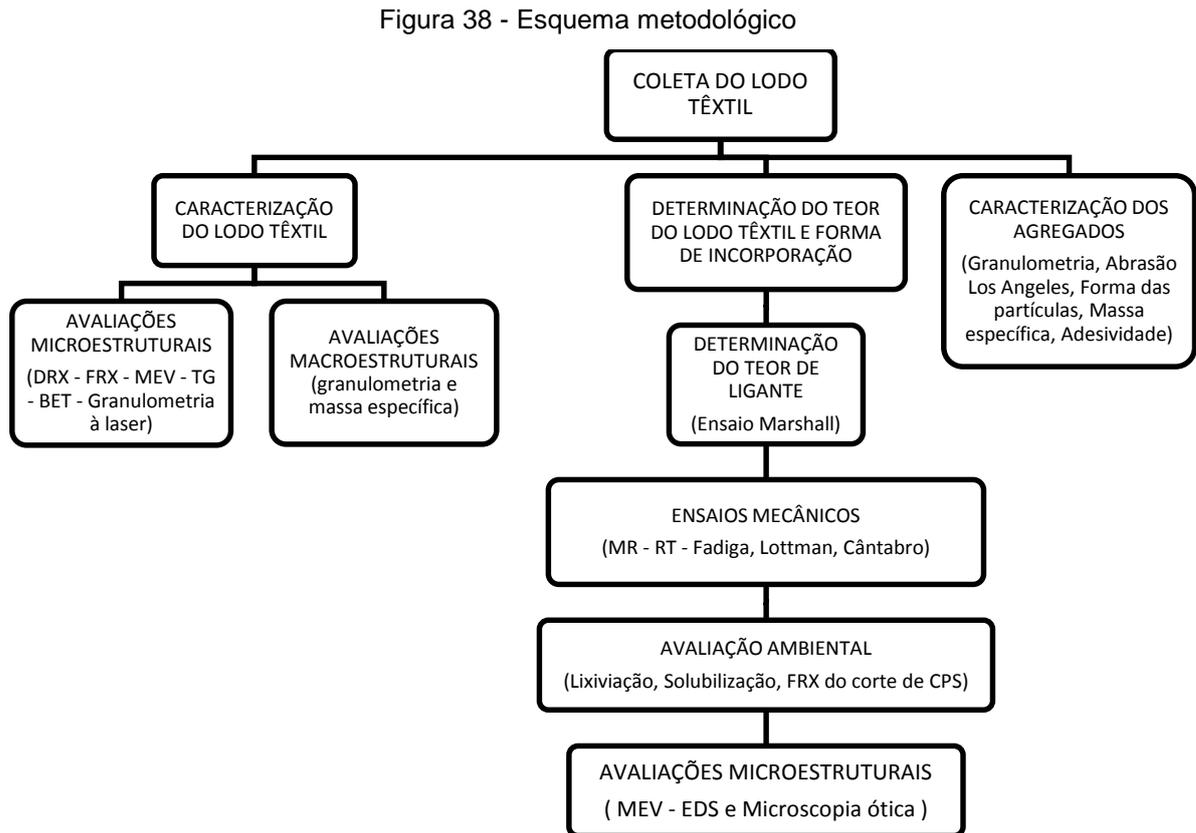
Fonte: O autor (2021).

### 3.7 Viabilidade operacional

Para demonstrar a viabilidade operacional do beneficiamento do lodo têxtil, foi construída uma composição de custos simplificada com itens provenientes do sistema de pesquisa que informa os custos de projetos e índices da construção civil para o

estado de Pernambuco e cotações locais. Outros dados, como quantitativos de obras e valores, foram obtidos junto ao Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE/PE).

Na Figura 38 visualiza-se uma panorâmica sequencial resumida de todo procedimento metodológico.



Fonte: O autor (2021)

### 3.8 Resumo das metodologias empregadas na concepção e análises das misturas asfálticas

Por fim, na Tabela 19, visualiza-se um quadro resumo contendo as metodologias empregadas na concepção e análises das misturas asfálticas. Nela constam os parâmetros esperados e suas respectivas relevâncias para a pesquisa em questão, como também as medidas a serem adotadas caso um dos parâmetros em análise não se enquadre no desejado.

Tabela 19 - Resumo das metodologias empregadas na concepção e análises das misturas asfálticas

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Parâmetro esperado</b>	<b>Relevância do parâmetro</b>	<b>Providência caso o parâmetro não seja atendido</b>
<b>Ligante Asfáltico (CAP 50/70)</b>				
Penetração	DNIT 155/2010-ME	Entre 50/70 (0,1mm)	Característico do ligante asfáltico	-
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME	Superior a 46 minutos.	Garante consistência do ligante.	-
Viscosidade rotacional cinemática	NBR 15184/2004	Valores específicos para cada temperatura, vide Tabela 10.	Constrói a curva de viscosidade do ligante.	-
<b>Agregados</b>				
Granulometria	DNIT 083/1998-ME	Os agregados devem atender às granulometrias nominais.	Permitir combinações para formar a faixa granulométrica da mistura.	Substituição do agregado.
Ensaio de Abrasão "Los Angeles"	DNIT 035/1998-ME	Os agregados graúdos devem apresentar desgaste máximo de 50%.	O agregado deve resistir a abrasão causada pelo tráfego.	Substituição do agregado.
Forma das partículas	DNIT 424/2020-ME	Os agregados graúdos devem apresentar índice de forma superior a 0,5.	Não apresentar forma lamelar > 10%.	Substituição do agregado.
Massa específica e absorção	DNIT 081/1998-ME	Medir a densidade real do agregado graúdo e a absorção de água.	Tem grande interferência na densidade da mistura. Deve absorver água minimamente.	Substituição do agregado.
Ensaio de adesividade	DNIT 078/1994-ME DNIT 079/1994-ME PDI	Verifica a adesividade do agregado ao ligante.	Garante a aderência do ligante ao agregado.	Substituição do agregado ou uso de DOPE.
Equivalente de areia	DNIT 054/1997-ME	Deve ser superior a 55%.	Estabelece a quantidade de finos e de possíveis impurezas.	Substituição total ou parcial do agregado.
Densidade real	DNIT 084/1995-ME	Revelar a densidade real do agregado miúdo.	Tem grande interferência na densidade da mistura.	-

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Parâmetro esperado</b>	<b>Relevância do parâmetro</b>	<b>Providência caso o parâmetro não seja atendido</b>
Sanidade	DNIT 089/1994-ME	Resistência à desintegração química	Revela a integridade do agregado ante a agressão química	Substituição do agregado.
Massa específica real	DNIT 085/1994-ME	Revelar a massa específica real do agregado miúdo.	Tem grande interferência na densidade da mistura	-
<b>Mistura</b>				
Densidade relativa máxima medida	DNIT 427/2020-ME	Revelar a densidade da mistura.	Auxilia na definição da dosagem.	-
Porcentagem de vazios	DNIT 043/1995-ME	Deve ficar entre 3% e 5 %	Auxilia na definição do teor de ligante de projeto.	Modificar o teor de ligante.
Relação betume/vazios	DNIT 043/1995-ME	Deve ficar entre 75% e 82%	Auxilia na definição do teor de ligante de projeto.	Modificar o teor de ligante.
Estabilidade Marshall	DNIT 043/1995-ME	Para 75 golpes deve ser superior a 500 kgf.	Parâmetro mecânico do concreto asfáltico.	Modificar o teor de ligante ou agregados.
Resistência à tração	DNIT 138/2009-ME	Superior a 0,65 MPa.	Parâmetro mecânico do concreto asfáltico.	Modificar o teor de ligante ou agregados
Módulo de resiliência	DNIT 135/2018-ME	Corresponde à deformabilidade elástica do CBUQ.	Parâmetro para desempenho de pavimentos.	Anotar e reportar resultado.
Resistência a fadiga	DNIT 183/2018-ME	Corresponde à quantidade de ciclos para a ruptura sob determinado nível de deformação.	Parâmetro para desempenho de pavimentos.	Anotar e reportar resultado.
<i>Flow number</i>	DNIT 184/2018-ME	Estimativa da resistência à deformação permanente.	Estima possíveis deformações permanentes	Modificar o teor de ligante ou agregados
Ensaio Cântabro	NBR 15140/2014	Deve apresentar desgaste mínimo.	Garantir a durabilidade do pavimento pela abrasão do tráfego.	Anotar e reportar resultado.

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Parâmetro esperado</b>	<b>Relevância do parâmetro</b>	<b>Providência caso o parâmetro não seja atendido</b>
Resistência ao dano por umidade induzida (DUI)	DNIT 180/2018-ME	As amostras condicionadas devem apresentar no mínimo 70% da resistência de referência.	Garantir a durabilidade do pavimento frente a ação da água.	Refazer a dosagem.
Lixiviação	NBR 10005/2004	Comparar com anexo F da ABNT NBR 10004/2004	Garantir que o resíduo lixiviado está dentro dos padrões ambientais.	Modificar o teor de lodo têxtil.
Solubilização	NBR 10005/2004	Comparar com anexo G da ABNT NBR 10004/2004	Garantir que o resíduo lixiviado está dentro dos padrões ambientais	Modificar o teor de lodo têxtil.
Fluorescência por Raios X (FRX)	-	Mínima variação entre as misturas com e sem lodo têxtil.	Verificar se elementos químicos do lodo têxtil se desprenderão após corte	Modificar o teor de lodo têxtil.
Microscopia Petrográfica Óptica	-	Capturar a estrutura de imobilização do resíduo.	Demonstrar como a matriz asfáltica imobiliza o resíduo.	Modificar o teor de lodo têxtil.

Fonte: O autor (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico serão abordados e discutidos os resultados encontrados na pesquisa.

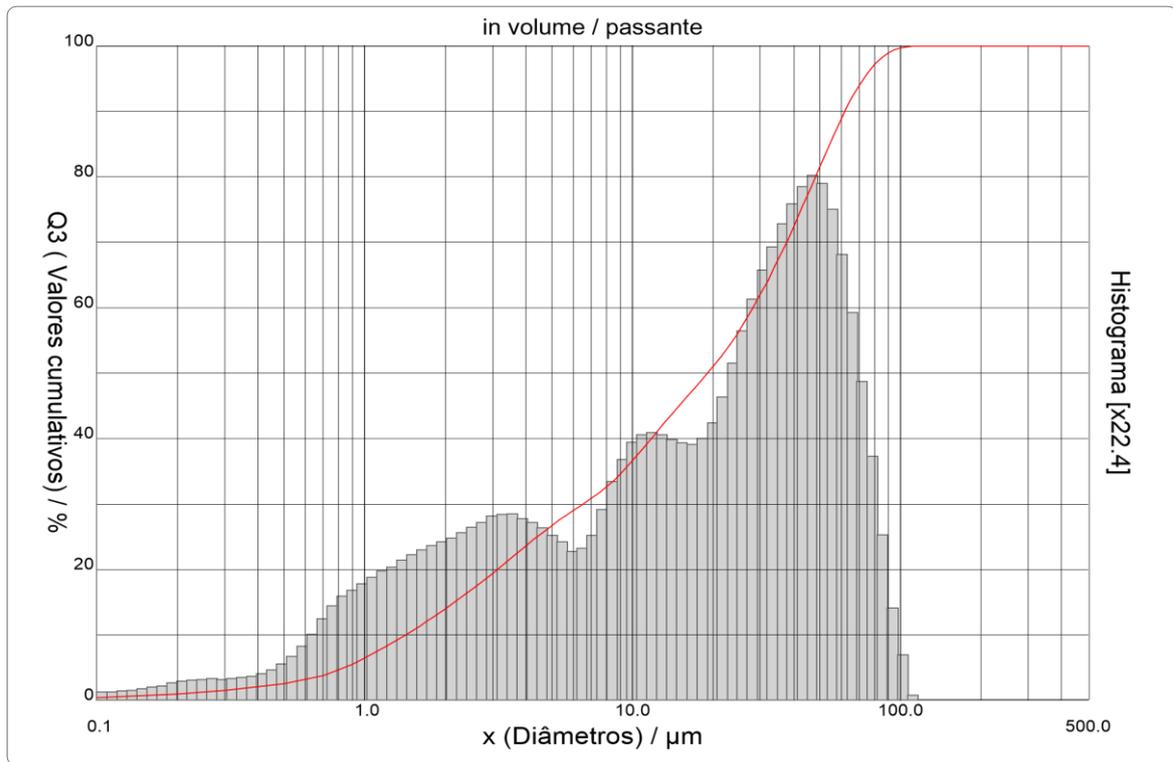
### 4.1 Caracterização do lodo têxtil

A caracterização do lodo têxtil foi dividida em granulométrica, microestrutural e química.

#### 4.1.1 Caracterização granulométrica do lodo têxtil

Conforme a granulometria a laser do lodo têxtil, apresentada na Figura 39, o diâmetro médio é  $26,10 \pm 0,65 \mu\text{m}$ . Os diâmetros médios a 10%, 50%, 90% são de 1,42, 19,05 e  $61,99 \mu\text{m}$ , respectivamente. De modo geral, 97,15% do lodo têxtil possui diâmetros inferiores a  $80 \mu\text{m}$ . As partículas do lodo têxtil atenderam ao requisito mínimo de 65% passando na malha #200 com abertura de  $75 \mu\text{m}$  para ser considerado fíler (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1997). Segundo a AASHTO (1991), a presença de partículas ultrafinas, menores que  $20 \mu\text{m}$ , e até com alguma porção menor que  $5 \mu\text{m}$ , tendem a compor uma película com o ligante denominada mástique, que envolve as partículas de agregados miúdos e grãos; a razão do volume de ligante livre pelo volume total de ligante tem efeito significativo na rigidez do mástique (MOTTA; LEITE, 2000).

Figura 39 - Granulometria a laser do lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

#### 4.1.2 Caracterização microestrutural e química do lodo têxtil

Como pode ser visualizado na Tabela 20, o lodo têxtil em estudo é quimicamente composto prioritariamente por cálcio, magnésio e silício, conforme Tabela 20. Enxofre, alumínio, cloro, manganês também o compõem em menores proporções. A supracitada composição química está em consonância com a obtida em outros lodos têxteis apresentadas em Leloup (2013), Zanoni (2013), Oliveira (2014), Aquino *et al.* (2015), Anjos (2017), Aziz *et al.* (2017), Ferreira (2018) e Goyal *et al.* (2019)

Tabela 20 - Composição química do lodo têxtil.

Componente / Percentual (%)					
CaO	28,18	SO <sub>3</sub>	4,34	MnO	1,63
MgO	20,98	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,62	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,44
SiO <sub>2</sub>	14,81	Cl	2,18	Orgânicos*	20,00

\*Valor obtido pelo TGA/DTG \*\* Outros 2,82%.

Fonte: O autor (2021).

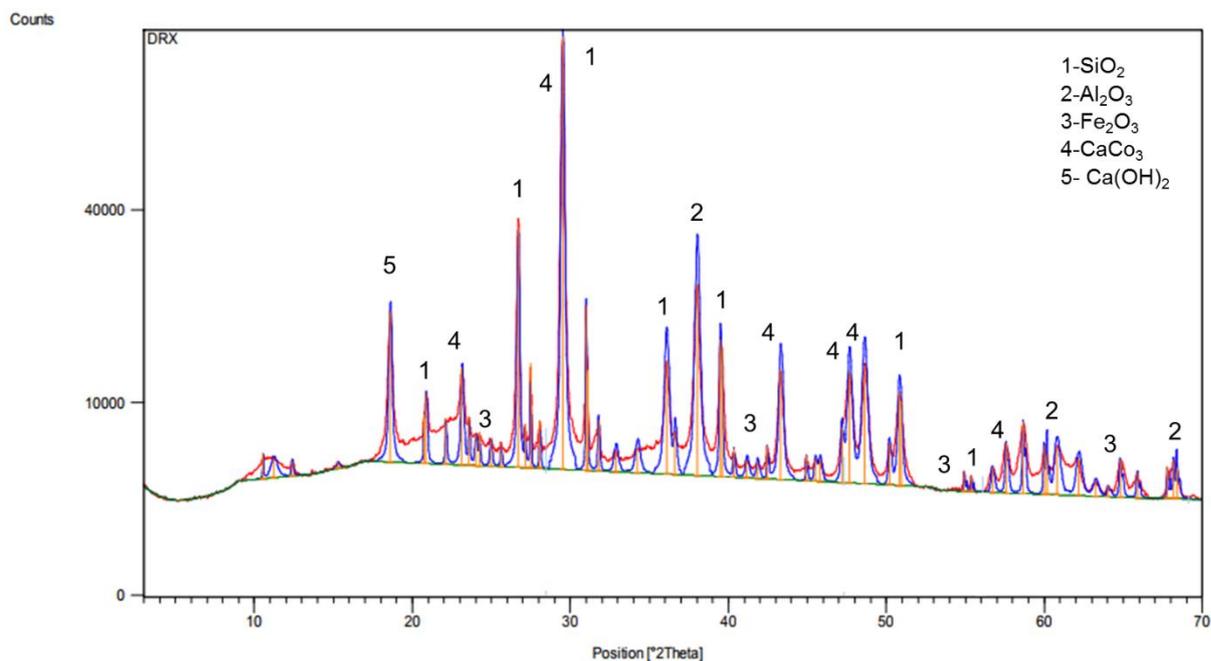
A partir das informações químicas do lodo estudado, é possível construir uma correlação entre os processos de diferenciação do *jeans* e do tratamento realizado no efluente. Ao observar a tabela apresentada, é evidente que a sílica tem altas concentrações no lodo industrial, assim como as amostras analisadas indicadas na Tabela 1, por meio da qual se observa que esse é o elemento de maior ou segunda maior taxa de composição em oito das dez amostras. Tal aspecto é decorrente da utilização da argila expandida (que possui como principal componente a sílica ( $\text{SiO}_2$ )), conforme Moravia *et al.* (2006), na estonagem, um processo que desgasta o tecido por motivos estéticos e o prepara para receber os alvejantes e corantes.

Outro componente obtido é o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que está diretamente relacionado ao processo de tratamento físico-químico juntamente com o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), no qual se emprega sulfato ou policloreto de alumínio na etapa de floculação. Este foi identificado em altas concentrações nas amostras (1) Leloup (2013), (4) Ferreira (2018), (5) Sonai *et al.* (2016), (6) Anjos (2017) e (7) Zanoni (2013), como visto na Tabela 1. Soluções férricas também são utilizadas para promover a solubilização e fica evidente essa substituição nas amostras (8) Goyal *et al.* (2019) e (9) Zhan *et al.* (2019), que apresentam um teor elevado de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), também obtido na análise do lodo estudado (Tabela 2), e baixa concentração de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), também obtido na análise do lodo estudado na presente pesquisa.

O fato de o lodo têxtil ter aproximadamente 64% da sua composição formada por cálcio, magnésio e silício é benéfico à matriz asfáltica, uma vez que esses elementos são constituintes de diversos fileres convencionais, como a cal, o pó calcário, fileres de areia de campo, pó de pedra, carbonato de magnésio e cimento Portland (SOUZA; RODRIGUES; SOUZA NETO, 1998; SOARES; CAVALCANTE, 2001; BARRA *et al.*, 2014; JITSANIGAM *et al.*, 2018;) por exemplo. Esses minerais conferem ao lodo um pH básico superior a 8,4.

O difratograma do lodo têxtil obtido via difração de Raios X (DRX) encontra-se ilustrado na Figura 40. Verifica-se o indicativo que o lodo têxtil contém material amorfo devido ao halo entre  $10^\circ$  e  $17^\circ$ . No entanto, também se pode constatar a presença de materiais cristalinos como o quartzo, alumina e óxido de ferro, indicados na Figura 40.

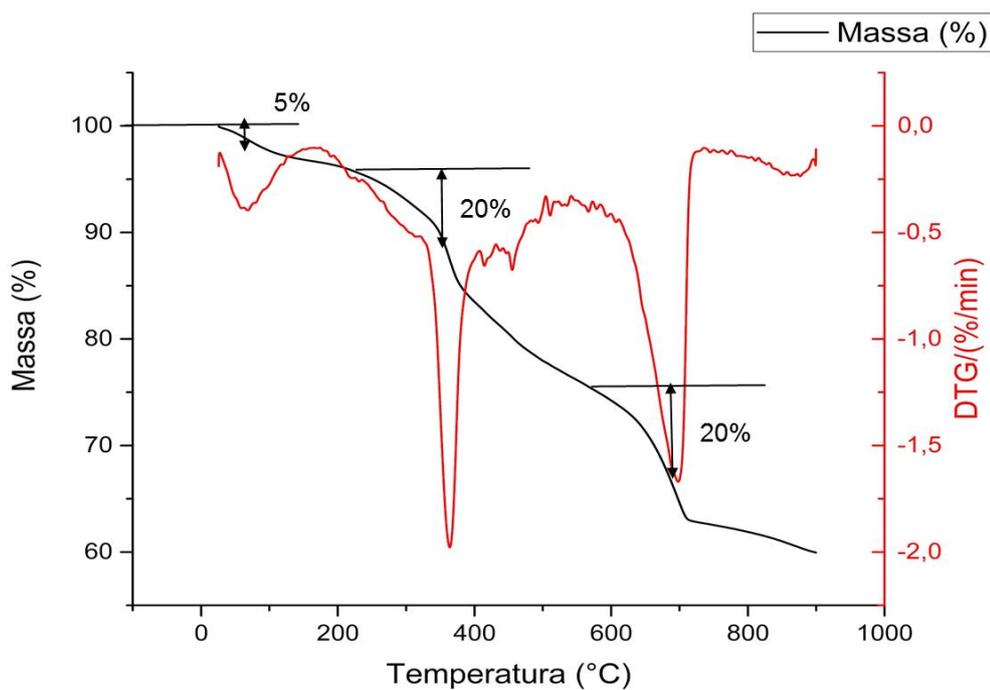
Figura 40 - Difratograma de Raios X do lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 41 são apresentadas a curva de variação da massa em função da temperatura (TG), em preto, e a derivada primeira dessa variação em função do tempo (DTG), em vermelho.

Figura 41 - Termogravimetria do lodo têxtil

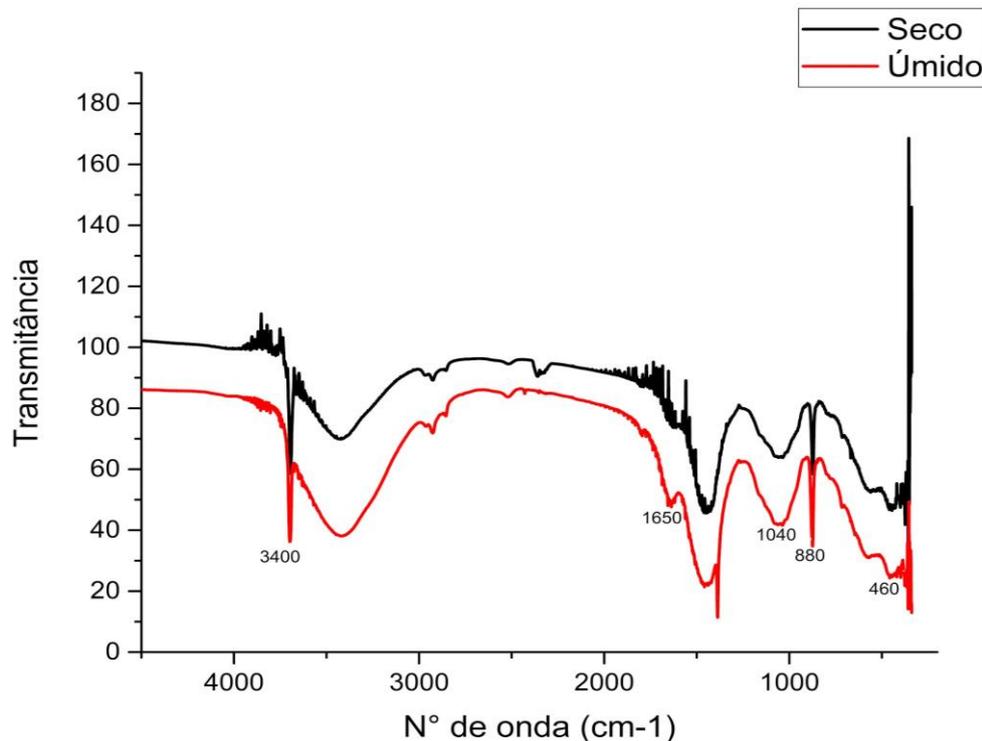


Fonte: O autor (2021).

Na análise da variação de massa em função da temperatura (DTG), podem ser observados, por meio do gráfico, três estágios. O primeiro envolve uma perda de massa de cerca de 5%, com temperatura máxima por volta de 50°C, relacionado com a umidade existente na amostra de lodo têxtil. O segundo estágio ocorre com temperatura máxima por volta de 350°C, com perda de cerca 20% que corresponde à porção de matéria orgânica contida. Por fim, o terceiro estágio ocorre com uma redução por volta de 20% em uma temperatura máxima em torno de 700°C, que indica uma porção de material inorgânico na amostra, especificamente o magnésio que se decompõe em temperaturas superiores a 650°C.

As bandas de absorção no infravermelho do lodo têxtil seco (seco em estufa), em preto, e úmido (condição ambiente), em vermelho, podem ser vistas na Figura 42.

Figura 42 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier do Lodo Têxtil



Fonte: O autor (2021).

Verifica-se que os picos ocorrem nos comprimentos de onda 3400  $\text{cm}^{-1}$ , 1650  $\text{cm}^{-1}$ , 1040  $\text{cm}^{-1}$ , 880  $\text{cm}^{-1}$  e 460  $\text{cm}^{-1}$ . A primeira observação é que, apesar da variação da transmitância entre o lodo seco e úmido, os valores de número de onda nos quais

ocorreram os picos foram coincidentes. Assim, como o aspecto importante para a avaliação são esses pontos, a avaliação pode se dar de forma conjunta.

De acordo com o quadro exposto por Lima (2018), a vibração em  $3400\text{ cm}^{-1}$  indica ligações do tipo O-H; em  $1650\text{ cm}^{-1}$ , vibrações nas ligações H-O-H. As vibrações em torno de  $1660\text{ cm}^{-1}$  apontam a presença de ligações duplas com átomos de carbono, dos tipos C = C, C = N ou C = O, já em  $1450\text{ cm}^{-1}$ , ligações com  $\text{CH}_3$  (PAVIA *et al.*, 2010). Essas vibrações estão relacionadas a compostos orgânicos, sobretudo imidazolina (DITAMA; MUKTIARTI; SOEGIJONO, 2020), presente nos amaciantes catiônicos (CARVALHO, 1988) e celulose (CHEN *et al.*, 2018) presente na fibra dos tecidos (GUARATINI; ZANONI, 2000). A presença de orgânicos tende a ser positiva, uma vez que os aditivos orgânicos são amplamente utilizados em ligantes de misturas asfálticas, tendo como um dos objetivos principais a redução da viscosidade do ligante. Alguns dos efeitos ocasionados por essa adição são: a melhora da trabalhabilidade, da compactabilidade e da resistência a fraturas (SEDAGHAT *et al.*, 2020). Sedaghat *et al.* (2020) observaram uma diminuição na penetração, ductilidade e da viscosidade do ligante, assim como, aumento no ponto de amolecimento em decorrência da incorporação de alguns aditivos orgânicos.

Li *et al.* (2020) afirmam que a fibra de celulose pode adsorver e estabilizar o ligante nas misturas por meio de infiltração física e ação de ligações químicas. A aplicação dessas fibras pode ainda retardar a propagação de microfissuras, de forma que ocasiona uma melhora da capacidade de “autocura” da matriz asfáltica. Os autores, entretanto, indicam a importância de se atentar ao envelhecimento do material que, devido à oxidação, tem seu desempenho reduzido.

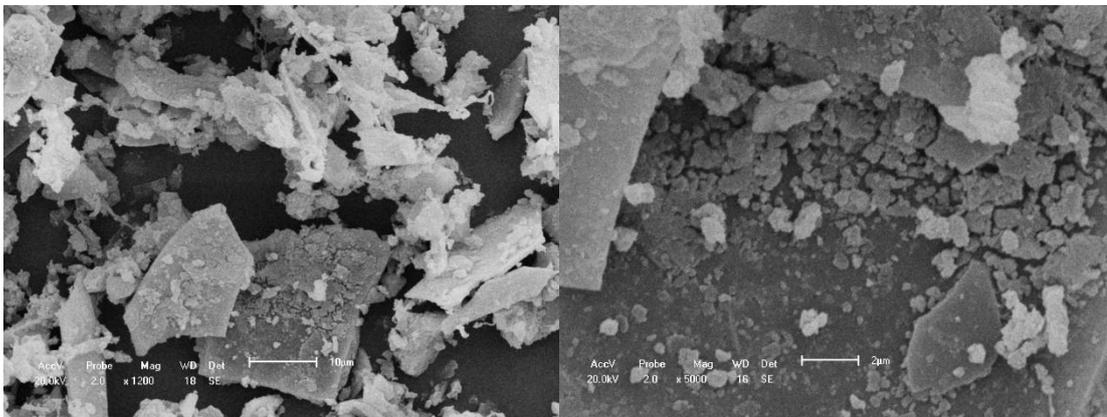
Em contrapartida, Wróbel *et al.* (2020) analisaram os efeitos da adição de imidazolina, como agente “rejuvenescedor” de misturas de revestimento asfáltico reciclado. Foi observado que a inserção de imidazolina levou a resultados satisfatórios, atestando sua viabilidade de utilização em tal contexto. A imidazolina ocasionou aumento na penetração, redução na viscosidade e no ponto de amolecimento, além de aumentar a resistência da mistura ao envelhecimento. Dessa forma, a presença desses orgânicos pode estar balanceando a tendência de aumento excessivo da viscosidade ocasionado pelos outros constituintes do lodo têxtil ao ser misturado ao ligante.

As vibrações em  $750\text{ cm}^{-1}$  atestam a presença de cloretos, já as de tensão em  $1040\text{ cm}^{-1}$  assimétrica (Si-O-Si e Al-O-Al);  $880\text{ cm}^{-1}$ , tensão assimétrica Al-O; por fim,

em  $460\text{ cm}^{-1}$ , tensão simétrica Al-O-Si (LIMA, 2018), convergindo com os resultados obtidos no ensaio de fluorescência de Raios X.

Quanto à morfologia das partículas do lodo têxtil, pode-se inferir que elas apresentam forma irregular e tamanhos diferenciados, entretanto as imagens revelam a existência de partículas ultrafinas (Figura 43), assim como foi constatado na granulometria a laser.

Figura 43 - Microscopia eletrônica de varredura do lodo têxtil em análise ampliada em 1200x (esq.) e 5000x (dir.)



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 43 (esq.) é possível observar que as partículas ultrafinas menores que  $5\text{ }\mu\text{m}$  observadas na granulometria a laser tem a tendência de se depositar sobre as partículas maiores. Quando da aproximação da imagem em 5000x (Figura 43 (dir.)) percebe-se que é uma deposição física de grãos e não uma aglomeração com adesão química entre os grãos. Também é possível observar que devido à sua composição heterogênea algumas superfícies apresentam a presença de rugosidades e microporos.

#### 4.2 Ligante asfáltico modificado por lodo têxtil

Os resultados de ponto de amolecimento, penetração e de viscosidade rotativa *Brookfield*, obtidos para as misturas de referência com e sem adição de lodo têxtil, podem ser vistos na Tabela 21. Para todas as amostras, utilizou-se o *spindle 21*. Foram adotadas as porcentagens de melhor desempenho na dosagem Marshall que serão apresentadas na sequência, explicitando que as porcentagens são em relação

à massa total da mistura. Considerando um teor de ligante de 5,5%, as adições representam aproximadamente 36,4% e 54,5% respectivamente, em relação ao ligante.

Tabela 21 - Propriedades do CAP 50/70 modificado com lodo têxtil

ENSAIOS	Especificação	Sem Lodo Têxtil	2,0% Lodo Têxtil	3,0% Lodo Têxtil	Unidade
Penetração	50 - 70	50,00	44,33	34,67	0,1 mm
Ponto de amolecimento	46 min	52,50	54,50	56,50	°C
Viscosidade Rotacional 135 GCSP21	274 min	426,25	586,25	678,75	cP
Viscosidade Rotacional 150 GCSP21	112 min	220,50	282,50	332,00	cP
Viscosidade Rotacional 177 GCSP21	57 a 285	85,50	102,00	119,50	cP

Fonte: O autor (2021)

Embora haja um incremento na viscosidade em todas as temperaturas e teores de adição de lodo têxtil, todas as misturas asfálticas avaliadas permaneceram dentro das especificações para o CAP 50/70. Observando as curvas de viscosidade (Figura 44), percebe-se que os ligantes modificados com o lodo têxtil apresentam maior distinção do ligante-padrão a baixas temperaturas, sendo diminuída com o incremento de temperatura. As variações chegaram a 37,5% e 59,2% para 2,0% e 3,0% de adição de lodo têxtil CAP, respectivamente.

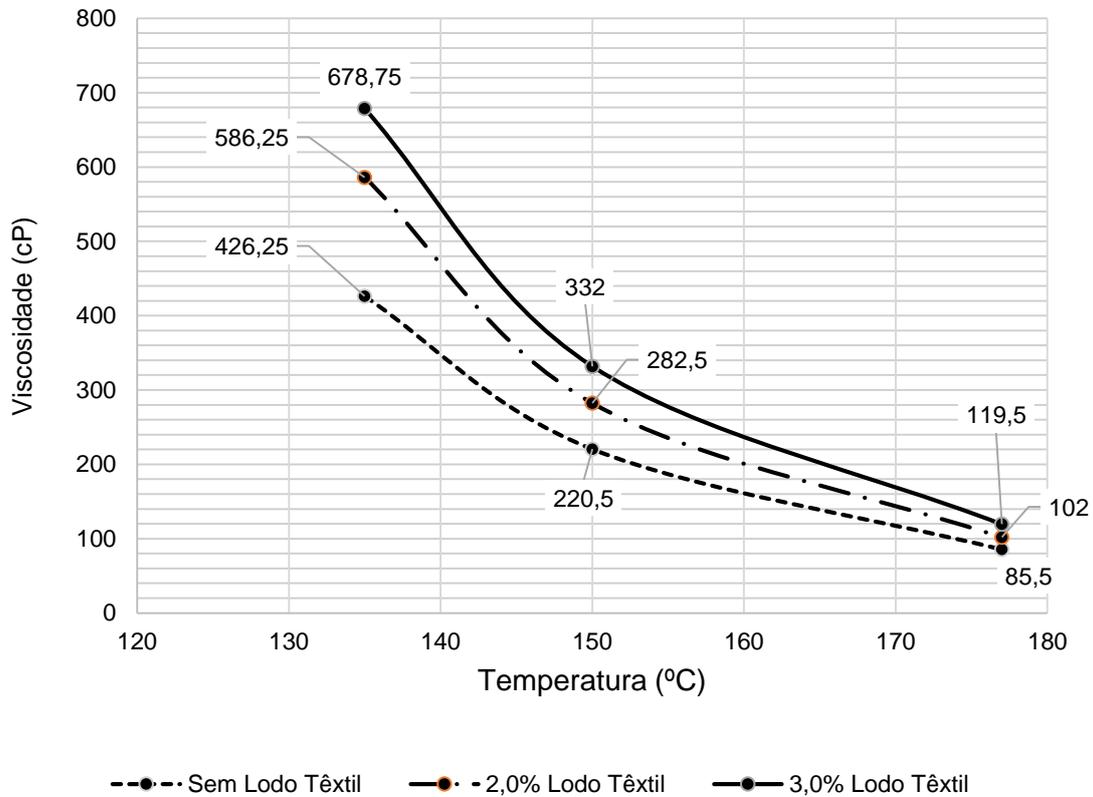
Nas misturas com lodo seco foi utilizado o CAP 50/70 convencional, sem lodo têxtil. Com o incremento das viscosidades após a adição do lodo têxtil, foi necessária a correção das temperaturas de aquecimento do ligante e compactação, apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Temperaturas de aquecimento e compactação dos ligantes modificados com lodo têxtil

Viscosidade/Teor	Sem Lodo têxtil	2,0% Lodo Têxtil	3,0% Lodo Têxtil
Aquecimento 170 cP	158 ± 3 °C	164 ± 3 °C	167 ± 3 °C
Compactação 280 cP	145 ± 2 °C	153 ± 2 °C	155 ± 2 °C

Fonte: O autor (2021).

Figura 44 - Curvas de viscosidade do CAP 50/70 padrão e modificado com 2,0% e 3,0% de lodo têxtil seco



Fonte: O autor (2021).

Martinez (2014) verificou comportamento semelhante, tanto no incremento da viscosidade, como da redução da amplitude da viscosidade entre os ligantes com o aumento da temperatura, pois as misturas tiveram a adição de diferentes tipos de lodos, de estação de tratamento de água e esgoto. Outros autores também observaram comportamentos semelhantes em suas curvas de viscosidade quando da adição de resíduo fino ao ligante (ANWAR PARVEZ *et al.*, 2014; LENG *et al.*, 2018; HU *et. al*, 2019).

Para Anwar Parvez *et al.* (2014), a inserção de resíduos modifica a viscosidade, tornando o ligante menos suscetível a mudanças térmicas. Segundo Hu *et al.* (2019), há uma correlação direta entre o aumento da porcentagem de resíduo e a viscosidade mensurada. Portanto, o lodo tornou o ligante mais viscoso, logo se fez necessário um incremento das temperaturas de usinagem e compactação, que acarreta um acréscimo do custo energético.

Quanto ao ponto de amolecimento, propriedade considerada empiricamente como a medida da temperatura na qual o asfalto aquece e apresenta uma condição

de escoamento (Bernucci *et al.*, 2008), pode-se inferir que houve um leve incremento de 3,8% e 7,6% para os teores de 2% e 3% de lodo têxtil, respectivamente. Ressalta-se que incrementos no ponto de amolecimento do ligante são benéficos por aumentar a resistência às deformações permanentes e ao afundamento de trilhas de roda nos pavimentos asfálticos.

Por fim, a inserção do lodo têxtil promoveu maior efeito sobre a ductilidade e a penetração do CAP, conferindo reduções na penetração de 11,34% e 30,66% para os teores de 2,0% e 3,0%, respectivamente. Esses resultados então em consonância com outros autores que adicionaram fíler ao ligante asfáltico (MARTINEZ, 2014; MARTINEZ, 2017; RODRIGUES, 2019). O fato de ter “enrijecido”, o ligante é positivo para uso em locais com a condição de clima quente. De modo geral, a inserção do lodo torna o ligante asfáltico mais denso, conseqüentemente modificando as propriedades discutidas anteriormente, de modo que é possível observar que o enrijecimento do ligante é proporcional à quantidade de lodo adicionado. Segundo Bianchetto *et al.* (2007), a concentração de fíler crítica é alcançada quando o mástique começa a enrijecer, a mistura se torna mais frágil e certas características desejadas, como flexibilidade e coesão, são diminuídas. Esse processo é intensificado em baixas temperaturas.

Para Plancher e Petersen (1976 apud BIANCHETTO, 2007) a presença de cargas calcárias causam captura de moléculas polares e de catalisadores que favorecem a oxidação. Essas moléculas, se livres, interagiriam com produtos resultantes da oxidação, dando origem ao aparecimento de cetonas, anidridos e semelhantes. Como resultado, a viscosidade aumentaria.

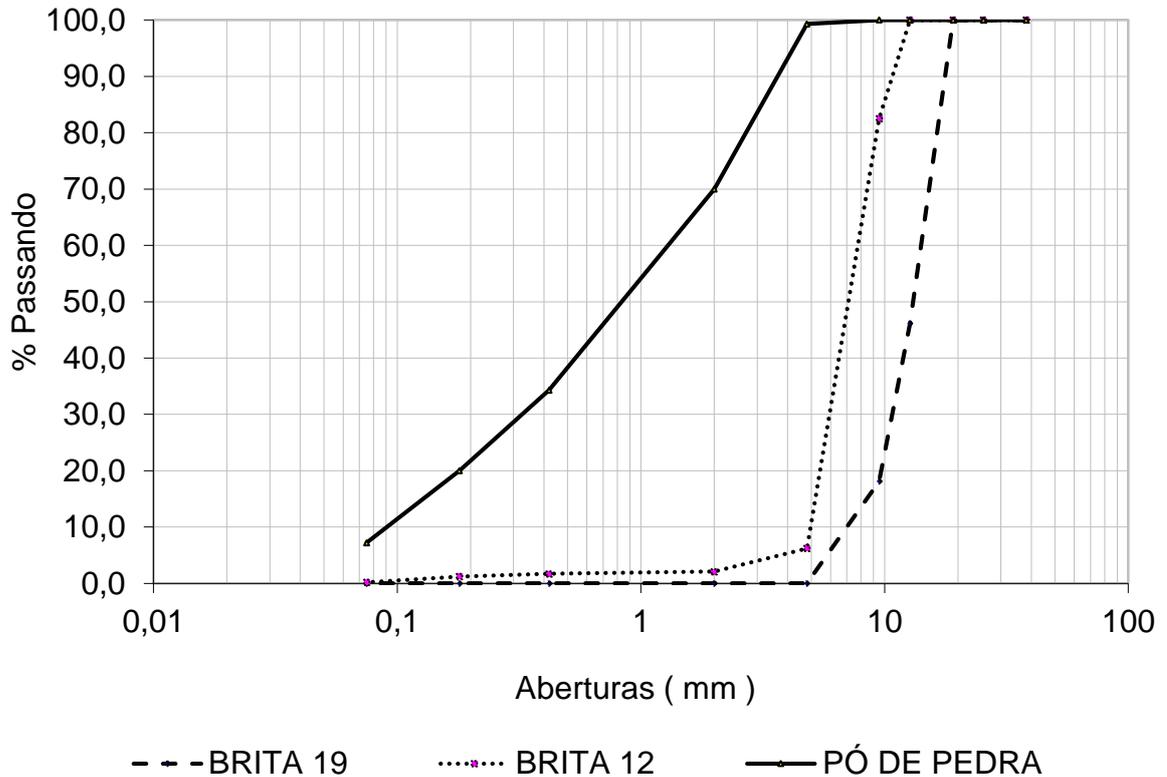
Gubler *et al.* (1999 apud BIANCHETTO, 2007) observaram um efeito físico com a presença de finos no ligante, ou seja, que pequenas partículas de enchimento impedem a difusão de oxigênio através do betume, assim sendo benéficas para reduzir o envelhecimento dos ligantes.

### **4.3 Caracterização dos agregados**

As curvas granulométricas dos agregados empregados na confecção do concreto asfáltico (CA), sendo eles, pó de pedra, brita 12 (brita  $\frac{1}{2}$ ) e brita 19 (brita  $\frac{3}{4}$ ), encontram-se na Figura 45. O pó de pedra apresentou graduação bem distribuída,

tendo frações em todas as faixas as quais se destina. Os agregados graúdos também ficaram dentro das especificações de brita,  $\frac{3}{4}$  e  $\frac{1}{2}$ , respectivamente.

Figura 45 - Composição granulométrica dos agregados



Fonte: O autor (2021).

Na Tabela 23, são apresentadas as proporções de cada mistura asfáltica avaliada, sendo a mistura de referência (0% de lodo têxtil), e as demais (1%, 2%, 3%, 4% e 5%), tendo 5,0% como o maior quantitativo de lodo têxtil possível de ser adicionado de acordo com os agregados disponíveis para que atenda à granulométrica na faixa “C” do DNIT. É válido destacar que adições maiores que 5% ultrapassariam os limites da faixa “C” de acordo com a norma DNIT 031/2006. As graduações de cada composição estão disponíveis de forma detalhada no Apêndice A.

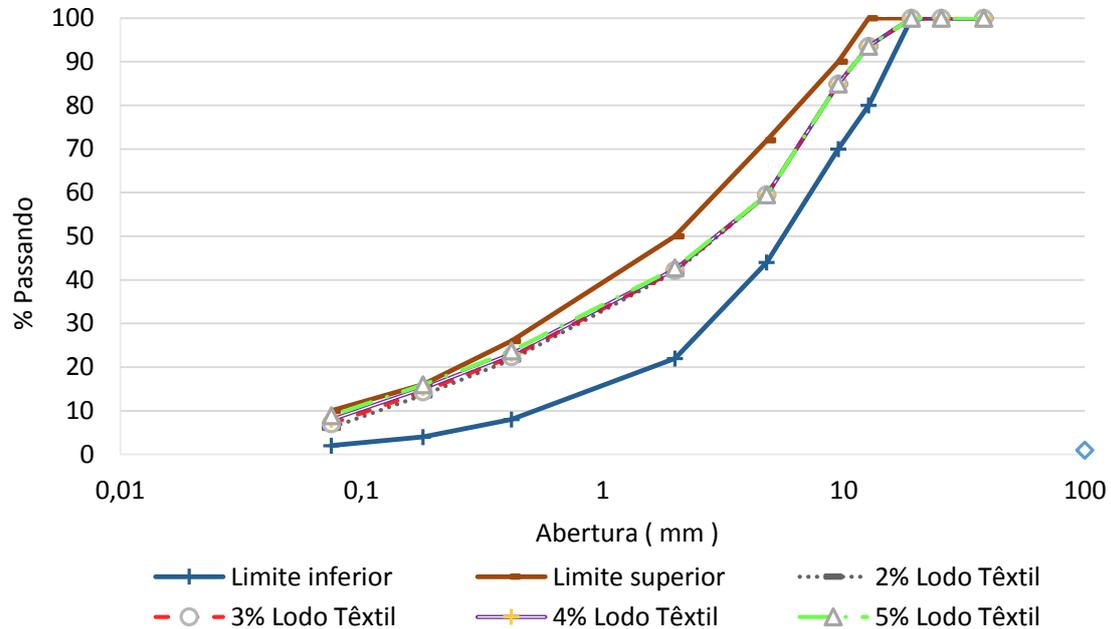
Tabela 23 - Composição granulométricas dos esqueletos de agregados e lodo têxtil seco

TEOR DE LODO (%)	BRITA 19	BRITA 12	PÓ DE PEDRA
0	15%	30%	55%
2,0	12%	30%	56%
3,0	12%	30%	55%
4,0	12%	30%	54%
5,0	12%	30%	53%

Fonte: O autor (2021).

Na Figura 46 são apresentadas as curvas granulométricas para cada esqueleto de agregados com as diversas adições de lodo têxtil avaliadas (0%, 2,0%, 3,0%, 4,0% e 5,0%), bem como os indicativos das curvas dos limites inferior e superior da faixa “C”. Conforme visto, todas as curvas apresentaram comportamento granulométrico semelhante, haja vista que a variação em termos totais é pequena quanto das diferentes adições de lodo têxtil, diferindo principalmente na fração mais fina, onde as partículas do lodo estão concentradas, assim diferenciando as curvas.

Figura 46 - Curva granulométrica, faixa “C” com diferentes teores de lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

No Apêndice B, são apresentadas as curvas granulométricas individuais de cada adição de lodo têxtil de forma detalhada, devidamente acompanhadas dos

indicativos das curvas da faixa “C” do DNIT, bem como das faixas de trabalho, máximas e mínimas.

Os resultados das caracterizações físicas realizadas nos agregados graúdos e miúdos utilizados na dosagem e na confecção dos concretos asfálticos encontram-se compilados na Tabela 24.

Tabela 24 - Caracterização física dos agregados

Ensaio	Norma de ensaio (DNIT-ME)	Unidade	Especificação	Obtido
Abrasão Los Angeles - Brita 19	035/98	%	máx 50	30
Abrasão Los Angeles - Brita 12	035/98	%	máx 50	32
Índice de forma - Brita 19	424/2020	IF	> 0,5	0,69
Índice de forma - Brita 12	424/2020	IF	> 0,5	0,70
Sanidade - Brita 19	089/94	%	máx 12	2,87
Sanidade - Brita 12	089/94	%	máx 12	2,89
Densidade real - Brita 19	081/98	g/cm <sup>3</sup>	----	2,66
Densidade real - Brita 12	081/98	g/cm <sup>3</sup>	----	2,67
Absorção - Brita 19	081/98	%	----	0,35
Absorção - Brita 12	081/98	%	----	0,53
Adesividade do agregado ao betume (CAP puro) - Brita 19	078/94	Qualitativa	Satisfatória	Satisfatória
Adesividade do agregado ao betume (CAP puro) - Brita 12	078/94	Qualitativa	Satisfatória	Satisfatória
Equivalente de areia - Pó de pedra	054/97	%	min 55%	56%
Densidade real - Pó de Pedra	084/95	g/cm <sup>3</sup>	----	2,69
Densidade real - lodo têxtil	085/94	g/cm <sup>3</sup>	----	2,20

Fonte: O autor (2021).

Os resultados de abrasão “Los Angeles” apresentaram uma perda de 30% para o agregado graúdo de  $\frac{3}{4}$  e de 32,0% para o agregado de  $\frac{1}{2}$ , sendo ambos satisfatórios por serem valores inferiores ao valor máximo de 50%, que é estabelecido na norma do DNIT 031/2006 para a fabricação de camadas de rolamento de concreto asfáltico. As sanidades de ambas as britas também foram satisfatórias para aplicação em CBUQ, ficando os valores dos seus danos em torno de 3%, bem abaixo do limite normativo máximo de 12%.

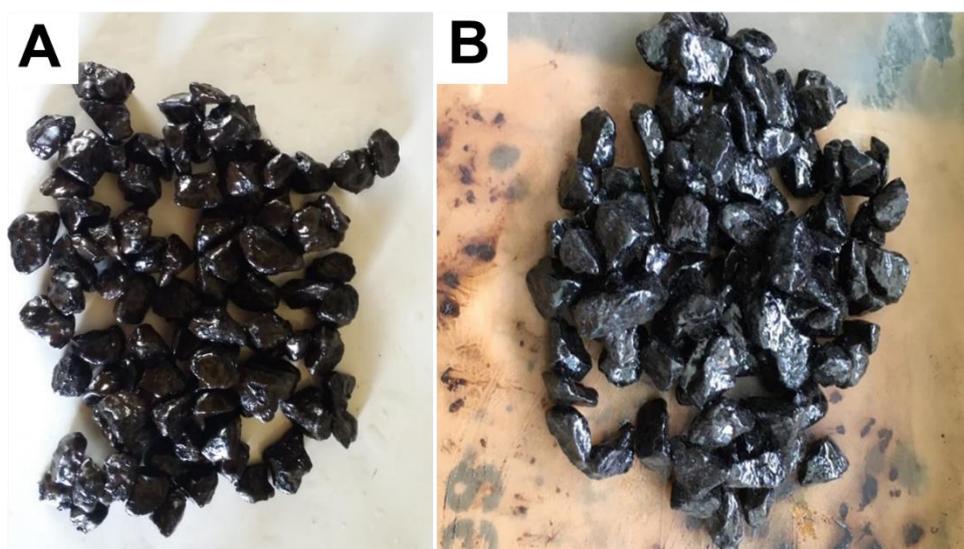
Quanto à forma das partículas, tanto a brita 19 como a brita 12 apresentaram fator de forma superior a 0,5, logo forma cúbica. A presença de partículas cúbicas irregulares indica melhor intertravamento entre os grãos de agregados após a compactação, evitando a quebra dos agregados na mistura (MARTINEZ, 2014).

Conforme pode ser visto na Tabela 24, as demais características apresentadas são condizentes com agregados graníticos britados. O lodo têxtil apresentou massa específica real de 2,20 g/cm<sup>3</sup>; este é um valor superior ao de outros lodos estudados,

por Martinez (2014) de ETE (1,389 g/cm<sup>3</sup>) e ETA (1,675 g/cm<sup>3</sup>); lodo têxtil, Leloup (2013) 1,78 g/cm<sup>3</sup> e Oliveira (2014) 1,717 g/cm<sup>3</sup>. Essa variabilidade pode ocorrer devido a variabilidade da composição química dos lodos estudados.

No ensaio de adesividade, tanto a adesividade do agregado ao betume (CAP puro) da brita 19 quanto da brita 12 foram satisfatórias, segundo o método de avaliação da norma DNIT 078/1994, dado que não se observou deslocamento das películas betuminosas, como pode ser observado na Figura 47.

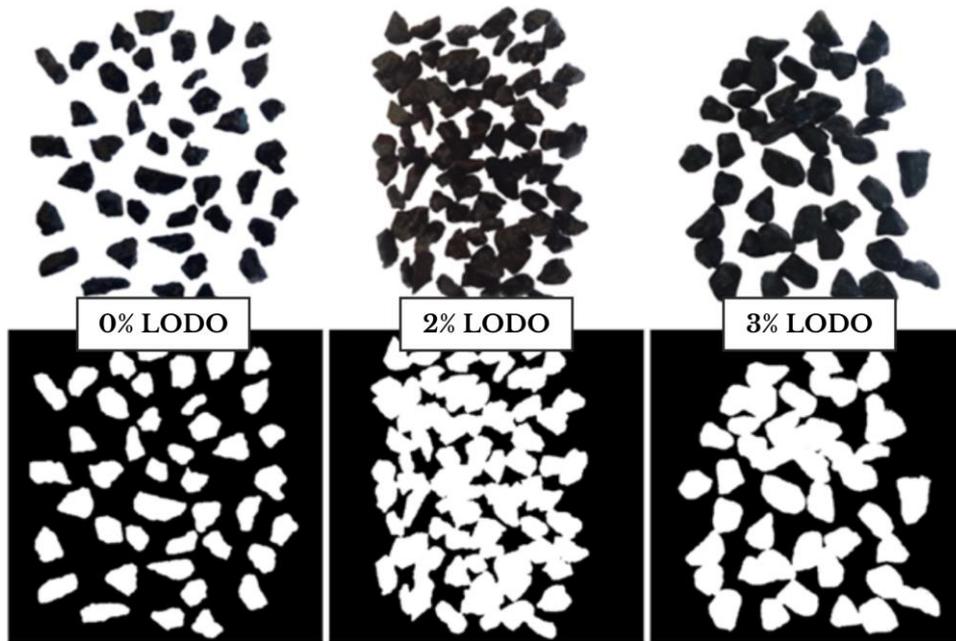
Figura 47 - Ensaio de adesividade do agregado ao ligante (CAP puro) brita 12 (A), 19 (B)



Fonte: O autor (2021).

Por meio do processamento digital de imagens, cada imagem do agregado recoberto de ligante foi analisada minuciosamente, a fim de encontrar os valores a serem utilizados na limiarização proposta por Lucas Júnior e Soares (2018), conforme exposto na Figura 48. Os resultados desse processo apontaram que a adição do lodo têxtil não ocasionou perdas de adesão e coesão entre as faces do agregado e a película de agregado, obtendo-se  $A_{PDI} = 100\%$  em cada uma das amostras. Os valores usados como limiares encontram-se na Tabela 25. Esses resultados estão em consonância com outros autores que também analisaram misturas classificadas como “satisfatórias” pelo ensaio de adesividade descrito nas normas ME DNIT 078/1994 (LUCAS JÚNIOR; SOARES, 2018).

Figura 48 - Limiarização das misturas de referência, com 2,0% de lodo seco e 3,0% de lodo seco



Fonte: O autor (2021).

Tabela 25 - Processamento digital de imagens das misturas de referência, com 2,0% de lodo seco e 3,0% de lodo seco

Teor de Lodo	0%	2,0%	3,0%
Limiares (T)	0,695   0,695	0,540   0,540	0,668   0,668
$A_{PDI}$	100%	100%	100%

Fonte: O autor (2021).

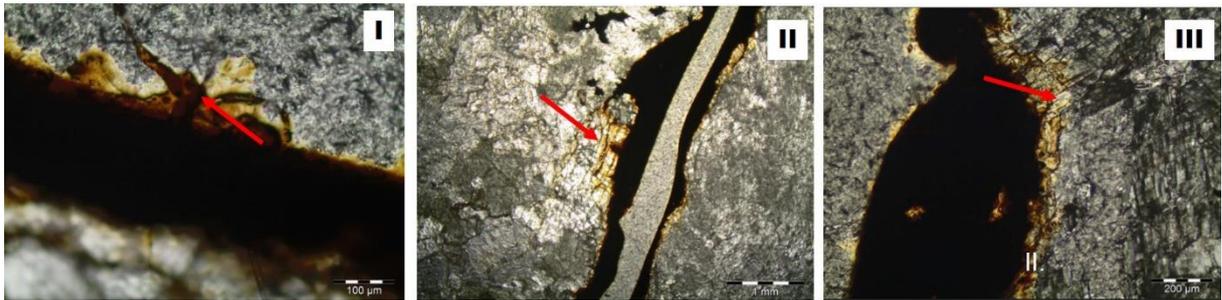
A tendência à melhoria na adesividade pode estar associada à composição química e mineralógica do lodo têxtil devido à presença prioritária de cálcio, além da presença de óxidos férricos ( $Fe_2O_3$ ). O teor de sílica ( $SiO_2$ ) presente no lodo têxtil não comprometeu a adesividade dos ligantes modificados.

A viscosidade dos ligantes modificados também está relacionada diretamente à adesividade. Em geral, ligantes mais viscosos agregam maior resistência ao deslizamento da película de betume pela umidade que os menos viscosos (MAJIDZADEH; BROVOLD, 1968; TAYLOR; KHOSLA, 1983; HICKS, 1991).

As interfaces entre ligante asfáltico e agregados podem ser vistas na Figura 49. Em (I), a mistura de referência (sem adição de lodo), em (II), a mistura com adição de 2,0% de lodo seco; e, em (III) a mistura com adição de 3,0% de lodo seco. Nas três

situações se pode notar que o espalhamento do ligante se deu por toda a superfície do agregado, ocupando, até mesmo vazios de poros menores. Esse resultado indica que o incremento da viscosidade, pela adição de partículas finas de lodo, não se mostrou prejudicial à adesividade. Ao mesmo tempo, positivamente, películas mais espessas podem contribuir para prevenir a oxidação acelerada pela incidência de luz e ar, protegendo a estrutura do dano por umidade (CHADBOURN, 2000).

Figura 49 - Interfaces da película de ligante ao agregado



Fonte: O autor (2021).

#### 4.4 Metodologia de dosagem Marshall

Os gráficos relativos aos parâmetros volumétricos da dosagem Marshall se encontram expostos no Apêndice C para cada variação do teor de lodo têxtil de 0%, 2,0%, 3,0%, 4,0%, e 5,0%, tanto para a forma úmida (lodo CAP) quanto seca (lodo seco). Variou-se o teor de ligante de 4,5% a 6,5%, com intervalos de 0,5%. Nestes gráficos são apresentados os resultados de densidade teórica e aparente, porcentagem de vazios, relação betume vazios, estabilidade e fluência para obtenção do valor ótimo de ligante asfáltico.

Todas as misturas avaliadas, tanto a de referência quanto as com adição de lodo têxtil seco e úmido, apresentaram os melhores valores dos parâmetros volumétricos para 5,5% de teor de ligante. Assim, o teor de ligante ótimo de 5,5% foi adotado para todas as misturas. Fixando o teor de ligante ótimo em 5,5%, pode-se percorrer quanto a variação dos parâmetros volumétricos levando apenas em consideração o lodo têxtil seco e úmido adicionado.

Na Tabela 26 estão compilados os parâmetros volumétricos para as misturas com adição de lodo têxtil úmido (lodo CAP) a partir do teor ótimo de ligante. Todos os

teores de adição de lodo úmido apresentaram uma relação betume vazios (RBV) satisfatória e dentro dos limites desejados.

Na Tabela 27 estão compilados os parâmetros volumétricos para as misturas com adição de lodo têxtil seco (lodo seco) a partir do teor ótimo de ligante. Na forma seca de inserção, apenas a dosagem com 2,0% de adição de lodo têxtil seco apresentou resultados dentro do aceitável para todos os parâmetros volumétricos, enquanto 3,0, 4,0 e 5,0% ficaram fora de faixa principalmente no índice de vazios. A relação betume vazios dentro dos limites tem como principal finalidade garantir que exista betume em quantidade suficiente, mas não de forma demasiada para que não ocorra a exsudação do ligante.

Tabela 26 - Parâmetros volumétricos da metodologia Marshall – lodo úmido (lodo CAP)

Teor lodo têxtil (%)	0,0%	2,0%	3,0%	4,0%	5,0%	Especificações DNIT- Faixa "C" DNIT 031/2006
Dens. teórica (kg/cm <sup>3</sup> )	2.463	2.454	2.449	2.444	2.409	-
Dens. aparente (kg/cm <sup>3</sup> )	2.370	2.378	2.376	2.372	2.336	-
RBV (%)	77,10	80,50	81,00	81,00	80,45	75 - 82
Estabilidade min. (kgf)	1.115	822	766	917	1.155	≥ 500
Fluência (mm)	3,85	4,70	4,70	4,70	4,70	2 - 4,5

Fonte: O autor (2021).

Tabela 27 - Parâmetros volumétricos da metodologia Marshall – Lodo seco

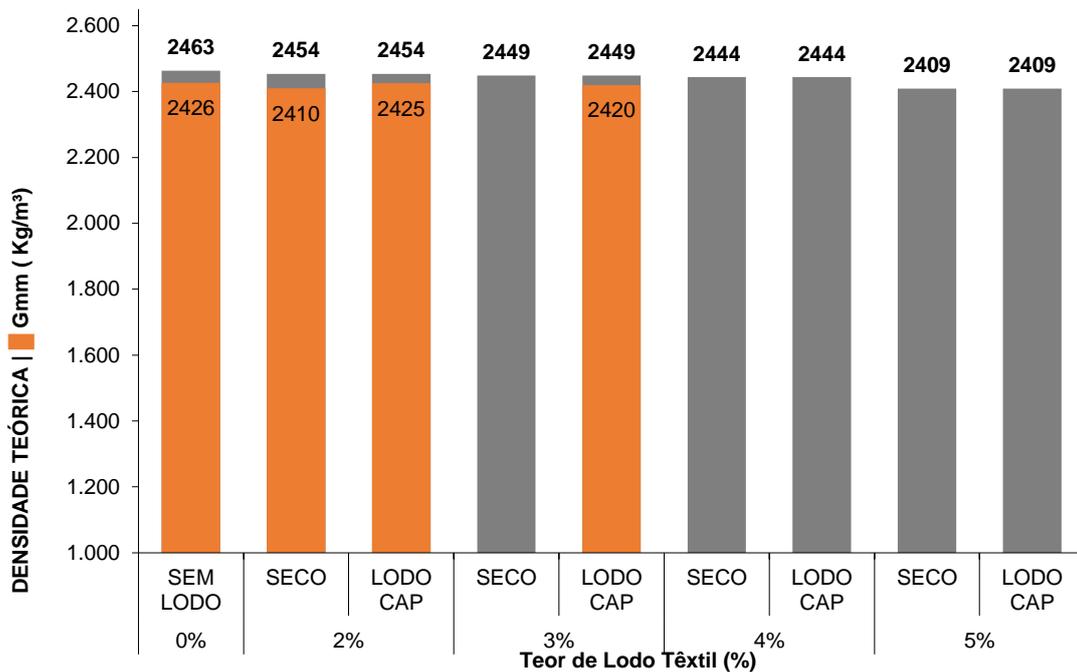
Teor lodo têxtil (%)	0,0%	2,0%	3,0%	4,0%	5,0%	Especificações DNIT- Faixa "C" DNIT 031/2006
Dens. teórica (kg/cm <sup>3</sup> )	2.463	2.454	2.449	2.444	2.409	-
Dens. aparente (kg/cm <sup>3</sup> )	2.370	2.367	2.407	2.408	2.408	-
RBV (%)	77,10	78,05	88,20	89,55	99,70	75 - 82
Estabilidade min. (kgf)	1.115	1.043	913	1.234	1.234	≥ 500
Fluência (mm)	3,85	4,00	4,40	4,30	4,30	2 - 4,5

Fonte: O autor (2021).

As densidades teóricas e as densidades relativas máximas medidas (Gmm) das misturas com lodo têxtil para as adições de 2,0%, 3,0%, 4,0% e 5,0% de lodo seco e lodo úmido (lodo CAP) podem ser vistas na Figura 50. Verifica-se que as densidades

teóricas das misturas com lodo têxtil em ambas as condições são levemente menores, cerca de 2,0% em relação às de referência, o que já era previsível, haja vista que lodo têxtil tem densidade menor que os demais agregados. Outros autores que adicionaram fíler também reportam reduções nesse parâmetro (LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016; AZZAM; AL-GHAZAWI; AL-OTOOM, 2016). Quanto à densidade relativa máxima medida (Gmm), que se encontra representada de forma sobreposta à densidade teórica na Figura 50, os valores aferidos foram muito próximos, com uma variação menor que 1,0%, margeando a constância. Esse fato é justificado pela pequena variação percentual (2,0 e 3,0 %) no teor de lodo adicionado ao sistema, bem como pelas massas específicas e granulometria que são semelhantes. Outro ponto relevante é que o agregado utilizado não tem significativa absorção de ligante, logo as duas medidas são semelhantes (DMT e Gmm).

Figura 50 - Variação da densidade teórica e Gmm nas misturas com adição de lodo têxtil

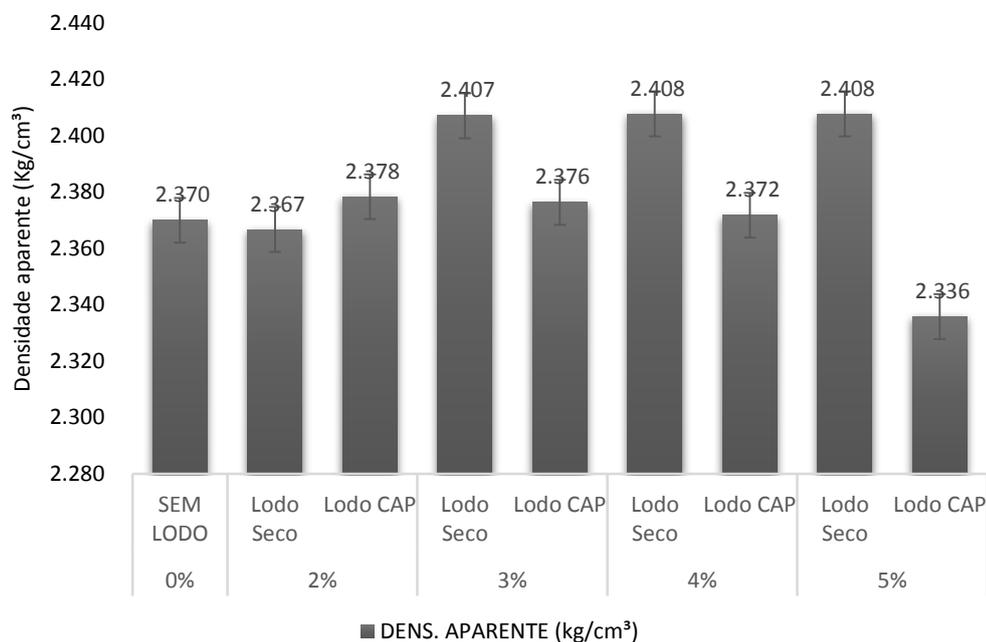


Fonte: O autor (2021).

A densidade aparente foi mantida quando da adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca. Elevando para 3,0% a 5,0% de adição de lodo têxtil foi obtido um valor superior ao de referência, porém constante entre si (Figura 51), preenchendo quase totalmente os vazios, como pode ser constatado no índice de vazios (Figura 53). Para as adições de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), ou seja, com o lodo têxtil

previamente misturado ao ligante, houve uma manutenção da densidade aparente em adições de 2,0% a 4,0%, enquanto as adições de 5,0% apresentaram uma pequena redução de 1,5% na densidade aparente. Assim, não houve variações percentuais significativas desse parâmetro, levando em consideração os teores e o método de inserção. De modo geral, percebe-se que não houve dificuldade de manter a compactação da mistura por excesso de lodo têxtil.

Figura 51 - Variação da densidade aparente nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação à mistura de referência



Fonte: O autor (2021).

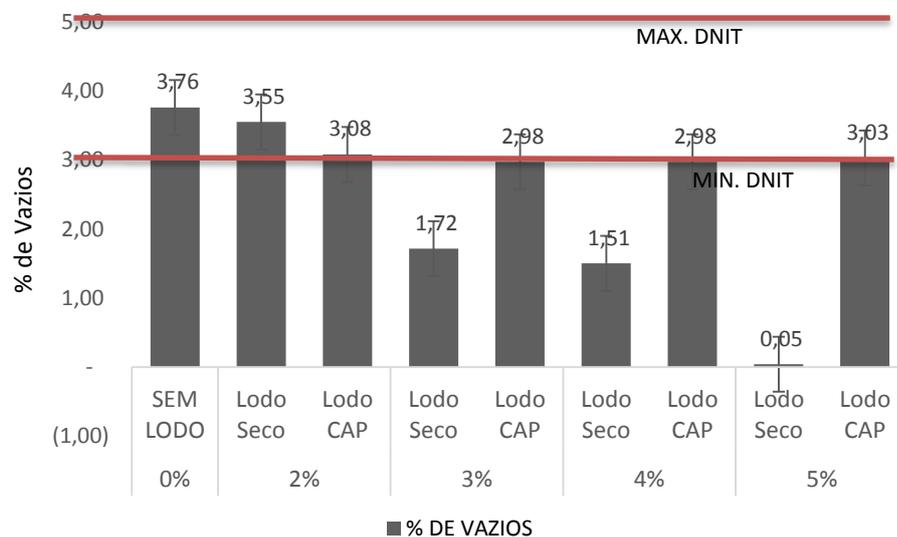
Densidades semelhantes também podem ajudar a manter os riscos de oxidação controlados, uma vez que o alto volume de vazios podem aumentar o risco de oxidação e danos causados pela água, rachaduras e ondulações (LENG *et al.*, 2018). Já se a mistura asfáltica estiver excessivamente densa (vazios baixos) pode provocar exsudação (LENG *et al.*, 2018) prejudicando, assim, as propriedades das misturas modificadas.

Quanto às porcentagens de vazios apresentadas na Figura 52, pode-se inferir que para teores acima de 2,0% de inserção de lodo têxtil na forma seca, o lodo têxtil acarreta uma redução significativa nesse parâmetro, reduzindo inclusive para valores

abaixo dos 3,0% que é o limite mínimo, sendo inclusive prejudicial ao sistema (LENG *et al.*, 2018).

Para a adição do lodo têxtil na forma úmida (LODO CAP), observou-se redução da porcentagem de vazios em relação à amostra de referência quando comparada a todos os teores de lodo adicionados; entretanto, para os teores em questão, o ligante modificado com o lodo têxtil apresentou uma constância nesse parâmetro entre as amostras contendo lodo.

Figura 52 - Variação da porcentagem de vazios nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação à mistura de referência



Fonte: O autor (2021).

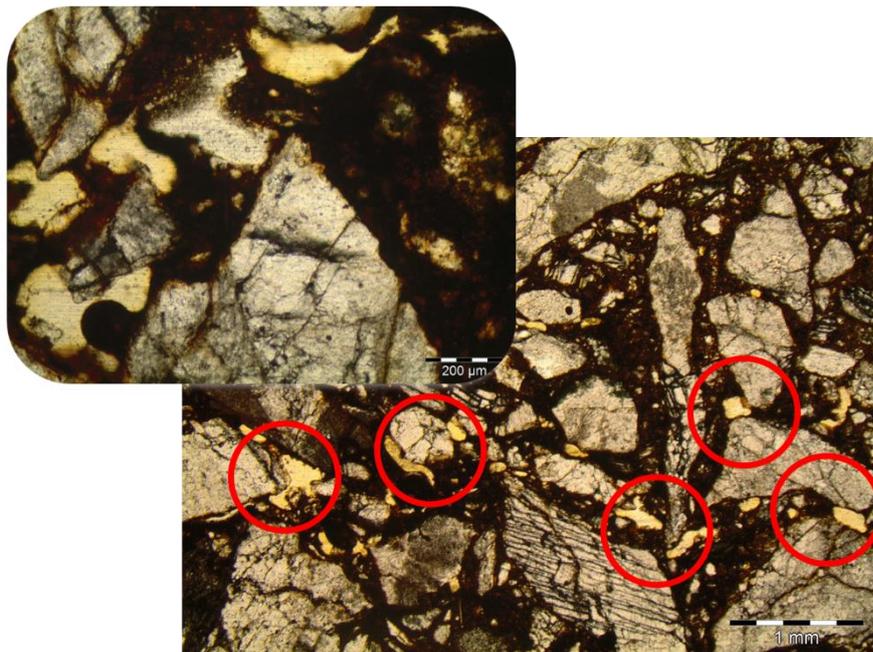
Segundo Martinez (2014), as misturas asfálticas com maior volume de vazios mostram uma maior tendência ao envelhecimento do ligante asfáltico, pois o ar que está presente nos vazios propicia uma aceleração do processo de oxidação do asfalto. Neste aspecto, pode-se destacar, com base na porcentagem de vazios, a adição de 2,0 a 5,0% de lodo CAP ou 2,0% de lodo seco pode contribuir positivamente para retardar o processo de envelhecimento no concreto asfáltico e aumentar sua durabilidade. Por outro lado, é importante observar que baixas porcentagens de vazios, como nas misturas de 3,0 a 5,0% de lodo seco, podem favorecer o defeito de deslocamento de massa (afundamento de trilha de roda).

Pode-se também observar que o volume de vazios se mantém constante independentemente do teor de lodo têxtil CAP, ao passo que diminui com o incremento da adição de lodo têxtil seco, conforme é apresentado na Figura 52. Este fato mostra

que o lodo têxtil quando adicionado previamente ao ligante, contendo partículas com diâmetros próximos a 20  $\mu\text{m}$ , essas partículas, em virtude de seu pequeno tamanho, se unem fisicamente com o ligante asfáltico, formando o mástique que envolve as partículas de agregados miúdos e graúdos (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1991). Dessa forma, uma porção de lodo não estará disponível para preencher os vazios da mistura.

Na Figura 53 é possível observar por meio de microscopia ótica petrográfica os volumes de vazios na amostra de referência. A imagem apresenta escalas de 200  $\mu\text{m}$  (esq) e 1 mm (dir), sendo possível observar que os vazios que não são preenchidos por betume possuem dimensões variadas e normalmente se formam na interface do agregado com o mástique.

Figura 53 - Volume de vazios da mistura de referência por microscopia ótica petrográfica

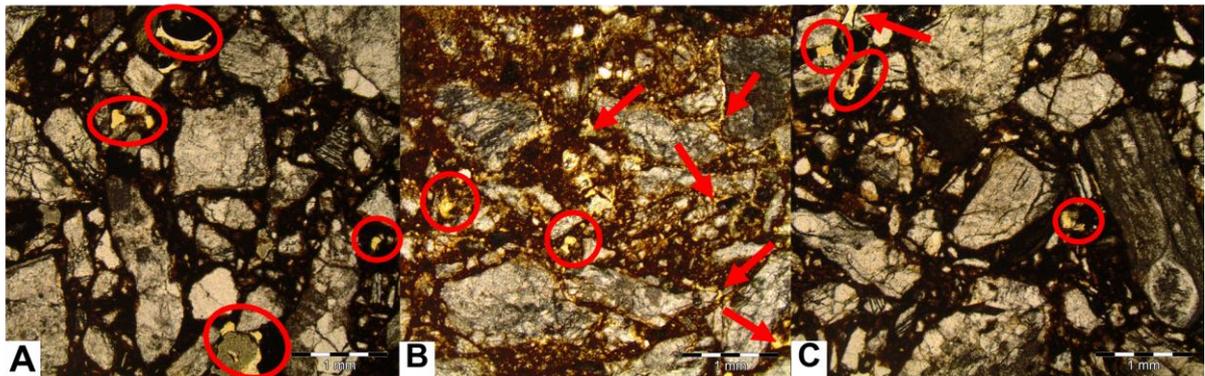


Fonte: O autor (2021).

Ainda sobre do índice de vazios, na Figura 54 A e C é possível visualizar em destaque os vazios preenchidos com ar das misturas que o lodo foi misturado previamente ao ligante na proporção de 2,0 e 3,0%, respectivamente, esses vazios têm formação e tamanhos semelhantes aos da mistura de referência apresentada na figura anterior. Entretanto, na Figura 54 B, é possível observar os vazios nas misturas com o lodo adicionado aos agregados no teor de 2,0%, embora os valores numéricos

das misturas sejam em torno de 3,0% de volume de vazios. Os vazios da mistura com lodo seco apresentam tamanhos menores, porém são mais numerosos. Isso ratifica a tendência que o lodo seco tem de preencher os vazios, enquanto o lodo CAP age prioritariamente modificando o ligante.

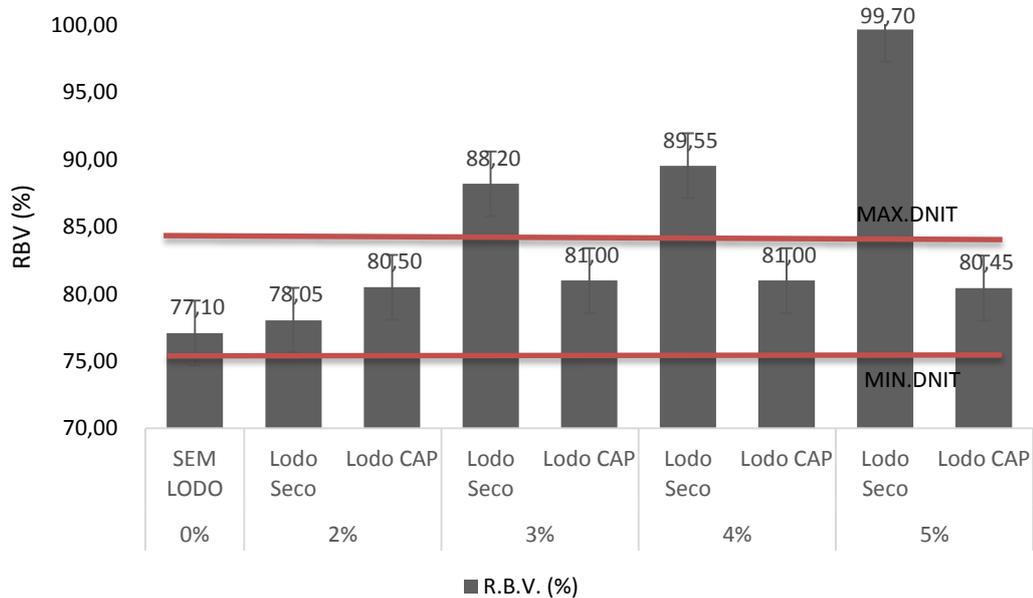
Figura 54 - Vazios preenchidos com ar nas misturas asfálticas, A-2,0% lodo CAP; B-2,0% lodo seco; C-3,0% lodo CAP



Fonte: O autor (2021).

Quanto à relação betume vazios (RBV), que compreende a quantidade de vazios preenchidos por betume, pode-se verificar na Figura 55 que as misturas de 3,0%, 4,0% e 5,0% de adição de lodo seco são as em que se observou uma redução significativa na porcentagem de vazios, conseqüentemente obtiveram também uma elevação na relação betume vazios, ultrapassando o limite de 82% estabelecido na norma DNIT ES 31/2006. Esse fato é justificado pela disponibilidade de vazios para serem ocupados pelo ligante, chegando ao ponto de 99,7% deles estarem preenchidos por ligante, na mistura que contém 5,0% de lodo têxtil seco.

Figura 55 - Variação dos vazios preenchidos com betume nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação com a mistura de referência



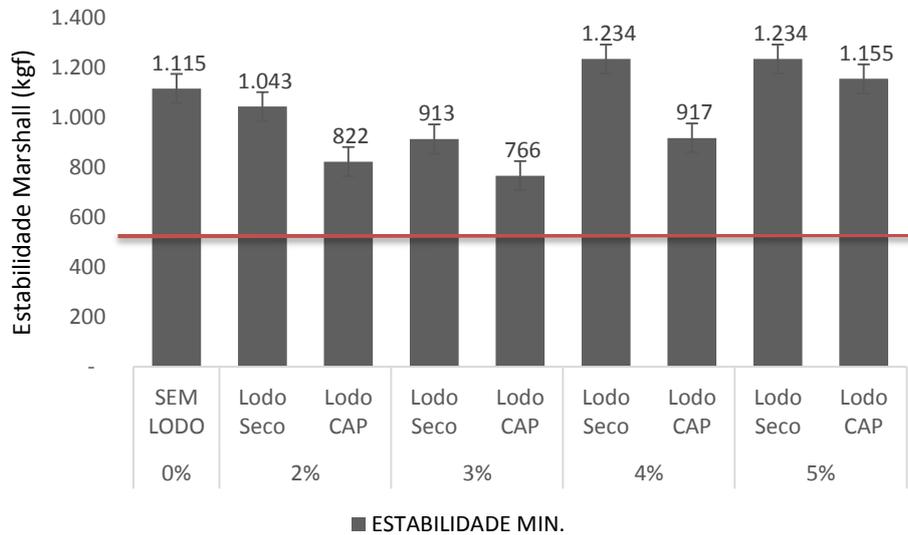
Fonte: O autor (2021).

Outros autores reportam que em alguns casos o incremento de outros fileres pode requerer maior quantidade de asfalto, em função de sua alta área superficial e capacidade de absorção de ligante em seus poros (LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016).

O gráfico com os resultados de estabilidade Marshall das misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido, em comparação com a mistura de referência, pode ser visto na Figura 56. De acordo com o exposto, verifica-se que todas as misturas com adição de lodo têxtil (2,0%, 3,0%, 4,0% e 5,0%), independentemente do tipo de inserção do lodo têxtil, apresentaram estabilidade maior que o mínimo desejável de 500 kgf. A redução da estabilidade para as misturas com 2,0% e 3,0%, de lodo seco e lodo CAP pode estar relacionada com o fato de o esqueleto mineral ter sido modificado com a adição de enchimento, alterando também a capacidade de compactação da mistura, bem como diminuindo os contatos entre as partículas de diâmetros superiores, como apresentado por Gouveia (2013) e Choi *et al.* (2019). Nas misturas com 4,0% e 5,0% de lodo, também há alteração do esqueleto mineral em virtude da adição do lodo, porém esta é superada por um outro fenômeno relacionado à área superficial elevada do lodo, mas sobretudo pelo elevado teor de finos que pode conferir uma maior rigidez, elevando em situações específicas um ganho na

estabilidade, como nas amostras de 4,0% e 5,0%, tal qual apresentado por Putra Jaya (2018) e Al-Hdabi (2016).

Figura 56 - Variação da estabilidade Marshall (kgf) nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação com a mistura de referência

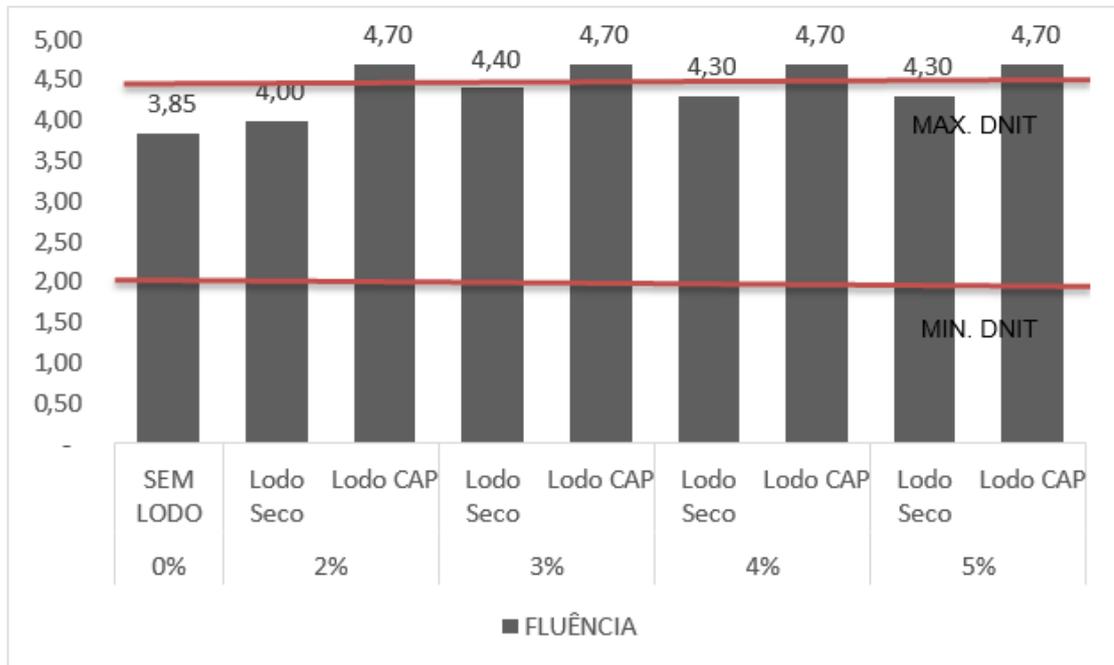


Fonte: O autor (2021).

As misturas asfálticas com adição de lodo têxtil seco e úmido apresentaram valores de fluência próximos aos da amostra de referência (Figura 57) com uma variação  $\pm 0,43$  mm. Ou seja, há um deslocamento vertical semelhante entre as amostras, quando submetidas à carga máxima, correspondendo esta medida à deformação do corpo de prova no momento da ruptura.

Destaca-se os teores de 2,0 a 5,0% de adição de lodo têxtil CAP que ultrapassaram em 0,2 mm o limite máximo clássico estabelecido que é de 4,5mm. Observando-se que, embora seja um parâmetro clássico, ele está em desuso, haja vista que na DNIT ES 31/2006, a mais recente, não se faz referência à fluência, como enfatiza Silva (2016). Este parâmetro foi inserido na pesquisa com a finalidade de possibilitar comparações com outros trabalhos publicados anteriormente, quando esse ainda era usual.

Figura 57 - Variação da fluência Marshall nas misturas com adição de lodo têxtil seco e úmido em comparação com a mistura de referência



Fonte: O autor (2021).

Assim, analisando-se todos os resultados acima de acordo com os parâmetros da metodologia de dosagem Marshall e com os parâmetros da norma DNIT ES 31/2006 para o concreto asfáltico, Faixa “C”, tem-se que o lodo têxtil pode ser usado como material constituinte em concreto asfáltico. O limite de uso é pautado em proporções de até 2,0% em relação à massa de total da mistura, quando adicionado em sua forma seca; e, em proporções de até 3,0% também em relação à massa total da mistura, quando da inserção em sua forma úmida (lodo CAP), adicionado previamente ao ligante asfáltico. A quantidade superior de lodo que é adicionada na forma úmida em relação à forma seca se dá pelo fato de uma porção do lodo se unir ao ligante como agente modificador, não estando disponível para ocupar demasiadamente os espaços do esqueleto mineral da mistura, fato constatado nas adições superiores a 2,0% de lodo seco, conforme discutido anteriormente.

Nesse cenário, de agora em diante, todas as avaliações mecânicas, microestruturais e ambientais serão restritas a esse universo, incluindo análises das misturas com as adições de 2,0% e 3,0% de lodo têxtil adicionado previamente ao ligante, e 2,0% na forma seca, adicionado o lodo têxtil aos agregados.

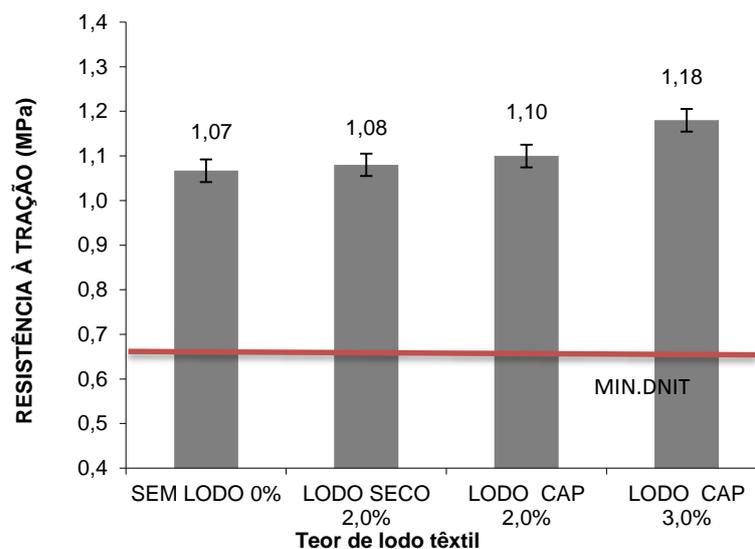
## 4.5 Ensaios para propriedades mecânicas

Os ensaios das propriedades mecânicas foram realizados para as adições de 2,0% e 3,0% de lodo têxtil adicionado previamente ao ligante (lodo CAP), e 2,0% adicionado aos agregados na sua forma seca e também para a mistura de referência sem a inclusão do lodo têxtil para fins comparativos. Todas as misturas foram executadas com o teor de ligante asfáltico de 5,5%, conforme dosagem Marshall. As tabelas com os valores resultantes dos testes estatísticos “T de Student” e “teste f” utilizados para tratamento e análise dos resultados encontram-se compiladas no Apêndice D.

### 4.5.1 Resistência à tração

Na Figura 58, são apresentados os resultados de resistência à tração para as misturas adicionadas de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência (0% de lodo têxtil). Como pode ser visto, todas as misturas analisadas atenderam ao valor mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela norma DNIT ES 31/2006.

Figura 58 - Resistência à tração das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

A adição de até 2,0% de lodo têxtil não influencia consideravelmente na resistência à tração nas misturas asfálticas avaliadas, independentemente da forma de inserção ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras), conforme pode ser visto na Tabela D1 do Apêndice D. Já a mistura com 3,0% de lodo têxtil via inserção úmida (lodo CAP) aponta um leve incremento de 10% na resistência à tração média; entretanto, estatisticamente ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Apêndice D, Tabela D1) todos os traços são equivalentes entre si.

Assim, a incorporação de lodo têxtil não apresentou efeitos deletérios na resistência à tração dos CBUQs avaliados, garantindo a manutenção da capacidade estrutural da mistura após a incorporação de até 2,0% do lodo seco e 3,0% do lodo via inserção úmida (lodo CAP).

O incremento, ou pelo menos a manutenção da resistência à tração nos asfaltos modificados com lodo têxtil, comparativamente à mistura de referência, é importante para se inferir que a presença do lodo têxtil não irá piorar o desempenho, assim como já relatado por Skaf *et al.* (2016) na adição de outros fíleres ao revestimento.

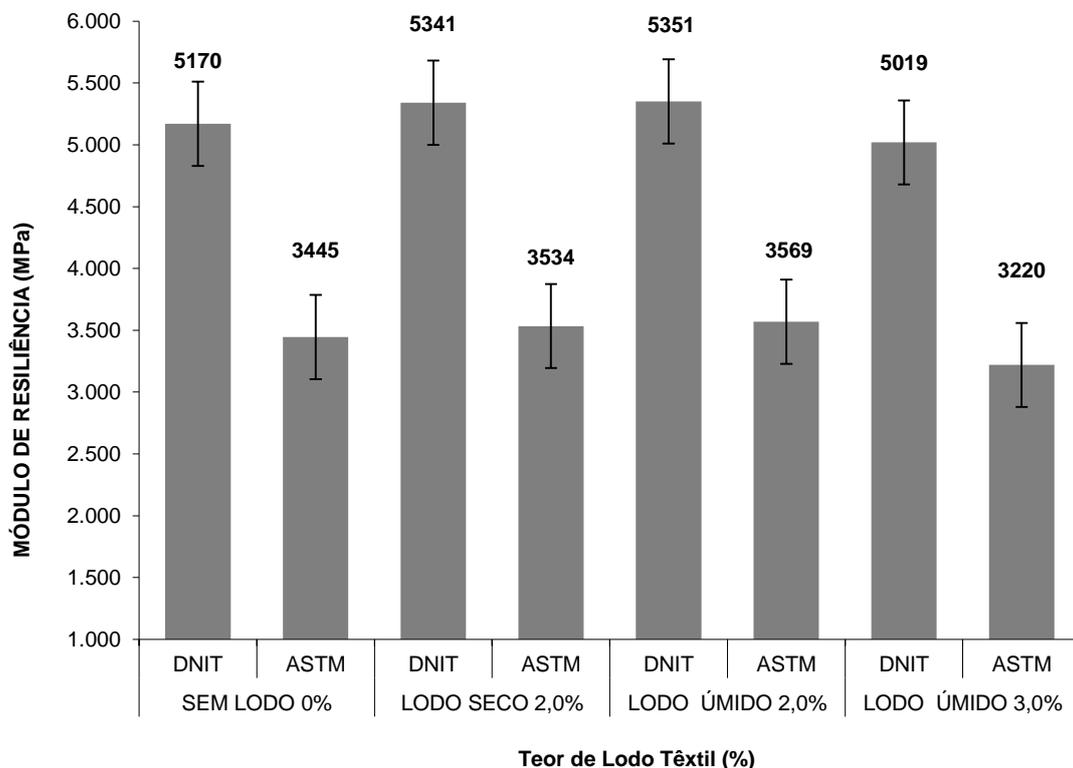
Sung Do, Hee Mun e Suk Keun (2008) e Arabani, Babamohammadi e Azarhoosh (2015) também obtiveram resistências à tração similares a esta ordem de grandeza para temperaturas de ensaio em torno de 25°C. Em geral, a literatura corrobora que a presença de materiais que atuam como fíler podem manter ou aumentar a resistência à tração dos concretos asfálticos (AHMED; OTHMAN; MAHMOUD, 2006; AKBULUT *et al.*, 2012; MODARRES; RAHMANZADEH, 2014; ARABANI; BABAMOHAMMADI; AZARHOOSH 2015; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016).

#### 4.5.2 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é a variável mais importante para o projeto mecânico de estruturas de pavimentos flexíveis. É a medida da resposta do pavimento em forma de tensão dinâmica e deformações correspondentes (RONGALI *et al.*, 2013). A análise das respostas do módulo de resiliência permite determinar a rigidez da mistura, com base na relação entre a repetição da tensão desvio e as deformações recuperáveis.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência lodo têxtil, estão apresentados na Figura 59. Como previamente descrito na metodologia experimental, ratifica-se que os ensaios de módulo de resiliência foram realizados com 10% da força de ruptura à tração, a 25°C, estando portanto entre 5% e 25% da resistência à tração por compressão diametral média, como é recomendado em norma DNIT ME 135/2018; essa carga também foi adotada para a realização da ASTM D7369 – 20. De modo geral, os valores de módulo de resiliência estão de acordo com o encontrado por outros autores (AZZAM; AL-GHAZAWI, 2015; RONGALI *et al.*, 2013; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016).

Figura 59 - Módulo de resiliência das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

Levando-se em consideração as barras de erro com base no desvio-padrão, pode-se notar que, de modo geral, estatisticamente, não houve efeitos prejudiciais na

rigidez dos CBUQs avaliados quando há inclusão do lodo têxtil nas proporções de 2,0%, independentemente da forma de inserção ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D2 e Tabela D3, Apêndice D). Tanto para a norma brasileira, quanto para a norma americana, os resultados seguiram a mesma tendência. Já para adição de 3,0% de lodo via inserção úmida (lodo CAP), estatisticamente, houve decréscimo nesse parâmetro tanto na norma brasileira quanto na norma americana, se comparado com as amostras de 2,0% lodo CAP ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, 3 amostras, Tabela D2 e Tabela D3, Apêndice D). Contudo, mesmo com a confirmação de médias pelo tratamento estatístico, as diferentes amostras apresentaram valores médios muito semelhantes.

Possivelmente, a maior quantidade de finos presentes no lodo têxtil proporcionou um aumento na rigidez do sistema, pois sua fração mais fina se une ao ligante (LIAO *et al.*, 2013; (MODARRES; RAHMANZADEH, 2014; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016). Além disso, uma possível influência para o aumento da rigidez é também o incremento na qualidade e interação do ligante ao agregado (MODARRES; RAHMANZADEH, 2014).

Outros autores têm relatado tendência ao aumento do módulo de resiliência quando há o uso de outros fíleres nas misturas asfálticas comparativamente às misturas de referência, como o xisto betuminoso, o pó de carvão, as cinzas volantes e o cimento. Geralmente, esse incremento é relatado como sendo diretamente proporcional à quantidade de fíler no sistema (RONGALI *et al.*, 2013; MODARRES; RAHMANZADEH, 2014; AZZAM; AL-GHAZAWI, 2015; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016, respectivamente). Entretanto, Gouveia (2013) relata que o excesso de finos pode diminuir os contatos entre as partículas de diâmetros superiores, reduzindo a resistência.

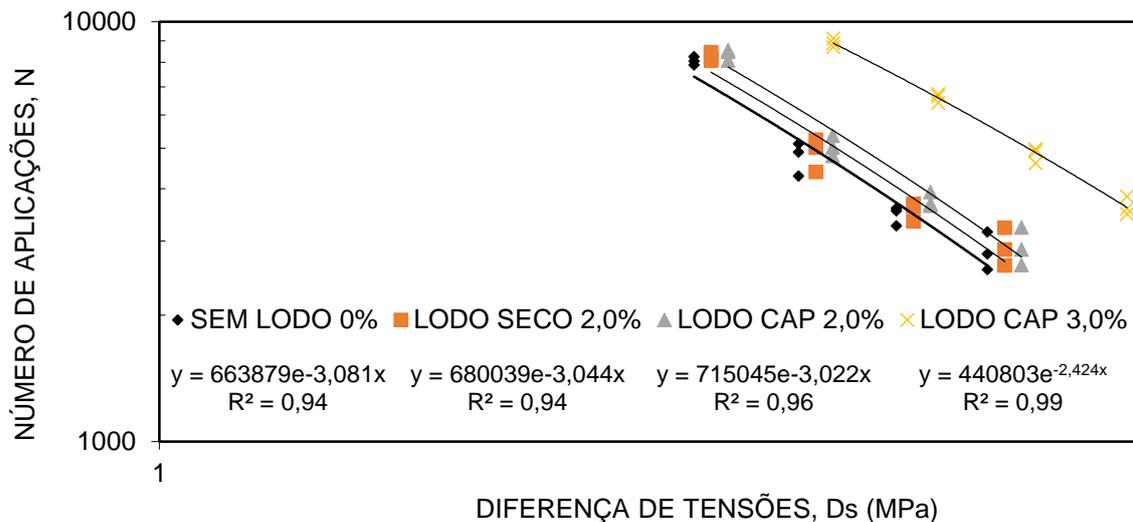
Ressalta-se, ainda, que módulos de resiliência elevados não necessariamente são positivos para as misturas asfálticas, pois isso pode prejudicar sua flexibilidade, que é uma das características procuradas nesse tipo de revestimento; salvo em misturas dosadas para terem propositalmente módulos elevados com a finalidade de ser compatível com a estrutura completa do pavimento no qual serão aplicadas.

#### 4.5.3 Resistência à fadiga

Os resultados do ensaio de fadiga com 32,5%, 35%, 37,5% e 40% da RT, respeitada a força máxima de 4600 N suportada pela prensa UTM utilizada para a realização do ensaio tanto para as misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência. O resultado deste ensaio é dado por meio de modelos teóricos, sendo eles o modelo de Número de Ciclos (N) x Diferença de Tensões, cujo resultado está ilustrado no gráfico da Figura 60, e o modelo de Número de Ciclos x Deformação Resiliente, que é ilustrado no gráfico da Figura 61.

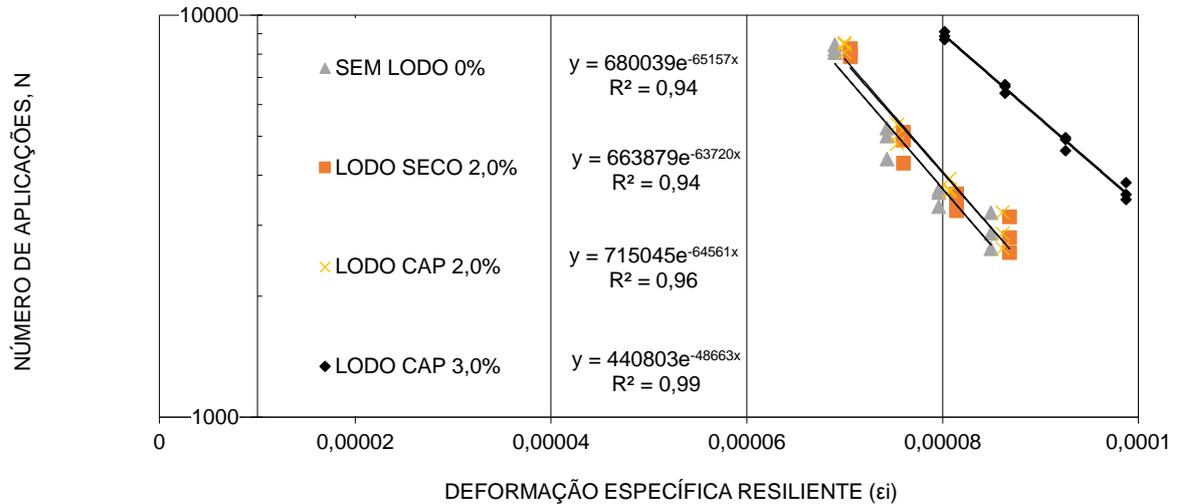
Todas as misturas, com e sem lodo têxtil, em ambos os tipos de inserção, foram submetidas a cargas com ordem de grandeza (3440~4600 N), uma vez que a resistência à tração de todas as amostras foi semelhante.

Figura 60 - Modelo de fadiga de N<sup>o</sup> de ciclos X diferença de tensões



Fonte: O autor (2021).

Figura 61 - Modelo de fadiga de N° de ciclos X deformação resiliente



Fonte: O autor (2021).

Conforme curva do número de ciclos versus diferença de tensões (Figura 60), todas as misturas contendo lodo têxtil avaliadas, independentemente do tipo de inserção, apresentaram uma tendência de incremento na vida de fadiga da mistura. Se comparados à mistura com 0% de lodo têxtil, o número de ciclos até a falha obteve uma ligeira melhora de até 3,6% em números absolutos, com relação à adição de lodo têxtil de 2,0%, independentemente da forma de inserção; porém, sendo, ainda, as médias estatisticamente equivalentes entre si ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D5 a Tabela D8, Apêndice D). Já a mistura com adição de lodo têxtil em 3,0% na forma úmida (lodo CAP) obteve significativa melhora, sendo a mesma estatisticamente considerável ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D5 a Tabela D8, Apêndice D), chegando a um incremento máximo de 38,3% na resistência à fadiga quando submetido a uma carga cíclica de 35% da resistência de tração, este que se apresentou como o ponto de maior amplitude da diferença.

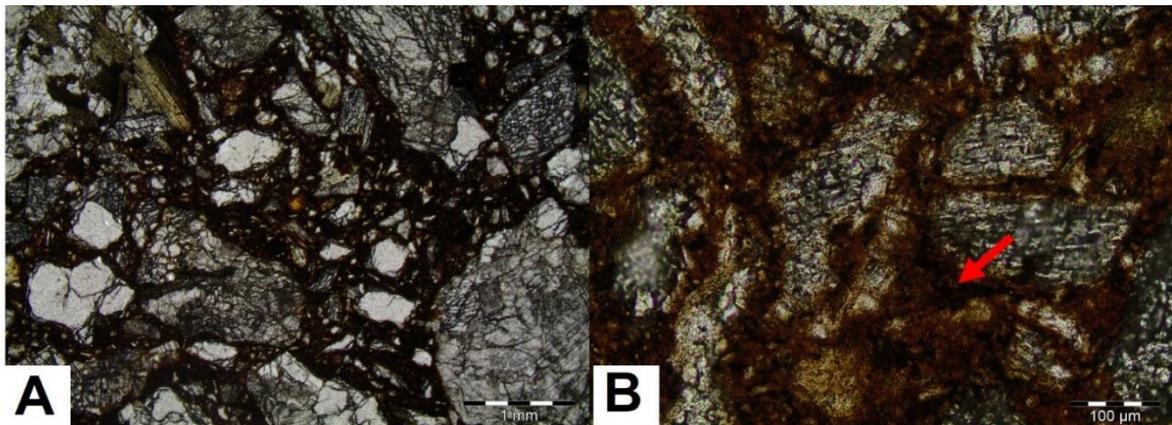
Os resultados estão em concordância com outros autores que avaliaram a adição de fíleres alternativos comparativamente à uma amostra de referência, de forma que a presença dos mais diversos tipos de fíleres, de modo geral, é relatada por aumentar a resistência à fadiga das misturas (SUNG DO; HEE MUN; SUK KEUN, 2008; CHEN *et al.*, 2011; YILMAZ; KÖK; KULOĞLU, 2011; XIE *et al.*, 2012; CHANDRA; CHOUDHARY, 2013; LIAO; AIREY; CHEN, 2013; NWAObakata; AGWUNWAMBA, 2014; ARABANI *et al.*, 2015; MODARRES *et al.*, 2015).

É válido inferir que este tipo de ensaio tende a apontar maior vida de fadiga para misturas com maior rigidez.

As análises da fadiga foram limitadas porque a faixa de força adotada aferiu pontos próximos e com carga percentual elevada, oferecendo assim um entendimento incompleto do fenômeno. Portanto, recomenda-se para pesquisas posteriores, a adoção de pontos com forças espaçadas dentro da faixa de 5 – 40% da RT.

Na Figura 62 - A, é possível observar, numa escala de 1 mm, uma tendência cúbica de arestas afiladas dos agregados, além de um contato direto de grãos de tamanhos maiores, o que indica a possibilidade um bom intertravamento dos agregados minerais da amostra com 3,0% de lodo CAP, além da não formação de grumos de lodo, o que demonstra uma completa incorporação do ligante ao lodo têxtil, que confere uma maior rigidez, e pode ser visto na Figura 62 - B em escala de 100  $\mu\text{m}$ .

Figura 62 - Microscopia ótica do CBUQ com 3,0% de lodo têxtil CAP



Fonte: O autor (2021)

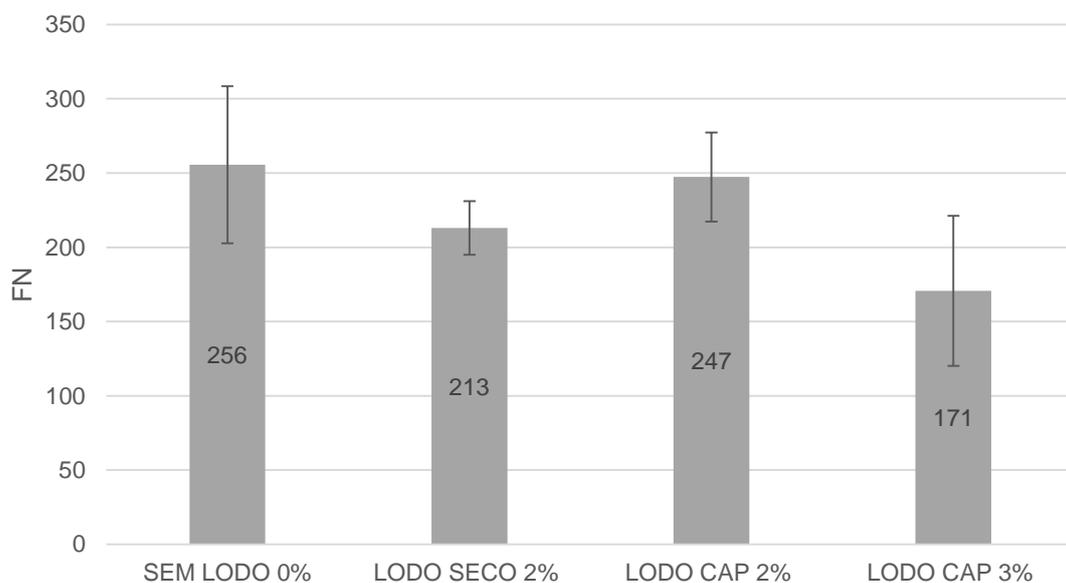
Outro ponto de influência positiva é o fato de as misturas com lodo têxtil tenderem a apresentar uma maior adesividade entre o ligante e o agregado, o que pode ter contribuído para uma melhor resistência à propagação de trincas sob repetição de cargas (XIE *et al.*, 2012). Arabani *et al.* (2015) relatam que existe uma reação química entre a mistura asfáltica fina ou o mástique e a superfície do agregado graúdo, fazendo com que se tenha uma adesão química, além de um reforço não só químico, mas físico entre as partículas de fíler e o asfalto, aumentando as propriedades contra a fadiga do mástique físico, por intertravamento (LIAO; AIREY;

CHEN, 2013). Likitlersuang e Chompoorat (2016) ratificam esse fenômeno concluindo que há interações entre o fíler e outros materiais constituintes do concreto asfáltico, o que contribui para a performance da mistura, sobretudo pela presença dos óxidos de cálcio, igualmente notada nos estudos com adição da cal (NÚÑEZ *et al.* 2007; GRANICH, 2010). Segundo Granich (2010), além do trincamento por envelhecimento, a cal reduz o trincamento por fadiga, pois, quando em contato com as moléculas polarizadas do ligante asfáltico, o volume efetivo das partículas de cal aumenta e dessa forma desvia as microfissuras causadoras do trincamento por fadiga.

#### 4.5.4 Deformação permanente (*Flow number*)

Os resultados do ensaio de *flow number* das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência, podem ser vistos na Figura 63. Pode-se inferir estatisticamente que a adição de lodo têxtil não trouxe prejuízo à capacidade resistiva quanto às deformações permanentes se comparado com a amostra de referência sem lodo ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D9, Apêndice D).

Figura 63 - Resultados do ensaio de *flow number* das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência



Fonte: O autor (2021).

Quanto aos resultados numéricos (Figura 63), estão em consonância com os resultados apresentados por Barboza Júnior *et al.* (2018) com misturas da faixa “C” e ligante 50/70 contendo a cal como fíler. Bastos (2016) considera que FNs inferiores a 100 resistem apenas a um tráfego leve ( $< 3 \times 10^6$ ); acima de 100, para um tráfego médio (entre  $3 \times 10^6$  e  $1 \times 10^7$ ); superior a 300, para um tráfego pesado (entre  $1 \times 10^7$  e  $3 \times 10^7$ ); e acima de 1000, para um tráfego extremamente pesado ( $> 3 \times 10^7$ ). Diante disso, as misturas contendo lodo têxtil entre 2,0% e 3,0% de sua composição, independente da forma de inserção ser seca junto aos agregados ou úmida no CAP, são recomendados para vias com fluxo médio de veículos, sem prejuízo às propriedades relativas à deformação permanente.

Joliet e Malot (2000) ratificam que a deformação permanente nas misturas asfálticas é resultante da ocorrência conjunta entre a deformação plástica do agregado pétreo e da deformação viscosa do ligante asfáltico. Ambos são protagonistas no comportamento mecânico da mistura asfáltica. O agregado, por razão das forças de fricção internas entre suas partículas, e o ligante, devido à consequência de sua consistência e reologia. Embora a inclusão do lodo têxtil prioritariamente seco componha o esqueleto mineral e simultaneamente o lodo CAP modifique as propriedades do ligante, as proporções estudadas não foram suficientes para obtenção de uma diferença no *Flow Number* (FN) de forma significativa estatisticamente ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D9, Apêndice D).

Bastos (2016) observou que há uma influência direta das propriedades de forma e da granulometria dos agregados no comportamento mecânico das misturas asfálticas, especialmente no *Flow Number* (FN). Essa variação não foi observada nas amostras, pois não houve uma mudança significativa nas proporções do esqueleto mineral da mistura e, conseqüentemente, na granulometria e nas densidades relativas máximas medidas (Gmm) das misturas que pudessem vir a provocar mudanças na deformação permanente, uma vez que os agregados têm as mesmas origem e granulometria para todas as amostras.

Para Bernucci *et al.* (2008), a quantidade de ligante na dosagem está entre os principais agentes causadores da deformação permanente, além da granulometria. Nesse caso, não houve influência, uma vez que o teor de ligante foi de 5,5% para todas as amostras (0%, 2,0% lodo seco, 2,0 e 3,0% lodo CAP). Nascimento (2008) reitera que a viscosidade é um importante fator com respeito à deformação permanente, pois ligantes menos viscosos tornam as misturas menos rígidas e mais

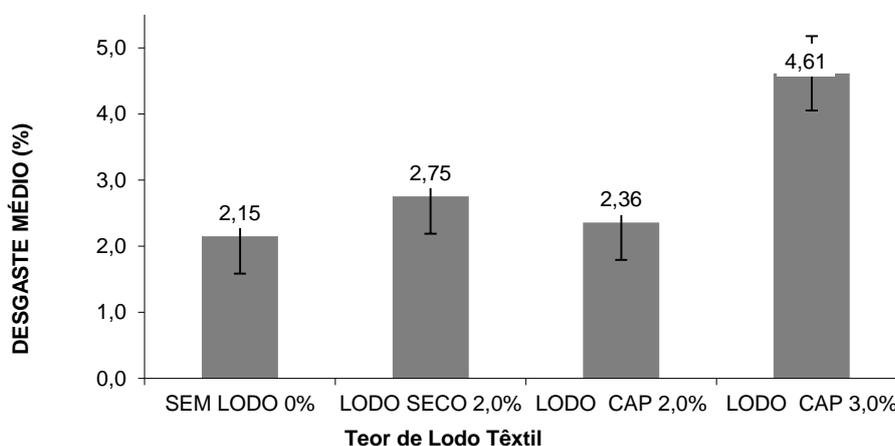
suscetíveis a sofrer deformações permanentes. No entanto, mesmo com incremento da viscosidade notada nos ligantes modificados com lodo têxtil, essa alteração não foi suficiente para promover mudanças significativas no tocante à deformação permanente ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D9, Apêndice D).

#### 4.5.5 Desgaste via ensaio Cântabro

Os resultados do ensaio de desgaste por abrasão de misturas com adição de lodo têxtil foram satisfatórios, quando comparados aos que contêm fresado reciclado (CENTOFANTE *et al.*, 2018); lodo de ETA (MARTINEZ, 2014); cal, resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais, escória moída (GOTTARDI, 2015) como pode ser visualizado na

Figura 64, uma vez que não há parâmetro normativo para misturas densas. Observando as barras de erros, percebe-se que adições até 2,0% de lodo têxtil não prejudicou a resistência ao desgaste por abrasão, sendo estaticamente equivalente à amostra de referência amostra SEM lodo têxtil ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D4, Apêndice D). Na adição de 3,0% de lodo têxtil CAP, o desgaste praticamente dobrou, tendo uma diferença significativa das outras amostras  $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras, Tabela D4, Apêndice D); entretanto, ainda permaneceu com valores inferiores aos valores comuns reportados por (MARTINEZ, 2014; GOTTARDI, 2015; CENTOFANTE *et al.*, 2018).

Figura 64 - Desgaste médio do ensaio Cântabro das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência.



Fonte: O autor (2021).

Este desgaste superior identificado no lodo CAP 3,0% pode estar relacionado ao mástique localizado e aglomerado nas extremidades dos corpos de prova (Figura 65) onde está indicada a região do corpo de prova de 3,0 de lodo CAP onde houve a maior parcela do desgaste. Martinez (2014) ao adicionar aproximadamente 1,0% lodo de ETE também apresentou um desgaste maior pela via úmida do que pela via seca, com a mesma característica geométrica da amostra de 3,0 de lodo CAP. Outros autores reportam diminuição da resistência ao desgaste por abrasão de misturas asfálticas com o incremento da incorporação de resíduos, fresado reciclado e resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (CENTOFANTE *et al.*, 2018; GOTTARDI, 2015), respectivamente.

Figura 65 - Corpos de prova após o desgaste no ensaio Cântabro, seta no 3,0% lodo CAP



Fonte: O autor (2021).

#### **4.6 Avaliação da durabilidade e caráter ambiental**

A seguir são explorados os resultados das avaliações ambientais e de durabilidade, que estão agrupados por técnica empregada análises.

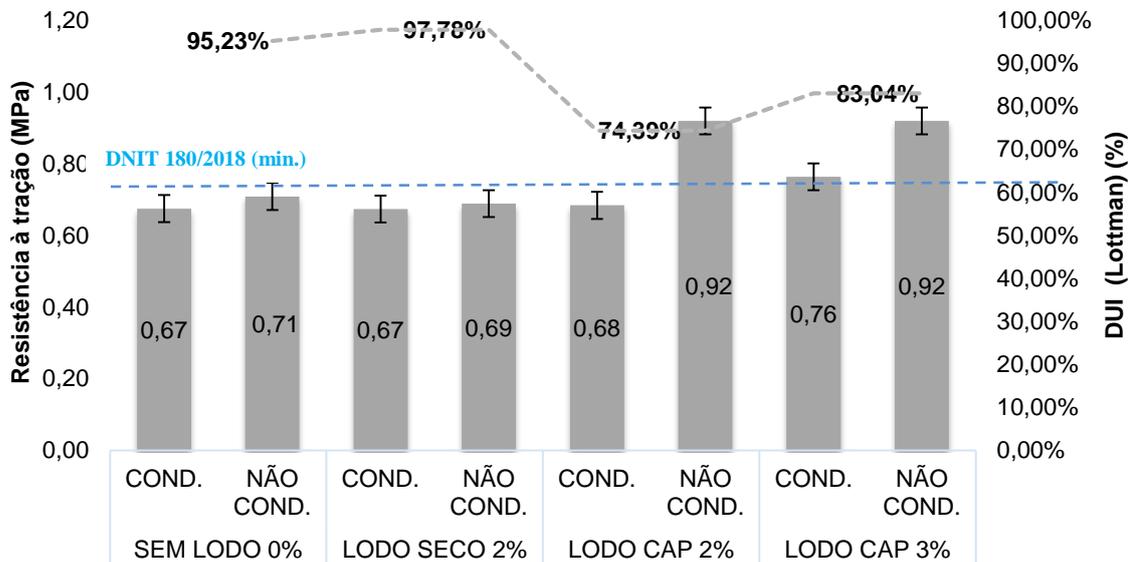
##### **4.6.1 Resistência ao dano por umidade induzida**

De modo geral, há relatos que as amostras com adição de finos apresentam um bom desempenho como materiais contribuintes da adesividade. Normalmente, a presença de fíler é reportada por aumentar a adesividade do ligante com o agregado (MODARRES *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2012; ARABANI *et al.*, 2015; LIAO; AIREY; CHEN, 2013; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016) e, conseqüentemente, são também reportadas melhorias nessas propriedades em concretos asfálticos com fíler (MODARRES *et al.*, 2015; SUNG DO; HEE MUN; SUK KEUN, 2008; AL-HDABI, 2016; LIKITLERSUANG; CHOMPOORAT, 2016; NASSAR *et al.*, 2016). Ressalta-se que essa melhoria não está relacionada somente ao tamanho dos grãos, mas também a sua composição química, de forma que os materiais que apresentam óxidos de cálcio e de ferro apresentam melhoria na adesividade e, conseqüentemente, melhoria no dano por umidade induzida (DUI). No caso do lodo têxtil a imidazolina detectada também tende a melhorar a adesividade do ligante ao agregado, sendo um produto que pode estar presente em dopes, porém é possível que a quantidade não seja significativa.

A mistura de referência sem lodo têxtil apresentou uma diferença entre corpos de prova condicionados e os não condicionados de 95%; já os que tiveram adição de lodo têxtil de 2,0% na forma seca obtiveram um incremento nessa comparação, chegando a 98%, fato que pode ser atribuído aos pontos de contato gerados entre o material fíler e os grãos dos agregados graúdos e miúdos, uma vez que a susceptibilidade à umidade é altamente dependente da adesão betume-agregado (FOROUTAN MIRHOSSEINI *et al.*, 2016). Além disso, há estudos que mostram que se o fíler é hidrofóbico, esse potencial de proteção é ainda mais potencializado (CHEN *et al.*, 2011) Essa característica é presente no lodo em virtude da presença do pH básico, uma vez que agregados mais básicos têm características hidrofóbicas. A razão para isso tem sido atribuída a diferentes polaridades na superfície dos dois materiais (KIGGUNDU; ROBERTS, 1988; HICKS, 1991 apud LUCAS JÚNIOR, 2018).

As amostras de inserção na forma úmida (2,0% e 3,0% de lodo CAP) apresentaram um decréscimo na resistência ao dano por umidade induzida, atingindo 74% e 83% para 2,0% e 3,0% de adição de lodo CAP, respectivamente. Todas as misturas (0%, 2,0% lodo seco, 2,0 e 3,0% lodo CAP) tiveram desempenho superior a 70% conforme preconizado na norma DNIT ME 180 (2018). Além dos valores percentuais (dir.), os valores absolutos da resistência à tração (esq.) podem ser visualizados na Figura 66.

Figura 66 - Resistência ao dano por umidade induzida das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência



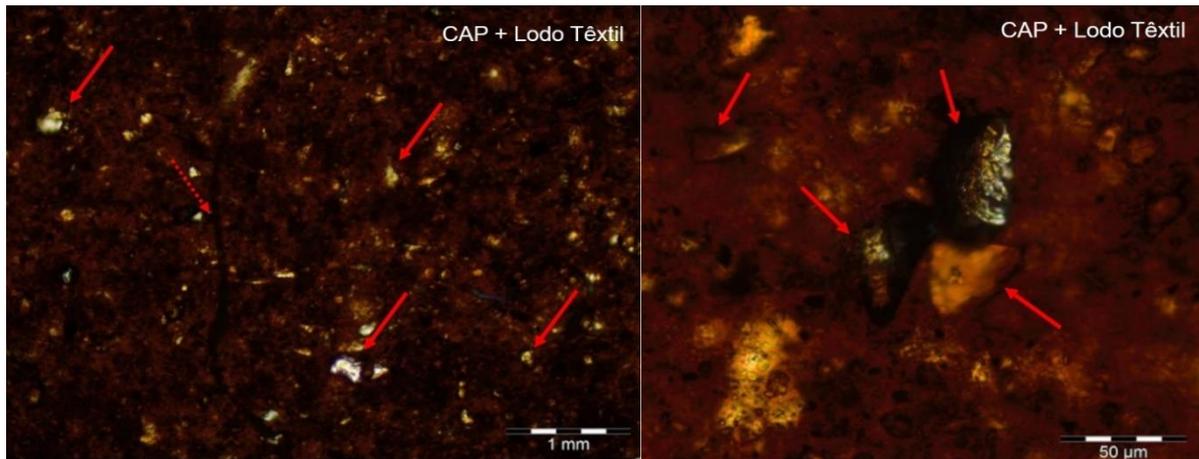
Fonte: O autor (2021).

Há pesquisadores que relatam que a melhoria na adesividade ocorre até um ponto ótimo de adição de fíler e que depois os resultados são prejudicados (HASSAN, 2005). Esse ponto de saturação possivelmente se encontra após 3,0% de adição de lodo têxtil, prioritariamente na forma úmida, em termos de resistência ao dano por umidade induzida. Na forma seca não foi possível mensurar este ponto, pois teores superiores a 2,0% ficaram fora de faixa para outros parâmetros conforme a DNIT ES 31 (2006) e não foram analisadas.

#### 4.6.2 Microscopia petrográfica óptica

Quanto à capacidade de aprisionamento das partículas de lodo têxtil ao cimento asfáltico de petróleo, as imagens aproximadas via microscopia petrográfica contribuem para uma resposta positiva, como pode ser visto na Figura 67. Os resultados mostram a presença de minerais opacos (de brilho metálico) e minerais claros, denotando a incorporação de compostos diferentes. Ainda na Figura 67, pode-se observar que não há a formação de espaços vazios ou aglutinação de lodo, indicando que a dispersão dos grãos de lodo se dá por todo o corpo do ligante.

Figura 67 - Microscopia do mástique com de lodo têxtil (37% CAP + 63% lodo)



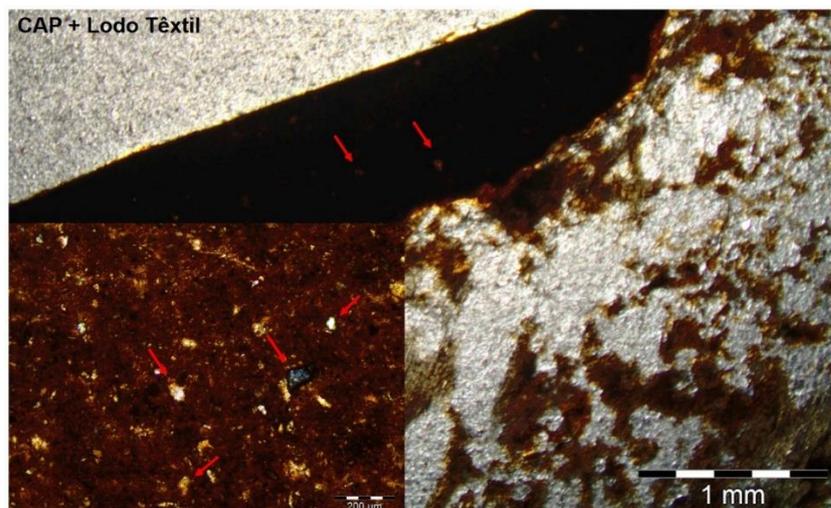
Fonte: O autor (2021).

Além disso, é possível visualizar na Figura 67, no ponto indicado com a seta pontilhada, a presença de um fio possivelmente de origem têxtil de algodão que pode ter também auxiliado nas propriedades coesivas das misturas asfálticas com incorporação de lodo têxtil e na sua resistência à tração.

A interface do agregado com o ligante modificado com o maior teor de lodo têxtil (3,0%) pode ser observada na

Figura 68. Na interface se encontram indicados por duas setas alguns grãos de lodo aprisionados no ligantes. Na ampliação cuja escala de 200 µm está associada, é possível observar os diferentes constituintes do lodo têxtil aprisionados ao mástique que envolve o agregado graúdo.

Figura 68 - Microscopia da interface do agregado com o ligante modificado com 3,0% de lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

#### 4.6.3 Fluorescência de Raios X do pó de corte

Os resultados da fluorescência de Raios X do pó do material cortado, obtido após os cortes dos corpos de prova, apontou que, independentemente do teor de lodo têxtil adicionado, a composição do material não indica modificações consideráveis na sua composição química (Tabela 28). Esse resultado é positivo, pois numa futura fresagem de um pavimento contendo revestimento composto também por lodo têxtil, este continuará aprisionado na matriz asfáltica. A elevação do teor de sílica se deu pela fragmentação dos agregados durante o processo de corte.

Tabela 28 - Fluorescência de Raios X pó de corte das misturas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência

	<b>SEM LODO 0%</b>	<b>LODO SECO 2,0%</b>	<b>LODO CAP 2,0%</b>	<b>LODO CAP 3,0%</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	67,58%	67,82%	68,49%	68,20%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16,72%	15,85%	15,75%	15,60%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	5,96%	6,19%	6,03%	6,06%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,58%	3,27%	3,07%	2,92%
<b>CaO</b>	2,54%	2,92%	2,94%	3,17%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,52%	2,30%	2,30%	2,29%
<b>MgO</b>	0,51%	0,91%	0,70%	1,06%
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,24%	0,24%	0,22%	0,20%
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,24%	0,35%	0,36%	0,35%
<b>SrO</b>	0,06%	0,06%	0,05%	0,06%
<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0,03%	0,03%	0,03%	0,02%
<b>Cl</b>	0,01%	0,06%	0,06%	0,08%

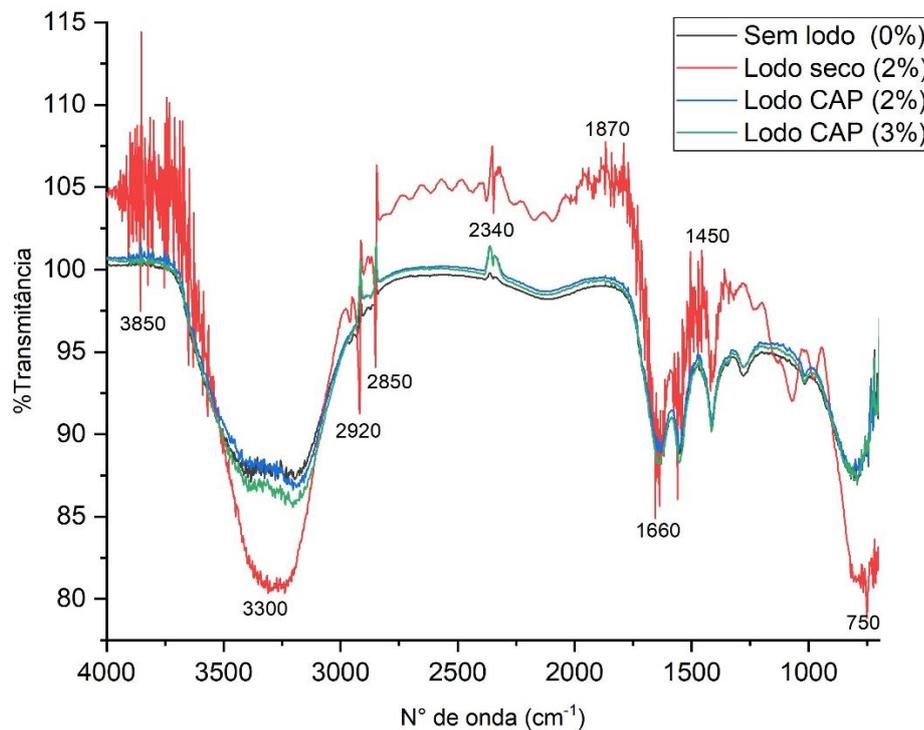
Fonte: O autor (2021).

#### 4.6.4 Análise qualitativa dos extratos lixiviados

Por meio dos resultados da análise de extrato lixiviado das misturas asfálticas com inserção de lodo têxtil via infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), é possível construir curvas da porcentagem de transmitância em função do número de onda, sendo uma para cada amostra de corpo de prova pós-lixiviação (Figura 69). Nota-se que, enquanto as curvas de análise dos extratos dos corpos de prova das misturas com inserção úmida (2,0% e 3,0% de LODO CAP) estão bem próximas da

referência (sem adição de lodo), a amostra com inserção de 2,0% seco apresenta bandas de transmitância sobressalentes sobre as outras amostras. Tendo por base essa constatação, é notado que o comportamento da amostra em questão foi destoante dos demais, indicando que, possivelmente, algum elemento se despreendeu da mistura asfáltica durante o processo de lixiviação.

Figura 69 - FTIR dos extratos lixiviados das misturas asfálticas com adição de 2,0% de lodo têxtil na forma seca, bem como 2,0% e 3,0% de lodo têxtil na forma úmida (lodo CAP), comparativamente à mistura de referência

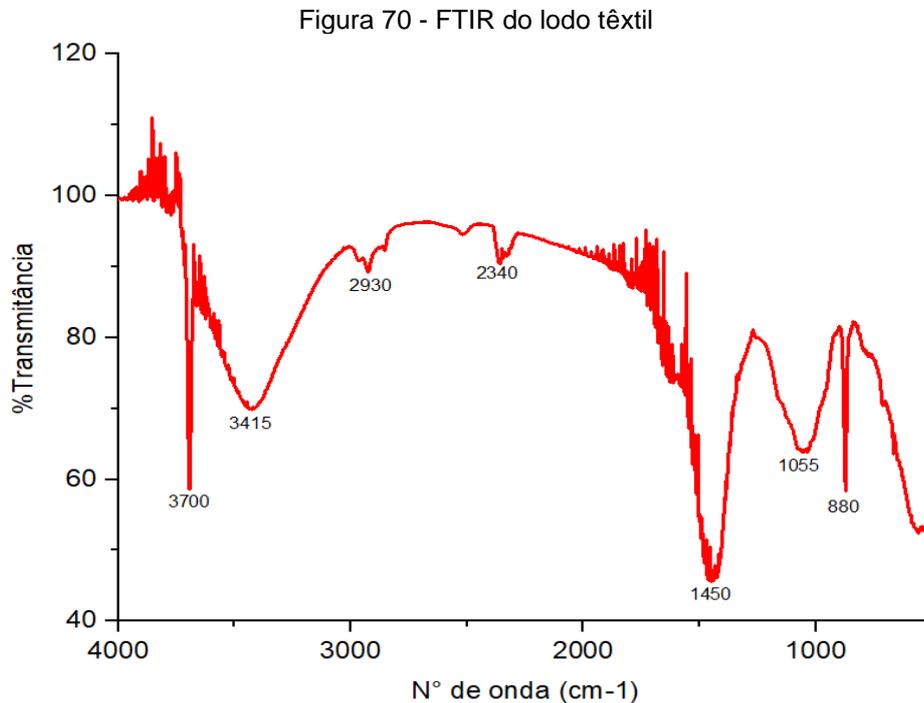


Fonte: O autor (2021).

Portanto, foram evidenciados alguns pontos no gráfico, onde ocorrem bandas com destaque de transmitância ao longo da curva, sendo seus respectivos números de onda  $3850\text{ cm}^{-1}$ ,  $3300\text{ cm}^{-1}$ ,  $2920\text{ cm}^{-1}$ ,  $2850\text{ cm}^{-1}$ ,  $2340\text{ cm}^{-1}$ ,  $1870\text{ cm}^{-1}$ ,  $1660\text{ cm}^{-1}$ ,  $1450\text{ cm}^{-1}$  e  $750\text{ cm}^{-1}$ .

Conforme Lima (2018) e Cerrato *et al.* (2006), a banda em torno de  $3850\text{ cm}^{-1}$  indica a existência de pontes de hidrogênio, por meio de vibrações nas ligações do tipo O – H, assim como a banda em  $3300\text{ cm}^{-1}$ . As bandas em  $2920\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  indicam a presença de ligações do tipo C - H (PAVIA *et al.*, 2010). Uma porção de  $\text{CO}_2$  é atestada por meio da banda em  $2340\text{ cm}^{-1}$  (PATEL; SHADANGI; KAR, 2021). Segundo Tinti *et al.* (2015) e Foschiera, Pizzolato e Benvenuti (2001), as alterações

da curva em  $1870\text{ cm}^{-1}$  expressam a presença de  $\text{SiO}_2$  (sílica). Para Padilha *et al.* (2017), as vibrações  $915\text{-}540\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas a minerais de Argila. Para Amoni (2019), vibrações a  $1085\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas a  $\text{Si(Al)-O}$ .



Ao analisar o ensaio de FTIR realizado com a amostra de lodo têxtil (Figura 70), é possível observar vibrações em comum, em torno de  $3700\text{ cm}^{-1}$ ,  $3415\text{ cm}^{-1}$ ,  $2930\text{ cm}^{-1}$ ,  $2340\text{ cm}^{-1}$  e  $1450\text{ cm}^{-1}$ , que sugerem que essa variação de bandas seja proveniente do resíduo adicionado de forma seca.

#### 4.6.5 Análise quantitativa dos extratos solubilizados

Os valores absolutos e as taxas de aprisionamento dos elementos presentes nos extratos solubilizados encontram-se compilados na Tabela 29.

Tabela 29 - Elementos presentes nos extratos solubilizados

PARÂMETROS	LODO TÊXTIL	0% LODO	LODO SECO 2,0%	LODO CAP 2,0%	LODO CAP 3,0%	VMP <sup>(1)</sup>	UNIDADE
Acidez	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	-	-
Alcalinidade em CaCO <sub>3</sub>	1482,5	12,1	32,2	30,2	20,1	-	mg/L
Antimônio Total	0,011325	<0,00010	0,00017	<0,00010	0,00012	-	mg/L
Bário Total	0,06325	0,0035	0,0058	0,0067	0,0063	0,7	mg/L
Cádmio Total	<0,00050	0,00056	0,00244	0,002	0,00468	0,005	mg/L
Cálcio Total	35	2	5	5	4	-	mg/L
Chumbo Total	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	0,01	mg/L
Cobalto Total	0,00175	<0,00010	0,00051	<0,00010	<0,00010	-	mg/L
Cobre Total	0,00795	0,00132	0,00179	0,00133	0,00081	2	mg/L
Fosfato Total	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	-	mg/L
Magnésio Total	901,5	0,6	4,2	2,4	3	-	mg/L
Matéria Orgânica	150	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	mg/L(O <sub>2</sub> )
Molibdênio Total	0,0255	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	-	mg/L
Níquel Total	0,0625	<0,0010	0,0017	0,0013	<0,0010	-	mg/L
Nitrato em N	<0,05	0,65	1,37	0,94	2,4	10	mg/L
pH	8,4	7,6	7,3	7,6	7,4	-	-
Potássio Total	142,75	3,2	3,4	3,4	4	-	mg/L
Prata Total	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	0,05	mg/L
Salinidade	10,5525	0,037	0,1	0,07	0,13	-	‰
Sódio Total	1688,25	3,3	13,9	13,9	18,6	200	mg/L
Vanádio Total	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	-	mg/L
Zinco Total	0,0275	0,0071	0,0119	0,0051	0,0236	5	mg/L

VMP<sup>(1)</sup>: Valor máximo permitido segundo a ABNT NBR 10004/2004.

Fonte: O autor (2021).

Destaca-se que ao realizar as análises dos extratos solubilizados, não foi detectada acidez ou caráter básico excessivos, uma vez que as amostras em contato com o CBUQ apresentam pH próximos a neutro, e o lodo têxtil básico. Esse fato endossa o aprisionamento dos elementos que conferem essa alcalinidade ao lodo têxtil, principalmente o magnésio.

No que se refere à matéria orgânica e ao molibdênio total, ambos tiveram um aprisionamento de 100% em todas as formas de inserção avaliadas. Juntamente à calcita, o magnésio, sódio e o potássio foram os elementos que apresentaram maior solubilização em números totais. A mistura asfáltica foi capaz de aprisionar mais de 99% desses elementos.

Já com relação à alcalinidade em  $\text{CaCO}_3$ , houve uma redução acima de 98% em todas as amostras. Para o cálcio total, a efetividade foi maior que 90%, atingindo até 94%. É possível assegurar que no mínimo 95% do antimônio e bário ficaram aprisionados dentro da matriz asfáltica. A salinidade foi reduzida em mais de 99%. Há uma tendência que o aprisionamento do cobre e o cobalto seja mais efetivo no lodo misturado ao ligante. Assim, é possível inferir que os elementos presentes no lodo têxtil apresentam uma maior afinidade ao ligante asfáltico do que a água, ratificando os resultados obtidos no dano por umidade induzida (DUI).

Ressalta-se que a concentração de sódio total no lodo têxtil puro estudado está em desconformidade com a NBR 10004/2004. No entanto, quando inserido na matriz asfáltica, teve-se um aprisionamento satisfatório do sódio, reduzindo-o em aproximadamente 120 vezes a concentração no lixiviado, ficando assim bem abaixo dos limites normativos.

Os quantitativos referentes ao “nitrato em N” e “cádmio total” não estão relacionados ao lodo têxtil, uma vez que eram inexistentes ou em quantidades não aferíveis pelos equipamentos utilizados. Mesmo assim, os valores desses elementos no solubilizado se encontram consideravelmente abaixo dos limites da NBR 10004/2004.

O chumbo, o níquel, a prata, o fosfato e o vanádio não foram encontrados em quantidades mensuráveis tanto no lodo têxtil, quanto nas amostras de mistura asfáltica. Devido à baixa concentração de zinco, não foi possível realizar uma análise quantitativa em virtude das limitações do equipamento disponível.

Por fim, os bons índices de aprisionamento de resíduos estão de acordo com o que foi constatado por Modarres *et al.* (2015) nos seus estudos com cinza e pó de carvão, em que foram analisados os níveis de cádmio, cromo, chumbo, níquel, mercúrio, arsênio, cobre e zinco. Embora houvesse vestígios de cromo e arsênio nas amostras que contêm cinza de carvão, essas concentrações eram consideravelmente mais baixas do que os níveis regulatórios da agência de proteção do meio ambiente dos Estados Unidos. Modarres *et al.* (2015) afirmam que as misturas asfálticas quentes podem estabilizar e solidificar os metais pesados existentes em resíduos.

#### 4.7 Viabilidade operacional

Para avaliar a viabilidade operacional do uso do lodo têxtil como constituinte de misturas asfálticas, algumas considerações a fim de simplificar a análise de custos foram traçadas. O custo de transporte não foi contabilizado, pois se considerou que a estação de processamento seria anexa ao aterro sanitário que atualmente recebe os resíduos sólidos da região Agreste, a um custo médio aproximado de R\$ 53,95/ton (Tribunal de Contas de Pernambuco, 2020).

Para processar o lodo, foram contabilizados os custos com a operação do maquinário de secagem, para retirada da umidade remanescente; e, o moinho para destorroamento, além dos custos com carga mecânica e operação do sistema.

Para retirada da umidade, foi considerado um secador horizontal a gás com capacidade térmica de 250.000 kcal/h e produtividade máxima de 3 t/h, com consumo de 8kg de gás por hora. Para o destorroamento, foi considerado um moinho de martelos com capacidade de 3 t/h, acoplado a um motor trifásico de 20 cv, de consumo médio de 15 kw.h., dois trabalhadores, além de pá carregadeira com operador. Adotando os valores da Sinapi de fevereiro de 2021, bem como os valores médios locais de R\$ 0,40/kw.h e de R\$ 6,10 kg/gás e os devidos índices, obtém-se a composição da Tabela 30.

O custo aproximado com esse processo seria de R\$ 42,34 por tonelada de lodo têxtil processado. Numa comparação direta, esse valor é menor que os custos de descarte no aterro sanitário. Evidentemente, outros custos como manutenção de equipamentos, embalagens e custos indiretos devem ser acrescidos em um estudo específico de viabilidade.

Tabela 30 - Composição de custos do beneficiamento do lodo têxtil

DESCRIÇÃO	UND	ÍNDICE	VALOR UNIT	VALOR
Consumo elétrico de moinho de martelos com produção de 3 t/h, com força motriz de 20 cv.	kW.h	5,000	R\$ 0,70	R\$ 3,50
Consumo energético de secador horizontal a gás de capacidade produtiva de 3 t/h e capacidade térmica de 250.000 kcal/h.	kg	3,000	R\$ 6,10	R\$ 18,30
Retroescavadeira sobre rodas com carregadeira, tração 4x4, potência líq. 72 HP.	h	0,111	R\$ 96,03	R\$ 10,67
Servente com encargos complementares	h	0,667	R\$ 14,8	R\$ 9,87
			<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 42,34</b>

Fonte: O autor (2021).

Segundo o portal “Tome Conta” do Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco, apenas no município de Caruaru/PE, no ano de 2020, foram aplicados 6358,33 m<sup>3</sup> de revestimentos asfálticos na cidade, considerando vias de 7 m de largura e revestimento de 4 cm, o que equivale a quase 23 km de vias. Nesse caso, poderiam ser utilizados 305 t a 458 t. Considerando o custo indicado pela Sinapi de R\$ 0,75 por kg de cal, normalmente utilizado como fíler, o valor investido em maquinários de uma central de processamento de lodo têxtil retornaria em um ano.

#### 4.8 Compilação de resultados e discussões

Para uma melhor compreensão dos resultados e, conseqüentemente, das conclusões, foram compilados na Tabela 31, de forma comparativa com as amostras sem lodo têxtil, de modo qualitativo, diversos parâmetros abordados nos itens anteriores. As discussões nesse item elucidarão os pontos presentes na conclusão.

Tabela 31 - Síntese qualitativa das amostras contendo lodo têxtil em comparação com a referência sem lodo têxtil

Parâmetro	2,0% Lodo Seco	2,0% Lodo CAP	3,0% Lodo CAP
Penetração	∅	"-"	"-"
Ponto de amolecimento	∅	"+"	"+"
Viscosidade Rotacional	∅	"+"	"+"
Adesividade	∅	"="	"="
Densidade teórica	"-"	"-"	"-"
Densidade aparente	"-"	"+"	"+"
Porcentagem de vazios	"="	"-"	"-"
Relação betume vazios	"="	"+"	"+"
Estabilidade	"-"	"-"	"-"
Fluência	"="	"="	"="
Resistência à tração	"="	"="	"="
Módulo de resiliência	"="	"-"	"-"
Resistência à fadiga	"="	"="	"+"
Deformação permanente	"="	"="	"="
Desgaste Cântabro	"="	"-"	"+"
Dano por umidade induzida	"="	"-"	"-"
Resíduos no corte de CPs	"="	"="	"="
Resíduos no extratos Lixiviados**	"+"	"="	"="
Resíduos nos extratos solubilizados*	"-"	"-"	"-"

"+" – aumentou; "-" – diminuiu; "=" – manteve; ∅ - não se aplica; \*\* qualitativa; \* em relação ao lodo têxtil.

Fonte: O autor (2021).

Numa análise global, tem-se que a incorporação do lodo têxtil às misturas asfálticas nas proporções analisadas é tecnicamente eficiente para estabilizar granulometricamente a mistura, sem prejuízos à sua função para aplicação em camada de revestimento asfáltico. As misturas asfálticas se mostraram eficientes para imobilização desse resíduo dentro sua estrutura, demonstrado pela manutenção das propriedades mecânicas, além de proporcionar uma destinação final ao resíduo, como também cria a possibilidade de utilizar um resíduo subproduto da indústria têxtil, em substituição aos recursos naturais no local de produção.

Aprofundando nas análises, o lodo apresentou um diâmetro médio de  $26,10 \pm 0,65 \mu\text{m}$ , com mais de 50% menores que  $20 \mu\text{m}$ . A superfície das partículas apresentou rugosidades e microporos. Estes aspectos físicos são benéficos à mistura asfáltica, pois esses grãos se unem ao ligante para compor o mástique, além da rugosidade facilitar a adesão mecânica. Ao adicionar o lodo têxtil diretamente ao ligante, foi possível ratificar essa premissa, uma vez que ao aumentar a quantidade de lodo até 5,0% em relação à massa total da mistura, o percentual de vazios permaneceu constante, diferentemente da inclusão seca na qual há mais quantidade de lodo disponível para preencher vazios mesmo com adições idênticas. Esse fato acarretou numa redução significativa, tendendo a zero com adições maiores que 5,0%. Essa ausência de vazios disponíveis para serem preenchidos por betume provocou o aumento excessivo da RBV para misturas com mais do que 2,0% de lodo seco. Quanto à composição química do lodo, este apresentou presença prioritária de óxidos de cálcio, magnésio e sílica; além da presença dos orgânicos, entre eles destacando-se a celulose e a imidazolina. A presença dos minerais provoca o aumento na viscosidade do ligante, enquanto a presença dos orgânicos tende a balancear o enrijecimento excessivo. A presença prioritária do CaO sob o SiO<sub>2</sub>, além da presença de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, indica uma possível melhora na adesividade. Nas imagens da microscopia ótica, é possível observar a ancoragem satisfatória do ligante com a adição de 2,0% até 3,0% lodo têxtil (Figura 49) mesmo sendo mais viscosos que o de referência. Nas imagens também é possível observar o perfeito envolvimento das partículas de lodo pelo ligante (Figura 67).

Considerando as curvas granulométricas dos agregados utilizados, o lodo têxtil se mostrou eficiente para contribuir como constituinte do concreto asfáltico nos teores de 2,0%, na forma de inserção seca, e de 2,0% e 3,0%, na forma úmida, previamente misturada ao ligante. Como apresentado anteriormente, a menor disponibilidade de

lodo para preencher os vazios proporcionou uma possibilidade de adicionar mais resíduo no concreto asfáltico sem prejuízo ao esqueleto mineral. As proporções de agregados são explicitadas na Tabela 23. Essas misturas atenderam granulometricamente à especificação de serviço DNIT ES 31/2006 para concreto asfáltico em faixa de rolamento faixa “C”.

O teor de ligante ótimo foi de 5,5% para todas as misturas, inclusive para as misturas que tiveram o ligante modificado com lodo têxtil.

Essa adição fez com que o ligante modificado com lodo têxtil necessitasse de um incremento térmico de 6°C e 9°C para aquecimento (170 cP) e 8°C e 10°C para compactação (280 Cp), com adições de 2,0% e 3,0% de lodo têxtil, respectivamente, quando comparados ao ligante CAP 50/70 utilizado como referência e nas misturas a seco. A obtenção de um ligante mais viscoso é fortemente indicada para locais com altas temperaturas, que é o caso do Agreste pernambucano. Adições superiores a 3,0% no ligante são inviáveis, pois a temperatura de aquecimento dos agregados superaria 177°C, temperatura associada com a degradação do ligante asfáltico.

Para o valor de projeto de 5,5% de CAP, todas as amostras com lodo apresentaram uma singela diminuição na estabilidade Marshall, porém não sendo prejudicial porque apresentam estabilidade próxima a 1000 kgf, quando se recomenda uma estabilidade mínima de 500 kgf na norma DNIT ES 31/2006.

Estatisticamente ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras), não houve efeitos prejudiciais na resistência à tração, deformação permanente e rigidez, mantendo-se estatisticamente equivalentes à amostra de referência, as adições de 2,0% de lodo seco e 2,0 e 3,0 de lodo CAP. Pela análise da deformação permanente (FN), as misturas apresentadas nessa pesquisa são indicadas para vias de tráfego médio (entre  $3 \times 10^6$  e  $1 \times 10^7$ ), assim como a de referência, ou seja, tem-se uma manutenção nessas propriedades mecânicas mesmo com a adição de um resíduo, o que é positivo no aspecto ambiental. Além disso, ressalta-se que a resistência à fadiga do concreto asfáltico, medida pelo ensaio de compressão diametral, com adição 3,0% de lodo têxtil ao ligante, resultou superior às demais, chegando a um ganho de 38,3% na quantidade de ciclos em comparação com a mistura de referência, que foi estatisticamente semelhante ( $p < 0,05$ , teste t-Student, 3 amostras) às amostras contendo 2,0% de lodo independentemente da forma de inserção.

A presença do lodo têxtil nas proporções estudadas não foi deletéria em termos de durabilidade ao dano induzido por água. Todas as misturas estudadas, tanto as de

referência quanto as adicionadas de lodo têxtil, atingiram o valor da relação de resistência à tração, especificado como mínimo pela AASHTO 283 (2007) e a norma Brasileira ABNT 15617 (2015), que estipulam 70% do valor da amostra não condicionada.

No aspecto ambiental as misturas estudadas demonstraram a capacidade de imobilizar os diversos componentes do lodo têxtil dentro da matriz asfáltica, fato constatado pelas análises dos extratos solubilizados em que diversos componentes tiveram retenção superior a 99%, destacando-se a matéria orgânica, óxidos básicos e metais. O aprisionamento do lodo no concreto asfáltico também foi notado pela baixa interferência do pH dos extratos. Esse desempenho no aspecto ambiental se deu principalmente pela capacidade dos ligantes de envolver as partículas, e pela afinidade química demonstrada do lodo pelo ligante.

Quanto à viabilidade operacional, na análise simplificada realizada foi possível observar que os custos de beneficiamento do lodo podem ser menores que os custos para descarte em aterro sanitário. Para cada km de via pavimentada com as misturas asfálticas estudadas, poderiam ser aproveitadas até 20t de lodo têxtil, deixando de poluir e sobrecarregar os aterros sanitários. Em médio prazo, é possível um retorno financeiro que poderia ser aplicado na educação ambiental.

Por fim, é possível afirmar que o lodo gerado pelas lavanderias da indústria têxtil do Agreste pernambucano pode ser utilizado com adição em misturas asfálticas após simples secagem e destorroamento. Essas misturas são viáveis tecnicamente, além de promoverem a sustentabilidade.

## 5 CONCLUSÕES

Conforme as análises mecânicas, microscópicas e ambientais realizadas na presente pesquisa, é possível inferir que o concreto asfáltico é indicado para receber o lodo têxtil como parte constituinte da mistura. A hipótese é suportada pelas seguintes conclusões, apresentadas por distintos aspectos:

I - Com os agregados regionais disponíveis e as granulometrias utilizadas, foi possível formular concreto asfáltico na faixa “C” do DNIT com 12% de brita 19, 30% de brita 12 e 56% de pó de pedra quando adicionado 2,0% de lodo têxtil e 55% com a adição de 3,0%.

As misturas com adição do lodo na forma seca apresentaram uma desconformidade das propriedades volumétricas com adições superiores a 2,0%, sobretudo no volume de vazios e RBV, que chegaram a valores de 0,5% e 99,7%, respectivamente, para adição de 5,0%, em que os limites são de 3,0% a 5,0% e 75 a 82%. Em virtude dos fenômenos granulométricos expostos no item 4.7, a inclusão de lodo têxtil no concreto asfáltico ficou limitado ao teor de 2,0% na forma seca. Essa mistura não apresentou estatisticamente prejuízo nas propriedades mecânicas de resistência à tração, módulo de resiliência, resistência à fadiga, deformação permanente e desgaste Cântabro comparativamente com a mistura de referência.

Para a adição do lodo têxtil diretamente ao ligante, foi possível adicionar uma porcentagem de até 3,0% sem prejuízo às propriedades volumétricas, devido a uma porção do lodo estar ligada ao ligante e não disponível para ocupar espaços do esqueleto mineral, conforme explicitado no item 4.7. A limitação se deu pelo aumento da viscosidade do ligante para adições de lodo maiores de 3,0% em relação à massa total. Os ligantes adicionados acima desse limite necessitam de uma temperatura de aquecimento superior que a de referência, podendo até atingir a temperatura de degradação do ligante. Assim como na adição seca, a adição de 2,0% de lodo têxtil diretamente ao ligante não apresentou estatisticamente prejuízo nas propriedades mecânicas citadas anteriormente. Na adição de 3,0%, a resistência à fadiga apresentou resultados até 38,3% maior na quantidade de ciclos em comparação com a mistura de referência. No desgaste Cântabro notou-se uma elevação de 2,46% em relação à referência, mesmo assim não apresentando prejuízo conforme apresentado em 4.5.5. Os outros parâmetros mecânicos não apresentaram diferenciação

estatisticamente relevante. Para todas as misturas, o valor de ligante adotado foi de 5,5%.

II - Analisando comparativamente as técnicas de adição do lodo têxtil, é notado que com a adição diretamente no ligante obtém-se ligantes modificados, com viscosidade maior até 37% a 135°C e até 28% a 177°C, o que torna os ligantes menos suscetíveis a mudanças térmicas, necessitando de um gasto energético para elevar a temperatura em até 10°C a mais para compactação, quando comparado ao CAP 50/70 de referência. Esses ligantes modificados apresentaram características satisfatórias quanto à adesividade conforme apresentado em 4.7. Em relação à adição seca, o lodo têxtil se comportou como um fíler calcário convencional.

Quanto à escolha entre a técnica de incorporação, viu-se que as duas são possíveis; na prática se dará pela operação e necessidade de adaptação das usinas de asfalto que irão processar o concreto asfáltico, observando que adições superiores 2,0% deverão ser realizadas diretamente ao ligante.

III - Numa análise simplificada de viabilidade operacional, é possível concluir que os custos para processamento do lodo têxtil para deixá-lo adequado ao uso nas misturas asfálticas pode ser 20% menor que os custos para depositá-los em um aterro sanitário.

Tecnicamente, a utilização desses resíduos nas proporções estudadas não trouxe prejuízo ao comportamento mecânico dos revestimentos asfálticos, inclusive melhorando o comportamento ante a fadiga e suscetibilidade a climas quentes com a adição de 3,0% diretamente ao ligante, devido às características químicas e microestruturais expostos no item 4.7.

Sob a perspectiva ambiental, as misturas estudadas apresentaram valores acima de 70% para dano por umidade induzida, o que é positivo, pois demonstra uma baixa suscetibilidade ao dano por umidade, promovendo assim o aprisionamento do resíduo dentro da matriz asfáltica. Este fato foi comprovado pelas análises efetuadas no pó de corte de corpos de prova, nos extratos lixiviados e solubilizados.

A análise qualitativa dos extratos lixiviados apresentou para a adição de 2,0% de lodo seco um indicativo de variação em relação à referência, porém não foi possível verificar a quantificação ou o elemento que provocou a variação das vibrações. Na solubilização, as misturas obtiveram uma fixação considerável dos componentes presentes no lodo, chegando a uma retenção em alguns casos superior a 99%, destacando-se a matéria orgânica, óxidos básicos e metais.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Recomendam-se para trabalhos futuros outras abordagens que não puderam ser realizadas nessa pesquisa:

- Estudar a incorporação do lodo a misturas frias. Misturas frias são utilizadas em vias de baixo volume de tráfego, bem como em reparos. Estudos nesse sentido ampliariam a aplicação do lodo têxtil, além de ser uma demanda regional.
- Analisar os efeitos com agregados em outras granulometrias, inclusive análise da Faixa de Agregados Dominantes (FAD): Estudar com misturas que os agregados que tenham um teor de finos menor, isso possibilitaria uma maior adição de lodo têxtil, sobretudo na forma seca.
- Estudar o uso do lodo em camadas de micro revestimento: As camadas de micro revestimento requerem agregados com granulometria mais fina que o concreto asfáltico, isso poderia favorecer uma utilização mais ampla do lodo têxtil.
- Realizar um estudo de dosagem pelo método Superpave: Empregar uma técnica mais moderna que a Marshall para dosagem da mistura asfáltica.
- Analisar quantitativamente cada tipo de orgânico presente no lodo têxtil: Proporciona um melhor entendimento do lodo ante a interação com outros materiais.
- Estudar a interação dos principais compostos orgânicos presentes no lodo têxtil de forma individual com o ligante asfáltico: Observar individualmente como cada orgânico presente no lodo têxtil se comporta com o ligante asfáltico.
- Estudar o uso combinado do lodo têxtil com óleos ou “solventes” no ligante asfáltico: A inclusão de outros materiais que diminuam a viscosidade pode proporcionar a possibilidade da adição de mais lodo no ligante.
- Implantar trecho experimental para que este revestimento possa ser testado e avaliado na prática: Trechos experimentais monitorados são de suma importância para a validação e consolidação da aplicação das misturas contendo resíduos.
- Realizar uma análise detalhada de viabilidade operacional: A realização desse estudo proporcionará uma informação fidedigna para a aplicação prática desse material.

- Replicar esse estudo em outras regiões: Análises com agregados, ligantes e lodos de outras regiões produtoras têxtil seriam ideais para consolidar o método.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (CPRH). **Lavando Limpo**. Recife: CPRH, 2018.

AGRESTETEX. **Entenda a influência do polo têxtil no Agreste Pernambucano**. Disponível em: <http://agrestetex.com.br/entenda-a-influencia-do-polo-textil-no-agreste-pernambucano/>. Acesso em: 18 abr. 2021.

AHMED, H. Y.; OTHMAN, A. M.; MAHMOUD, A. A. Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt. **Assiut University Bulletin for Environmental Researches**, v. 9, p. 51-60, 2006.

AHMAD, J., MOHD YUNUS, K. N., KAMARUDDIN, M., HIDAYAH, N., & ZAINORABIDIN, A. The Practical Use of Palm Oil Fuel Ash as a Filler in Asphalt Pavement. **The International Conference on Civil and Environmental Engineering Sustainability (IConCEES 2011)**, 2012.

AKBULUT, H. *et al.* A. Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 430-436, 2012.

ALENCAR, A. E. *et al.* Efeito da presença de aditivos nas propriedades reológicas do Ligante Asfáltico Modificado por EVA. *In: ENCONTRO DE ASFALTO; INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS*, 18. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2006.

AL-HDABI, A. Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 544-551, 2016.

ALI, L.; FIAZ, A. Use of Fly Ash Alongwith Blast Furnace Slag as Partial Replacement of Fine Aggregate and Mineral Filler in Asphalt Mix, at High Temperature. *In: GEOHUNAN INTERNATIONAL CONFERENCE. MATERIAL DESIGN, CONSTRUCTION, MAINTENANCE AND TESTING OF PAVEMENTS*, 2009, Changsha, Hunan, China. **Proceedings [...]**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012, p. 112-118.

AMARO, L. P. *et al.* Inserção de lodo de lavanderia industrial em pavimento asfáltico. *In: MOSTRA INTERNA DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, IX; MOSTRA INTERNA DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, II*, 2018. **Anais [...]**. Maringá/PR: UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Hot-Mix Asphalt Paving Handbook**. Amer Assoc of Hwy and Transportation, 1991.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Resistance of compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7369-20**, Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Asphalt Mixtures by Indirect Tension Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

AMONI, B.C. **Desenvolvimento de um método de síntese de zeólita tipo A utilizando cinzas volantes de carvão**: avaliação do uso como aditivo de mistura asfáltica morna. 2019. 000f. Tese (Doutorado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2019.

ANJOS, D. C. **Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de cimento Portland composto de fíler**. 2017. 000f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Infraestrutura no Curso de Engenharia de Infraestrutura) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ANWAR PARVEZ, M. *et al.* Asphalt modification using acid treated waste oil fly ash. **Construction and Building Materials**, p. 201-209, 2014.

ANWAR, T. B. *et al.* Utilization of textile sludge and public health risk assessment in Bangladesh. **Sustainable Environment Research**, v.28, n.5, p.1-6, 2018.

AQUINO, R. C. Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 10, n. 1, p. 29–35, 2015.

ARABANI, M. Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1181–1185, 2010. ARABANI, M.; BABAMOHAMMADI S.; AZARHOOSH, A. R. Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt. **International Journal of Pavement Engineering**, v.16, n.6, p. 37-41, 2014.

ARABANI, M.; BABAMOHAMMADI, S.; AZARHOOSH, A. R. Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 6, p. 502-509, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÕES. Agreste Tex movimenta a região Nordeste. **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecções**, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.abit.org.br/noticias/negocios-agreste-tex-movimenta-a-regiao-nordeste>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15140**: Misturas asfálticas – Determinação da perda de massa por abrasão Cântabro. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15617**: Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AZIZ, H. A. *et al.* Solidification and stabilization of the incinerated wastewater sludge from textile industry. **AIP Conference Proceedings**, v. 1892, 2017.

AZZAM, M. O. J.; AL-GHAZAWI, Z. Evaluation of incorporating oil shale filler aggregate into hot mix asphalt using Superpave mix design. **Construction and Building Materials**, v. 101, Part 1, p. 359-379, 2015.

AZZAM, M. O. J.; AL-GHAZAWI, Z.; AL-OTOOM, A. Incorporation of Jordanian oil shale in hot mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, Part 4, p. 2259-2277, 2016.

BALASUBRAMANIAN, J. *et al.* Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Management**, v. 26, n. 1, p. 22-28. 2006.

BALOTA, M. *et al.* Lodo têxtil: revisão sistemática de métodos de tratamento e potencial uso como insumo combustível de caldeira. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., Natal/RN. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2019.

BARBOSA, A. A. S. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com adição concomitante de cinzas de lenha e lodo têxtil gerados no APL de confecções Pernambucano**. 2012. 000f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru – PE.

BARBOZA JÚNIOR, V. S. *et al.* Deformação permanente em misturas asfálticas com diferentes ligantes asfálticos e adição de cal a partir do ensaio uniaxial de carga repetida. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES DA AMPET, 32., Gramado, 2018. **Anais [...]**, Gramado, 2018.

BARDINI, V. S. **Influência do Fíller Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas**. 2013. 344 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.  
BARDINI, V. S., KLINSKY, L. M.; FERNANDES, J. L. A importância do fíller para o bom desempenho de misturas asfálticas. **Minerva**, v.7, n.1, p. 71-78, 2010.

BARRA, B. *et al.* Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. *In: ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. Anais [...]*. Rio de Janeiro, v. 86, p. 995-1002, jun. 2014.

BASTOS, J. B.S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2016. 000f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2016.

BELOTTI, F. *et al.* Lixiviação e solubilização de elementos contaminantes de rejeito de flotação de minério de ferro – análise para aproveitamento de rejeito em pavimentação asfáltica. *In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS*, 10., 2019, João Pessoa. **Anais eletrônicos [...]**. João Pessoa: UFPB, 2019. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/1739>. Acesso em: 31 jan. 2020.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras Abeda, 2008.

BERNUCCI, L. B.; LEITE, L. M.; MOURA, E. Propriedades mecânicas em laboratório de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros. *In: ENCONTRO DO ASFALTO*, 16., 2002, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Horta Barbosa, 2002. p. 1-9.

BIANCHETTO, H. *et al.* Effect of Calcareous Fillers on Bituminous Mix Aging. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1998**. Washington: Transportation Research Board of the National Academies, 2007, p.140-148.

BOCK, A.L. *et al.* Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.14, p.59-69, 2009.

BONETI, I. I. **Valorização do resíduo areia de fundição (RAF)**. Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BORLINI, M. C. *et al.* Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. Parte I: características da cinza. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 319, p. 192-196, set. 2005. CAIXA ECONOMICA FEDERAL. **Índice da Construção Civil. Brasil**. Governo Federal. Ano. Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_653](https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_653). Acesso em: 20 abr. 2021.

CARDOSO, M. F. M. **Viabilidade do uso de cinzas de coco babaçu (*orbignya speciosa*) em argamassas**. 2014. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE, 2014.

CARVALHO L. C. Amaciamento têxtil. **Congresso Latino-Americano de Química têxtil**. SANTIAGO – CHILE, 1988.

CAVALCANTI FILHO, L. L. **Avaliação da resistência à compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de Algaroba**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE, 2016.

ÇELIK, Ö. Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt. **Petroleum Science and Technology**, v. 25, n. 13, p. 1571-1582, 2008.

CENTOFANTE, R. *et al.* Evaluation of the behavior of hot-recycled asphaltic mixtures with reclaimed asphalt. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n.3, 2018.

CERRATO, G. *et al.* Ga-promoted sulfated zirconia systems. II. Surface features and catalytic activity. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 94, p. 40-49, 2006.

CEZARO JUNIOR, T. D. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. 2008.130 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CHADBOURN, B. A., CROW, B.L., NEWCOMB, D., SKOK, JR., E.L., & SPINDLES, S. The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements. **Final Report No. 2000-13**, 2000.

CHAN, J. S. *et al.* Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures. **Journal of materials in civil engineering**, v.8, n.1, p. 19- 25, 1996.

CHANDRA, S.; CHOUDHARY, R. Performance Characteristics of Bituminous Concrete with Industrial Wastes as Filler. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 11, 2013.

CHEN, M. Z. *et al.* Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1532-1536, 2011.

CHEN, M.; LIN, J.; WU, S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3909-3914, 2011.

CHEN, W. *et al.* Thermo-Responsive Cellulose-Based Material with Switchable Wettability for Controllable Oil/Water Separation. **Polymers.**, v.10, n. 6, p. 592, 2018.

CHOI, M. J. *et al.* Performance evaluation of the use of tire-derived fuel fly ash as mineral filler in hot mix asphalt concrete. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition), v., n., p. 00-00, 2019.

CHOUDHARY, J. *et al.* Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 234, 117271, 2020.

CHURCHILL, E. V.; AMIRKHANIAN, S. N. Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures, **Journal Of Materials In Civil Engineering**, v.11, n., p4. 295-301, 1999.

COGO, M. C. **Estudo de Caracterização e Disposição dos Resíduos de uma Indústria Têxtil do Estado do Rio Grande do Sul**. 2011. 48 f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

COLPO, G. B. **Comportamento à fadiga de misturas asfálticas: ensaios laboratoriais e instrumentação in situ**. 2019. 263 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2019.

COMETTI, J. *et al.* Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis do município de Toritama-PE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL*, VII, 2016. **Anais [...]**. Campina Grande/PB, 2016.

COSTA, D. B. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de Mohr Coulomb**. 2018. 000f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2018.

COUTO JUNIOR, O. M. Caracterização e otimização do tratamento de efluente têxtil por coagulação-floculação, utilizando coagulante natural tanino. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.14, n. 1, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-EM 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 031**: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 136**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 035**: Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNIT, 1998a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 043**: Ensaio Marshall. Rio de Janeiro: DNIT, 1995a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro: DNIT, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 078**: Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro: DNIT, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 079**: Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro: DNIT, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 081**: Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Rio de Janeiro: DNIT, 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 083**: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro: DNIT, 1998c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 084**: Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro: DNIT, 1995b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 085**: Massa específica real (material finamente pulverizado). Rio de Janeiro: DNIT, 1994c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 089**: Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro: DNIT, 1994d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 135**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro: DNIT, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 367**: Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro: DNIT, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 424**: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos. Rio de Janeiro: DNIT, 2020a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-PRO 178**: Pavimentação asfáltica – preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall. Rio de Janeiro: DNIT, 2018b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 184**: Pavimentação - Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**NORMA DNIT 427:** Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2020b.

DIAS JÚNIOR, M. L. **Incorporação de lodo têxtil em blocos cerâmicos.** 2013. 89 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana/PR, 2013.

DITAMA, I.; MUKTIARTI, N.; SOEGIJONO, B. Imidazoline derivatives based on silane functional group as corrosion inhibitor on mild steel. **AIP Conference Proceedings.**, v. 2242, p.020-019, 2020.

DRUMOND, M. A.; PIRES, I. E.; BRITO, J. O. Algarobeira: uma alternativa para preservar as espécies nativas do nordeste semiárido. In: SEMINÁRIO SOBRE POTENCIALIDADE FLORESTAL DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 1., 1984. **Anais** [...]. João Pessoa: Silvicultura, São Paulo, v. 10, n. 37, p. 51-53, 1984.

EBRAHIM, R. Polo de Confecções do Agreste: da Sulanca à industrialização. **Jornal do Comércio Digital**, 2014. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/economia/pernambuco/noticia/2014/12/14/polo-de-confeccoes-do-agreste-da-sulanca-a-industrializacao-160371.php>. Acesso em: 18 abr. 2021.

EILER, L. M. Reologia de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro brookfield. Buenos Aires, Argentina: **LEMaC**, p. 118-131, 2009.

EYMAEL, M. M. T., DE WIJS, W., & MAHADEW, D. The Use of MSWI Bottom Ash in Asphalt Concrete. In J. J. J. M. Goumans, H. A. van der Sloot, & T. G. B. T.-S. in E. S. Aalbers (Eds.), **Environmental Aspects of Construction with Waste Materials** (Vol. 60, pp. 851–862), 1994.

ESTEVES, E. Polo de confecções do Agreste, um potencial ainda pouco conhecido, **Leia Já.** 2019 . Disponível em: <http://especiais.leiaja.com/descosturandoacrise/materia1.html> Acesso em: 18 abr. 2019.

FEBRATEX GROUP. **Entenda a influência do polo têxtil no Agreste Pernambucano**, 2019. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/entenda-a-influencia-do-polo-textil-no-agreste-pernambucano/#.XG1vvehKjIU> Acesso em: 18 abr. 2019.

FELLENBERG, G. **Introdução aos problemas da poluição ambiental.** São Paulo: Edusp, 1980.

FERREIRA, M. N. **Incorporação de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) de lavanderia industrial em cerâmica vermelha.** 2018. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2018.

FOSCHIERA, J. L.; PIZZOLATO, T. M.; BENVENUTTI, E. V. FTIR Thermal Analysis on Organofunctionalized Silica Gel. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 12, n. 2, p. 159-164, 2001.

FOROUTAN MIRHOSSEINI, S., KHABIRI, M., KAVUSSI, A., & JALAL KAMALI, M. Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash. **Construction and Building Materials**, 125, 408–416, 2016.

FURLAN, A. P. **Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas**. 2006. 000f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

GOTTARDI, E. V. **Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória moída de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Do Espírito Santo centro Tecnológico I, Vitória/ES, 2015.

GOUVEIA, F. P. **Efeito da adição de fíler gesso nas propriedades dos ligantes asfálticos e concretos**. 2013. 159 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, 2013.

GOYAL, S. *et al.* Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 169-177, 2019.

GRANICH, A. R. **Análise do desempenho de misturas asfálticas com adição de cal: um estudo de caso**. 2010. 62 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de tecnologia. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do SUL, Ijuí/RS, 2010.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Quím. Nova**, v.23, n.1, p.71-78, 2000.

GUNAVEL, M. *et. al.* Experimental study on strength of brick using ETP sludge and cement. **International Journal of Advance Research and Innovation**, v. 6, n.4, p. 1-3, 2019.

HASAN, M.; ROSLI, M. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 6, p. 209-244, 2019.

HASSAN, H. F. Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 91-98, 2005.

HEREK, L. C. S. *et al.* Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge. **Ceramics International**, v. 38, p. 951-959, 2012.

HICKS, R. G. Moisture damage in asphalt concrete. **National Cooperative Highway Research: Program Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board**. Washington: editora, 1991.

HOSSAIN, M. S. *et al.* Reuse of Textile Mill ETP Sludge in Environmental Friendly Bricks – Effect of Gamma Radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 151, p. 77-83, 2018.

HU, X., FAN, S., LI, X., PAN, P., FUENTES, L., & WALUBITA, L. F. Exploring the feasibility of using reclaimed paper-based asphalt felt waste as a modifier in asphalt-binders. **Construction and Building Materials**, v.234, p.117379, 2019.

HUANG, Y.; BIRD, R. N.; HEIDRICH, O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. **Conservation and Recycling**, v. 52, p. 58–73, 2007.

HUDALES, J. B. M. The use of M.W.I, fly ash in asphalt for road construction. In J. J. J. M. Goumans, H. A. van der Sloot, & T. G. B. T.-S. in E. S. Aalbers (Eds.), **Environmental Aspects of Construction with Waste Materials** (Vol. 60, pp. 227–232), 1994.

HUWAE, D. D. M.; PARERA, L. R.; TANIJAYA, J. Bagasse-Ash as Filler in HRS (Hot Rolled Sheet) Mixture. *In: THE WORLD CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL, ENVIRONMENTAL, AND MATERIALS RESEARCH. Anais [...]*. Jeju Island, Korea, 2016.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO. Programa de Produção e Difusão de Inovações para a Competitividade de APLs do Estado de Pernambuco – BID (BR-L1020). 2009. Disponível em: [http://www.itep.br/images/relatrio\\_pmc\\_confeces\\_revitalizado.pdf](http://www.itep.br/images/relatrio_pmc_confeces_revitalizado.pdf). Acesso em: 31 jan. 2016.

JAMSHIDI, A. *et al.* Comparative study on engineering properties and energy efficiency of asphalt mixes incorporating fly ash and cement. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 295-304, 2018.

JITSANIGAM, P. *et al.* Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance. **Sustainable Materials and Technologies**, v.17, n.71, p. 10.1016, 2018.

JOLIET, Y.; MALLOT, M. Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator. **Eurasphalt e Erobítume Congress**, Barcelona, 2000.

JONY, H. H.; AL-RUBAIE, M.; JAHAD, I. The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties. **Eng. & Tech. Journal**, v. 29, n. 1, p. 44-57, 2011.

KARASAHIN, M.; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 616-620, 2007.

- KHEDAYWI, T. S. Study on utilising waste toner in asphalt cement. **Road Materials and Pavement Design**, v. 15, n. 2, p. 446-454, 2014.
- LELOUP, W. D. A. **Efeitos da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru – PE, 2013.
- LENG, Z. *et al.* Laboratory evaluation of electromagnetic density gauges for hot-mix asphalt mixture density measurement. **Construction and Building Materials**, v.158, n.15, p. 1055-1064, 2018a.
- LENG, Z. *et al.* Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt. **Journal of Cleaner Production**, p. 682-688, 2018b.
- LHWAINT, A. A. A.; SETYAWAN, A.; ASTUTI, W. Design and properties of split mastic asphalt modified with bagasse ash. **Jurnal Teknik Sipil**, v. 3, n.1, 2015.
- LI, N. *et al.* Q. Investigation of the aging behavior of cellulose fiber in reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v.271, n.15, p. 00-00, 2020.
- LI, S. *et al.* Effect of filler in asphalt mastic on rheological behaviour and susceptibility to rutting, **International Journal of Pavement Engineering**, p. 87-96 2019.
- LIAO, M.-C.; AIREY, G.; CHEN, J.-S. Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 5, p. 576-581, 2013.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas/SP: Átomo, 2010.
- LIKITLERSUANG, S.; CHOMPOORAT, T. Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 337-344, 2016.
- LIMA, J. S. **Efeito da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e das condições de cura nas propriedades de geopolímeros obtidos com silicato de cinza da casca de arroz**. 2018. 000 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2018.
- LIMA, L. **Custos ambientais e a externalidade negativa das lavanderias têxteis do Polo de confecções do Agreste de Pernambuco**. 2014. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação no Mestrado de Ciências Contábeis do Departamento de Ciências Contábeis e Atuariais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

LIMA, P. C. F. **Comportamento silvicultural de espécies de Prosopis, em Petrolina-PE, região semiárida brasileira.** 1994. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas.** 2003. p. 98. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LUCAS JÚNIOR, J. L. **A influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas** 2018. 134 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2018.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B. Aggregate–binder adhesiveness assessment and investigation of the influence of morphological and physico-chemical properties of mineral aggregates. **Road Materials and Pavement Design**, S79-S94, 2019.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O.; SOARES, J. B. Desenvolvimento de metodologia para avaliação da adesividade agregado-ligante com o uso de processamento digital de imagem. **Transportes**, v.27, n.1, 2018.

LUCENA, L. C. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos.** 2012. 263 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MAJIDZADEH, K.; BROVOLD, F. N. State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures. **Highway Research Board**, Special Report, n. 98, p. 77, 1968.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica: efeito da compactação por impacto e giratória.** 2004. 461 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro/RJ, 2004.

MARTINEZ, B. G. J. **Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos.** 2017. 217 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MARTINEZ, B. G. J. **Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE.** 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MELO, M. S. C. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de Algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do Agreste pernambucano.** 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MELOTTI, R. *et al.* A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. **Waste Management**, v. 33, p. 1906–1917, 2013.

MISTRY, R.; ROY, T. K. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. **Recent Trends in Engineering and Material Sciences**, v. 8, p. 307-309, 2016.

MISTRY, R.; ROY, T. K. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt in Perspectives in Science. **Waste Management**, n. 8, p. 307-309, 2016.

MODARRES, A. *et al.* Effect of cement kiln dust on the low-temperature durability and fatigue life of hot mix asphalt. **Cold Regions Science and Technology**, v. 110, p. 59-66, 2015.

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M. Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 476-483, 2014.

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M.; AYAR, P. Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 262-268, 2015.

MORAVIA, W. G. *et al.* Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, v.52, p. 193-199, 2006.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (*prosopis juliflora*) moldado sob pressão**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. *In*: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 11., 2000, Gramado. **Anais [...]**. Gramado/RS, 2000. p. 1007-1017.

MOURA, L. S.; NÓBREGA, A. C.; OLIVEIRA, S. M. Incorporação de cinzas de Algaroba geradas no APL de confecções do Agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ. *In*: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 44.; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 18., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu-PR, 2015.

MOURA, L. S. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ**. 2017. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

MURANA, A. A.; SANI, L. Partial replacement of cement with bagasse ash in hot mix asphalt. **Nigerian Journal of Technology**, 34(4), 699–704, 2015.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. 2014. 99 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NASSAR, A. I. *et al.* Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 352-363, 2016.

NÚÑEZ, W. P. *et al.* Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. *In*: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38., 2007, Manaus. **Anais [...]**. Manaus, 2007, 15 p.

NWAOBAKATA, C.; AGWUNWAMBA, J. C. Influence of Periwinkle Shells Ash as Filler in Hot Mix Asphalt. **International Journal of Science and Research**, v. 3, n. 7, p. 2369-2373, 2014.

NWAOBAKATA, C., ELUOZO, S. N. Predictive model to monitor the Performance of palm kernel shell ash filler on life expectancies of hot asphalt for heavy traffic. **World**, 1(1), 1–8, 2015.

OLIVEIRA, A. G. *et al.* Evaluation of calcined textile sludge as a stabilizing material for highway soil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, English Edition, v.7, n5., p. 688-699, 2020.

OLIVEIRA, A.G. **Estudo das propriedades mecânicas do lodo têxtil para fins de utilização em pavimentos rodoviários**. 2014. 000 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

PADILHA, F. J. *et al.* Uso da Espectroscopia Raman e FT-IR na Caracterização do Biocarvão em Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 5, 2017.

PASANDÍN, A. M. R. *et al.* Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p. 853-362, 2015.

PASANDIN, A. R., PEREZ, I., RAMIREZ, A., CANO, M. M. Moisture damageresistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. **Journal of Cleaner Production**, 112, 853–862, 2016.

PATEL, N.; SHADANGI, K. P.; KAR, P. K. Characterization of waste engine oil derived pyrolytic char (WEOPC): SEM, EDX and FTIR analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, n. 5, p. 2866-2870, 2021.

PATRIOTA, M. B. de. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco**. 2004. 000f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

PAVIA, D.L. *et al.* **Introdução à Espectroscopia**. Local: Cengage Learning, 2010.  
PEREIRA, J. C. D.; LIMA, P. C. F. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. **Colombo: Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 45, p. 99-107, 2002.

PERNAMBUCO. APL de confecções do Agreste PMC do APL de confecções revitalizado. **Programa de Produção e Difusão de Inovações para a Competitividade de APLs do Estado de Pernambuco**, BID (BR-L1020). 2009. <http://www.secti.pe.gov.br/portfolio/encerrados/pro-apl/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

PHILOZON. Uso de ozônio para remoção de cor em efluentes têxteis. **Ozonizando - Soluções ecológicas para indústrias e processos**. 2019. Disponível em: <https://www.philozon.com.br/noticias/uso-de-ozonio-para-remocao-de-cor-em-efluentes-texteis/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

PIETROBON, C. L. D. R. *et al.* Estudos preliminares sobre estabilização/solidificação – e/s – de lodo de tratamento de lavanderia têxtil para reutilização como argamassa de construção: exame de caso para Maringá, estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 24, p. 1659-1664, 2002.

PIETROBON, C. L. D. R. *et al.* Lixiviação de contaminantes de compostos de lodo cimento. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 26, n. 1, p. 45-52, 2004.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos. *In*: ENCONTRO DE ASFALTO, 5., Rio de Janeiro, 1980. **Anais [...]**. 52 p.

PIRES, D. R. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de Algaroba geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções pernambucano**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE, 2016.

PUTRA JAYA, R. *et al.* Marshall stability properties of asphalt mixture incorporating black rice husk ash. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 22056-22062, 2018.

RAIMONDI, I. **Estudo e caracterização geológica e geotécnica de rejeitos de mineração – Adrianópolis (PR)**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2014.

ROBERT, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. **NAPA Educational Foundation Ingham**, Maryland, v.2, 1996.

ROCHA FILHO, D. *et al.* Confecção de lâminas delgadas para análise de rocha. *In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*, 10., 2018, Santana do Livramento. **Anais** [...]. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa, 2018.

RODRIGUES, A. L. R. **Efeito do tipo e da proporção de fíler no comportamento do mástique asfáltico**. 2019. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

RONGALI, U. *et al.* Laboratory Investigation on Use of Fly Ash Plastic Waste Composite in Bituminous Concrete Mixtures. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 89-98, 2013.

SAKTHIVEL, S. *et al.* Experimental investigation on textile mill sludge with partial replacement of fine aggregate in concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 6, n. 3, 2019.

SALEM, Z. T. A. *et al.* Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 11, n. 1, p. 117-131, 2017.

SANTANA, H. Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de fíler em misturas asfálticas. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*, 29., 1995, Cuiabá. **Anais** [...]. Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.

SANTOS, K. P. **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2012.

SARGIN, S. *et al.* Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 390-397, 2013.

SATO, Y., OYMADA, T., & HANEHARA, S. Applicability of sewage sludge ash (SSA) for paving materials: A study on using SSA as filler for asphalt mixture and base course material. **Laser**, 77(265), 66, 2013.

SEDAGHAT, B. *et al.* Rheological properties of bitumen containing nanoclay and organic warm-mix asphalt additives. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118092-118116, 2020.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Editora PINI Ltda, 2001.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Estudo Econômico das Indústrias de Confecções de Toritama/PE**. Recife, PE: SEBRAE, 2019.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Perfil econômico e principais oportunidades de negócio em Pernambuco**. Recife, PE: SEBRAE, 2008.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. SEBRAE. **Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano, 2012**. Recife, PE: SEBRAE, 2013.

SILVA FILHO, A. R. A. *et al.* Classification, characterization and diagnosis of Jeans Processing Laundries in the City of Caruaru-PE, in *Agreste Pernambucano. Research, Society and Development*, v.10, n.1, e57810112186, 2021.

SILVA, N. A. B. **Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente modificadas por ligantes poliméricos**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa Silva, Viçosa/ MG, 2016.

SILVA, R. A. J. **Modelo de Gestão Ambiental para Reuso de Águas de Lavanderias do Agreste de Pernambuco**. 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife/PE, 2016.

SKAF, M. *et al.* Ladle furnace slag in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 488-495, 2016.

SOARES, J.B.; CAVALCANTE, V.T.F. Efeito do tipo e do teor de fíler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*, 33., 2001, Florianópolis-SC. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2001.

SOBOLEV, K. *et al.* The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials, **Journal Fuel.**, v.116, p. 471–477, 2014.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

SONAI, G. G. *et al.* The application of textile sludge adsorbents for the removal of Reactive Red 2 dye. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 149-156, 2016.

SOUTO, T. J. M. P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no Agreste pernambucano**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2017.

SOUZA, J. A. C.; LUCENA, C. L. F. L. Estudo da aplicação da mistura solo-lodo têxtil em base e sub-base de pavimentos. *In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*

DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, X, 2012, Campina Grande. **Anais** [...]. Campina Grande/ PB, 2012.

SOUZA, J.N.; RODRIGUES, J.K.G; SOUZA NETO, P.N. **Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente**. Local: Federação das Indústrias do Estado do Ceará – IEL, 1998.

SPECHT, L. P.; PALUDO, I.; CERATTI, J. A. P. Utilização de borracha reciclada como agregado de concreto asfáltico: avaliação laboratorial. *In*: ENCONTRO DO ASFALTO, 16., 2002, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Horta Barbosa, 2002. p. 1-8.

SUNG DO, H.; HEE MUN, P.; SUK KEUN, R. A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime. **Waste Management**, v. 28, n. 1, p. 191-199, 2008.

TAYLOR, M. A.; KHOSLA, N. P. State of the art: Stripping on asphalt pavement. **Transportation Research Record**, n. 911, 1983.

TINTI, A. *et al.* O. Recent applications of vibrational mid-Infrared (IR) spectroscopy for studying soil components: a review. **Journal of Central European Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 1-22, 2015.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO (PERNAMBUCO). **Edital\_151\_2019 (2019)**. Disponível em: [https://sistemas.tce.pe.gov.br/audinArquivos/licon/processo\\_licitatorio/edital/151/LICON\\_Edital\\_151\\_2019\\_40\\_823566.pdf](https://sistemas.tce.pe.gov.br/audinArquivos/licon/processo_licitatorio/edital/151/LICON_Edital_151_2019_40_823566.pdf). Acesso em: 15 abr. 2021.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO (PERNAMBUCO). **Portal Tome Conta (2020)**. Disponível em: <https://sistemas.tce.pe.gov.br/tomeconta> Acesso em: 15 abr. 2021.

VASUDEVAN, G. Performance on coal bottom ash in hot mix asphalt. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 2, issue 08, p. 25 – 33, 2013.

VELUMANI, P.; SENTHILK. S.; PREMALATHA, P. An Innovative Approach to Evaluate the Performance of Sludge-Incorporated Fly Ash Bricks. **Journal of Testing and Evaluation**., v.44, p. 2014-0508, 2016.

VISHAL, S., SATISH, C., & RAJAN, C. Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 22(12), 1209–1216, 2010.

WOSZUK, A. *et al.* Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 493-502, 2019.

WRÓBEL, M. *et al.* Properties of reclaimed asphalt pavement mixture with organic rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v.271, n.15, p. 121514, 2020.

XIE, J. *et al.* Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 340-346, 2012.

XUE, Y. *et al.* Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 7-15, 2014.

XUE, YONGJIE, HOU, H., ZHU, S., & ZHA, J. Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. **Construction and Building Materials**, 23(2), 989–996, 2009.

YILMAZ, M.; KÖK, B. V.; KULOĞLU, N. Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4279-4286, 2011.

ZAINUDIN, M. Z. M. *et al.* Effect of Sugarcane Bagasse Ash as Filler in Hot Mix Asphalt. **Materials Science Forum**, v. 846, p. 683-689, 2016.

ZANONI, S. M. **Reutilização de resíduos de indústria têxtil como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2013. 18 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Estágio) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma/SC, 2013.

ZHAN, B. *et al.* Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: Physicochemical interactions between sludge and cement. **Journal of Hazardous Materials**, v.381, n.5, p. 121034, 2019.

ZHAN, B.; POON, C. S. Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 174-179, 2015.

ZOOROB, S. E., & CABRERA, J. G. Design and Construction of A Road Pavement Using Fly-Ash in Hot Rolled Asphalt. In J. J. M. Goumans, G. J. Senden, & H.A. B. T.-S. in E. S. van der Sloot (Eds.), **Waste Materials in Construction** (Vol. 71,pp. 149–165), 1997.

## APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS

Tabela A1 - Composição granulométrica da mistura com 0% de lodo têxtil

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		LODO TÊXTIL		FAIXA "C"		
	15,0% % PASS.	% MIST. 15,0 %	30,0% %PASS	% MIST 30,0%	55,0% % PASS.	% MIST. 55%	0% % PASS.	% MIST. 0%	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
1"	100,0	15,0	100,0	30,0	100,0	55,0			100	100,0	100
3/4"	100,0	15,0	100,0	30,0	100,0	55,0			100	100,0	100
1/2"	46,1	6,9	100,0	30,0	100,0	55,0			80	91,9	100
3/8"	18,1	2,7	82,5	24,8	100,0	55,0			70	82,5	90
4	0,0	0,0	6,2	1,9	99,3	54,6			44	56,5	72
10	0,0	0,0	2,1	0,6	70,0	38,5			22	39,1	50
40	0,0	0,0	1,7	0,5	34,3	18,9			8	19,4	26
80	0,0	0,0	1,2	0,4	20,0	11,0			4	11,4	16
200	0,0	0,0	0,2	0,1	7,2	4,0			2	4,0	10

Fonte: O autor (2021).

Tabela A2 - Composição granulométrica da mistura com 2% de lodo têxtil

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		LODO TÊXTIL		FAIXA "C"		
	12,0% % PASS.	% MIST. 12,0%	30,0% %PASS	% MIST 30,0%	56,0% % PASS.	% MIST. 55%	2,0% % PASS.	% MIST. 2,0%	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
1"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	56,0	100,0	2,0	100	100,0	100
3/4"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	56,0	100,0	2,0	100	100,0	100
1/2"	46,1	5,5	100,0	30,0	100,0	56,0	100,0	2,0	80	93,5	100
3/8"	18,1	2,2	82,5	24,8	100,0	56,0	100,0	2,0	70	84,9	90
4	0,0	0,0	6,2	1,9	99,3	55,6	100,0	2,0	44	59,5	72
10	0,0	0,0	2,1	0,6	70,0	39,2	100,0	2,0	22	41,8	50
40	0,0	0,0	1,7	0,5	34,3	19,2	100,0	2,0	8	21,7	26
80	0,0	0,0	1,2	0,4	20,0	11,2	100,0	2,0	4	13,6	16
200	0,0	0,0	0,2	0,1	7,2	4,0	100,0	2,0	2	6,1	10

Fonte: O autor (2021).

Tabela A3 - Composição granulométrica da mistura com 3,0% de lodo têxtil

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		LODO TÊXTIL		FAIXA "C"		
	12,0% % PASS.	% MIST. 12,0%	30,0% %PASS	% MIST 30,0%	55,0% % PASS.	% MIST. 54%	3,0% % PASS.	% MIST. 3,0%	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
1"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	55,0	100,0	3,0	100	100,0	100
3/4"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	55,0	100,0	3,0	100	100,0	100
1/2"	46,1	5,5	100,0	30,0	100,0	55,0	100,0	3,0	80	93,5	100
3/8"	18,1	2,2	82,5	24,8	100,0	55,0	100,0	3,0	70	84,9	90
4	0,0	0,0	6,2	1,9	99,3	54,6	100,0	3,0	44	59,5	72
10	0,0	0,0	2,1	0,6	70,0	38,5	100,0	3,0	22	42,1	50
40	0,0	0,0	1,7	0,5	34,3	18,9	100,0	3,0	8	22,4	26
80	0,0	0,0	1,2	0,4	20,0	11,0	100,0	3,0	4	14,4	16
200	0,0	0,0	0,2	0,1	7,2	4,0	100,0	3,0	2	7,0	10

Fonte: O autor (2021).

Tabela A4 - Composição granulométrica da mistura com 4,0% de lodo têxtil

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		LODO TÊXTIL		FAIXA "C"		
	12,0% % PASS.	% MIST. 12,0%	30,0% %PASS	% MIST 30,0%	54,0% % PASS.	% MIST. 54%	4,0% % PASS.	% MIST. 4,0%	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
1"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	54,0	100,0	4,0	100	100,0	100
3/4"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	54,0	100,0	4,0	100	100,0	100
1/2"	46,1	5,5	100,0	30,0	100,0	54,0	100,0	4,0	80	93,5	100
3/8"	18,1	2,2	82,5	24,8	100,0	54,0	100,0	4,0	70	84,9	90
4	0,0	0,0	6,2	1,9	99,3	53,6	100,0	4,0	44	59,5	72
10	0,0	0,0	2,1	0,6	70,0	37,8	100,0	4,0	22	42,4	50
40	0,0	0,0	1,7	0,5	34,3	18,5	100,0	4,0	8	23,0	26
80	0,0	0,0	1,2	0,4	20,0	10,8	100,0	4,0	4	15,2	16
200	0,0	0,0	0,2	0,1	7,2	3,9	100,0	4,0	2	7,9	10

Fonte: O autor (2021).

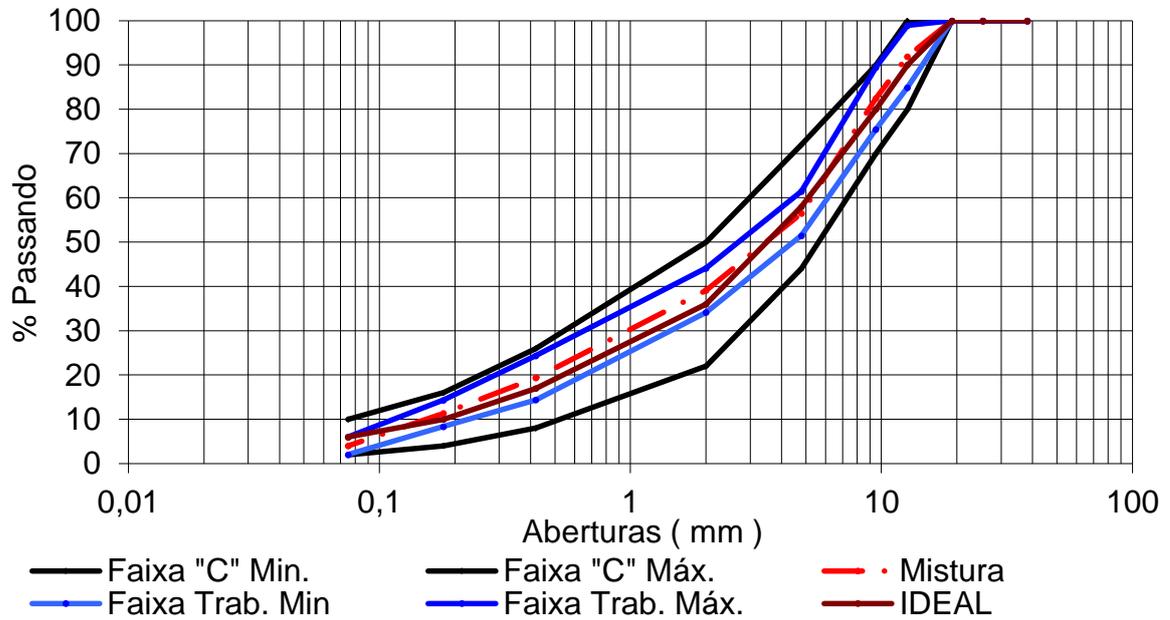
Tabela A5 - Composição granulométrica da mistura com 5,0% de lodo têxtil

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		LODO TÊXTIL		FAIXA "C"		
	12,0% % PASS.	% MIST. 12,0%	30,0% %PASS	% MIST 30,0%	53,0% % PASS.	% MIST. 54%	5,0% % PASS.	% MIST. 5,0%	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
1"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	53,0	100,0	5,0	100	100,0	100
3/4"	100,0	12,0	100,0	30,0	100,0	53,0	100,0	5,0	100	100,0	100
1/2"	46,1	5,5	100,0	30,0	100,0	53,0	100,0	5,0	80	93,5	100
3/8"	18,1	2,2	82,5	24,8	100,0	53,0	100,0	5,0	70	84,9	90
4	0,0	0,0	6,2	1,9	99,3	52,6	100,0	5,0	44	59,5	72
10	0,0	0,0	2,1	0,6	70,0	37,1	100,0	5,0	22	42,7	50
40	0,0	0,0	1,7	0,5	34,3	18,2	100,0	5,0	8	23,7	26
80	0,0	0,0	1,2	0,4	20,0	10,6	100,0	5,0	4	16,0	16
200	0,0	0,0	0,2	0,1	7,2	3,8	100,0	5,0	2	8,9	10

Fonte: O autor (2021).

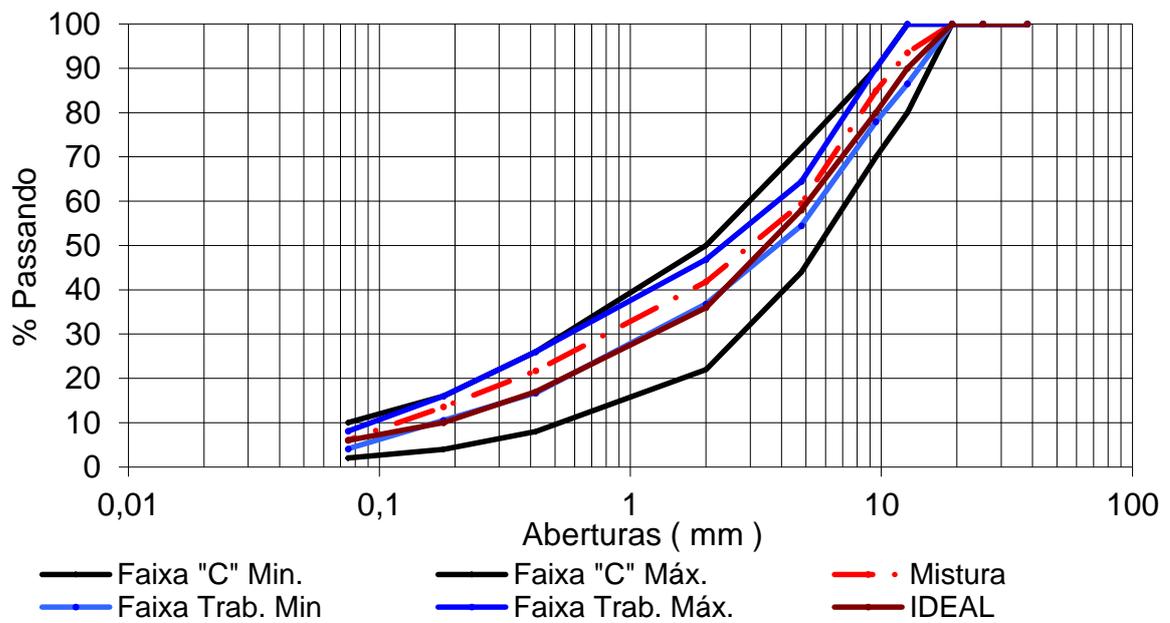
## APÊNDICE B - CURVAS GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS

Figura B1 - Curva granulométrica, faixa "C" com 0% de lodo têxtil



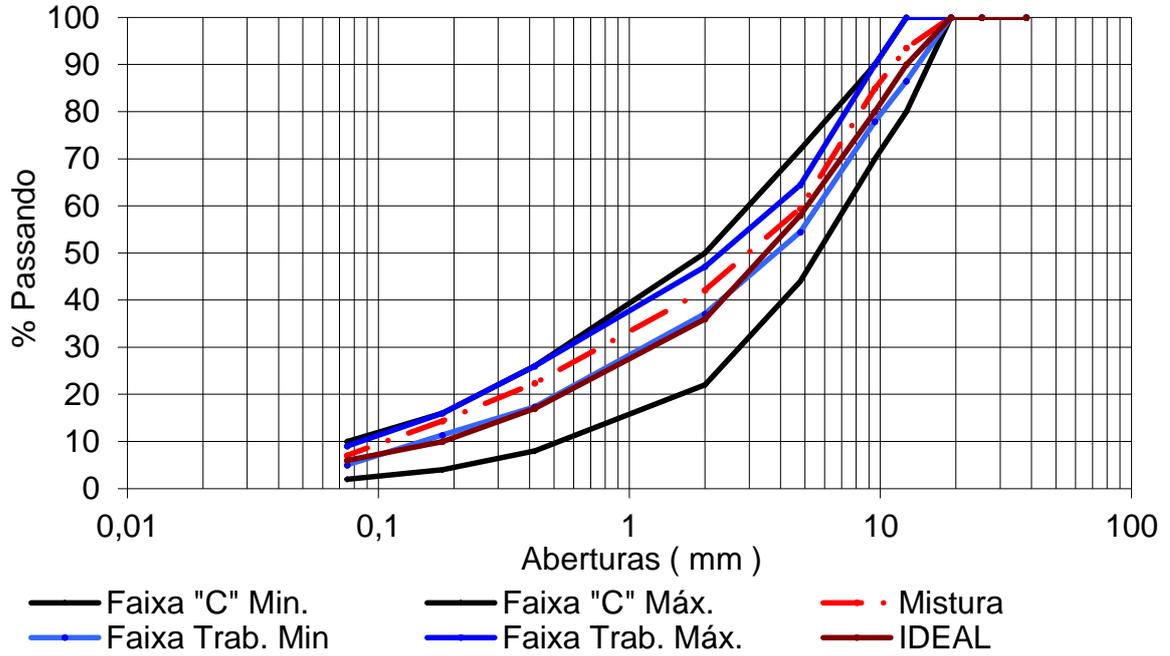
Fonte: O autor (2021).

Figura B2 - Curva granulométrica, faixa "C" com 2,0% de lodo têxtil



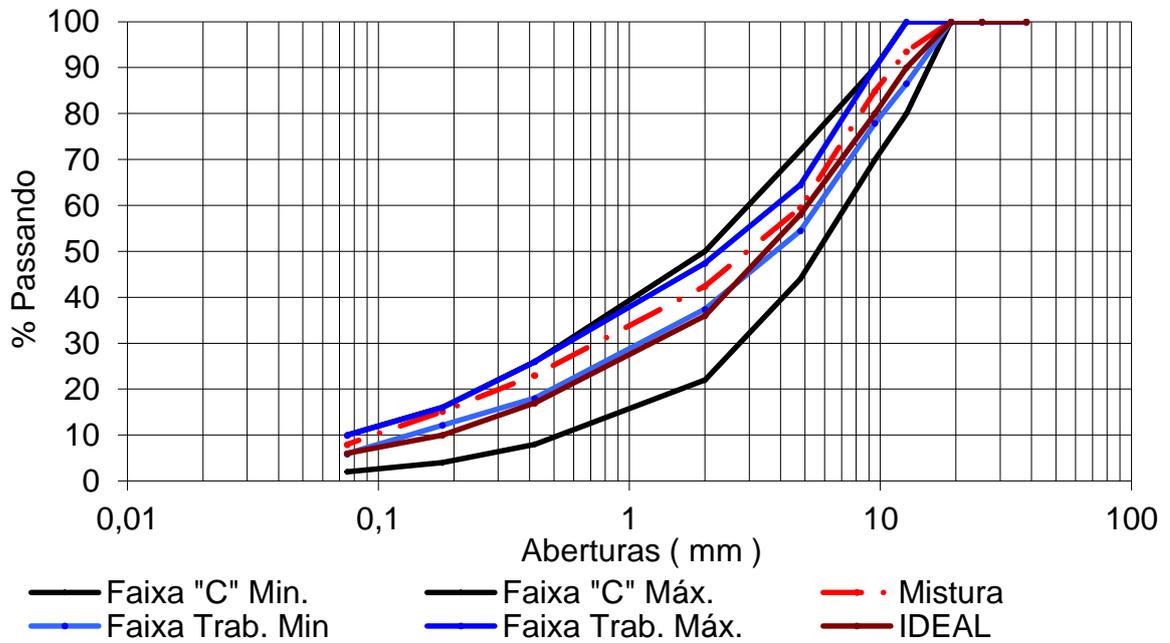
Fonte: O autor (2021).

Figura B3 - Curva granulométrica, faixa "C" com 3,0% de lodo têxtil



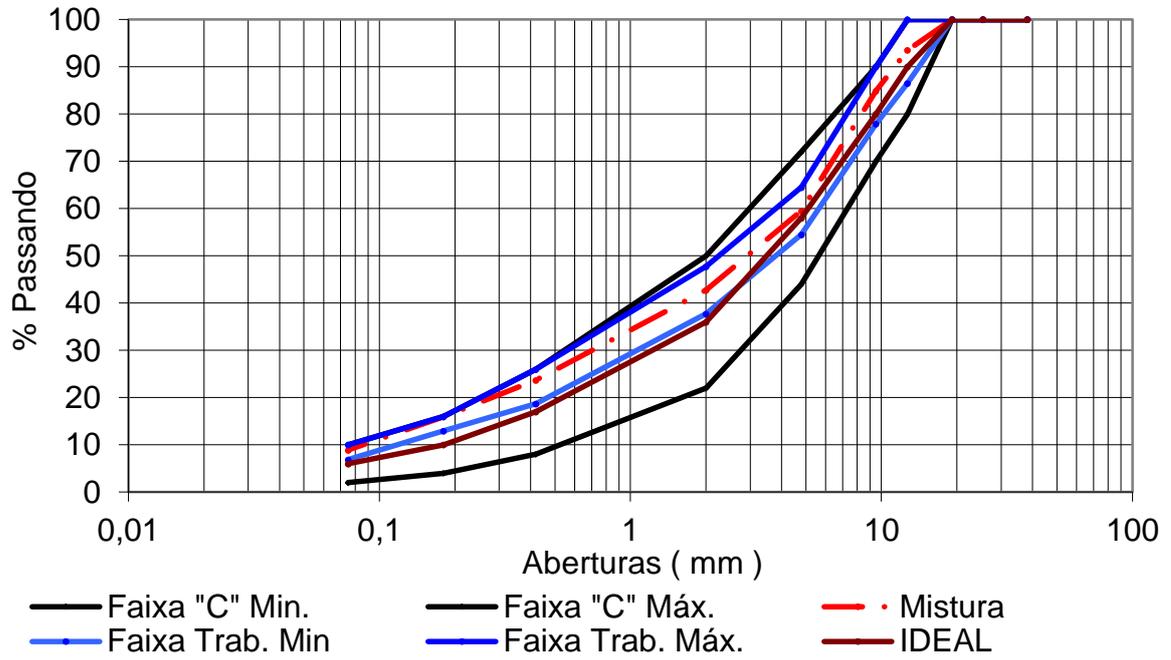
Fonte: O autor (2021).

Figura B4 - Curva granulométrica, faixa "C" com 4,0% de lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

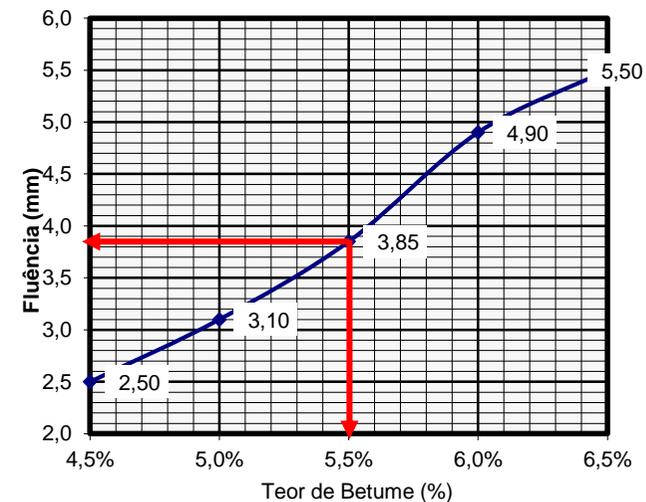
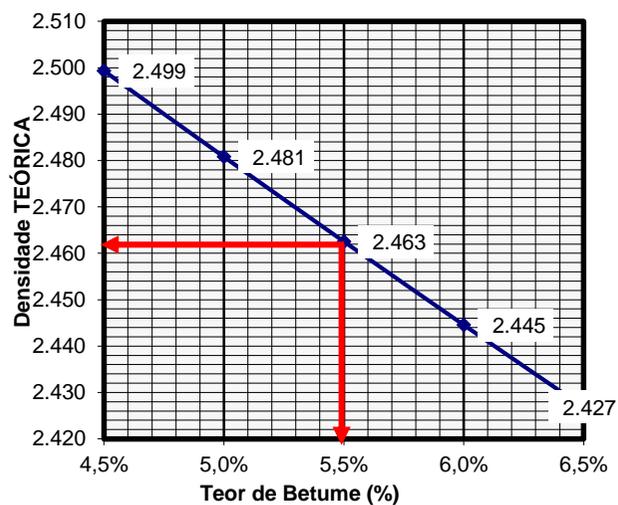
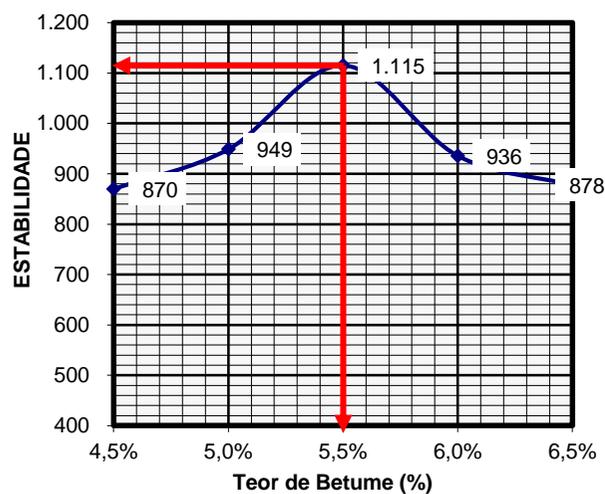
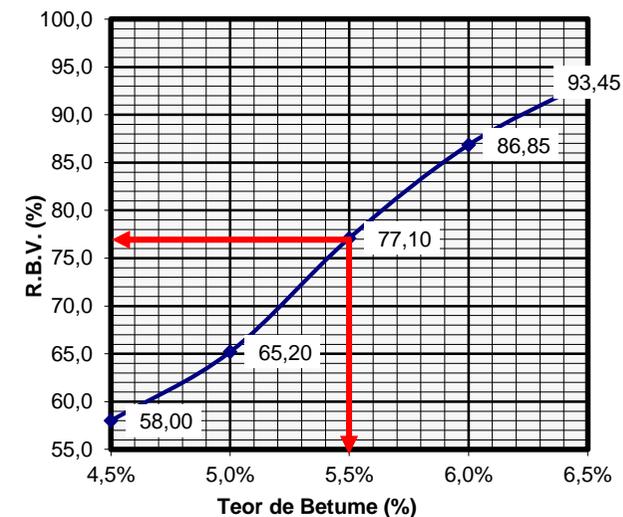
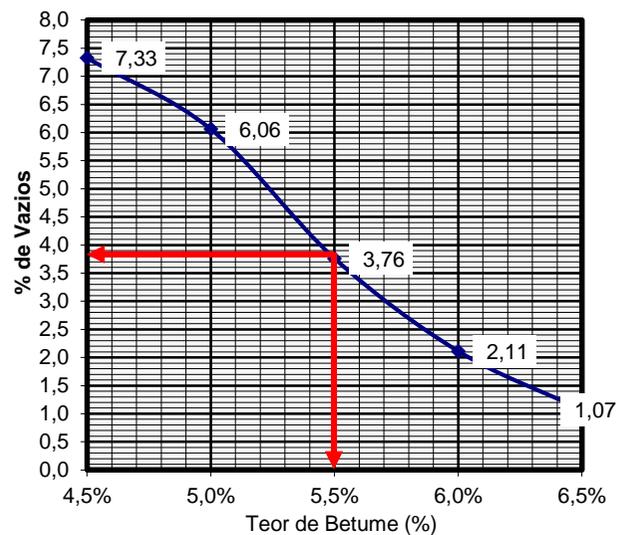
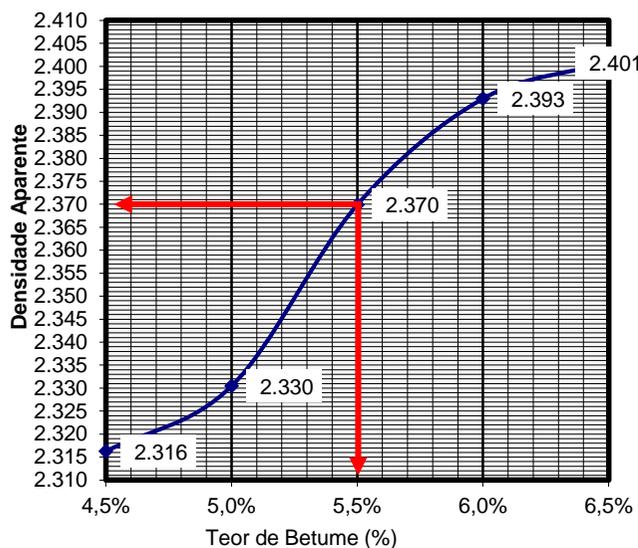
Figura B5 - Curva granulométrica, faixa "C" com 5,0% de lodo têxtil



Fonte: O autor (2021).

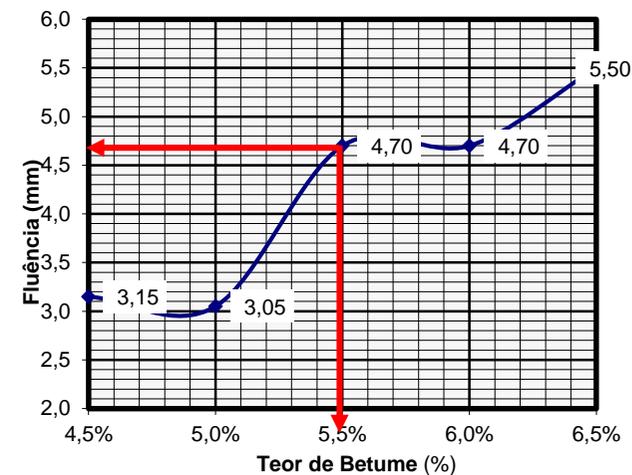
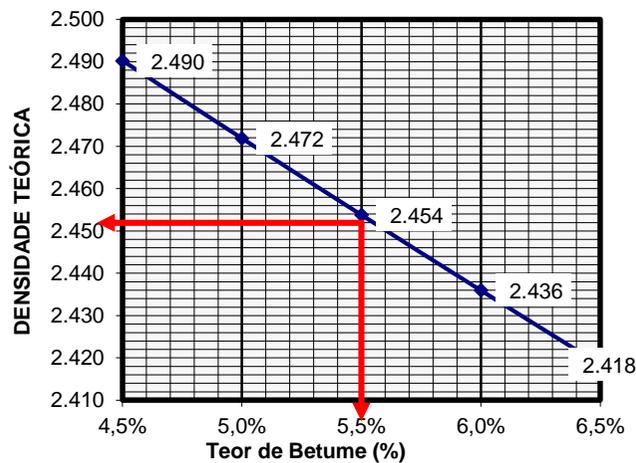
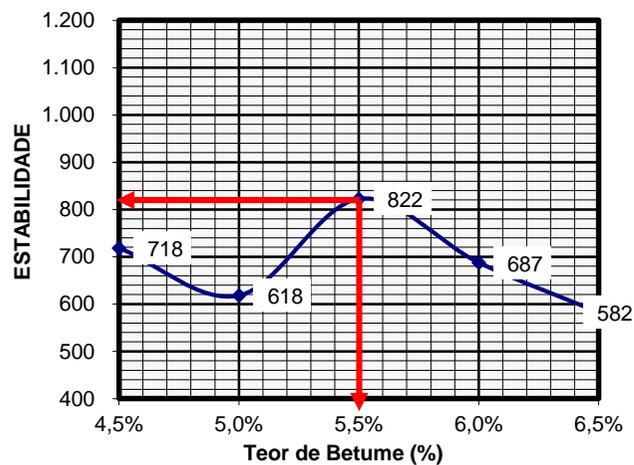
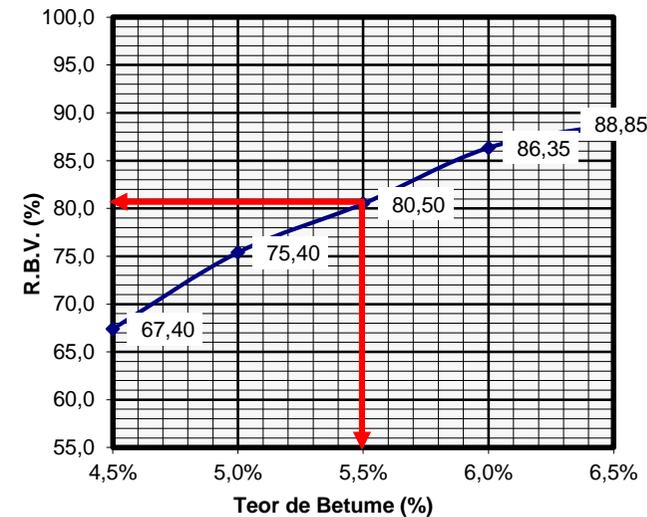
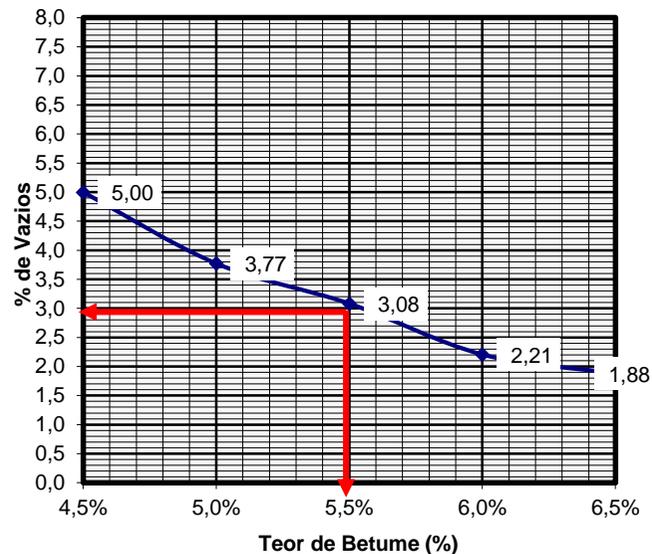
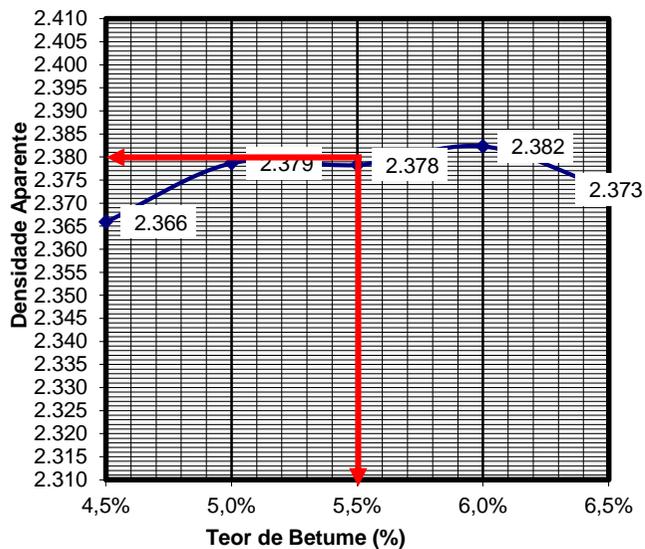
### APÊNDICE C – PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DA DOSAGEM MARSHALL

Figura C1 - Parâmetros de dosagem para 0% de adição de lodo têxtil



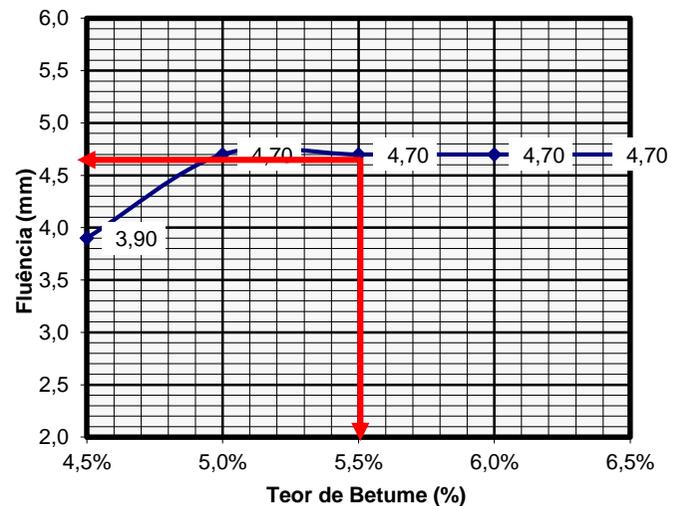
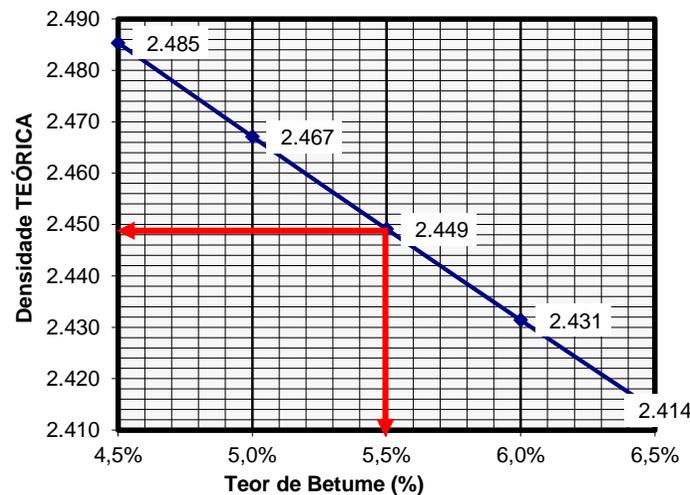
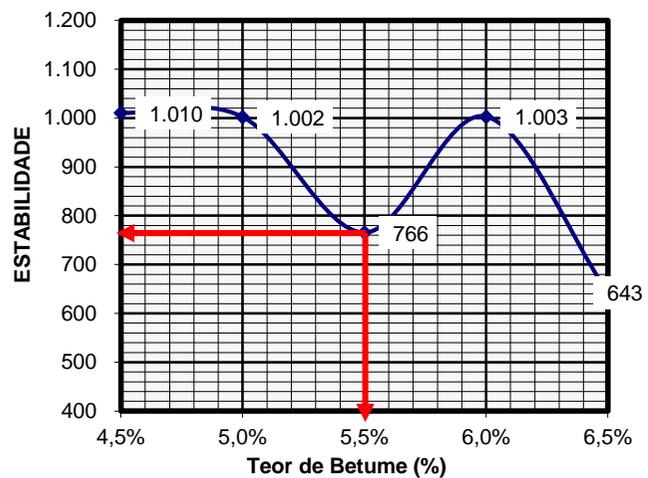
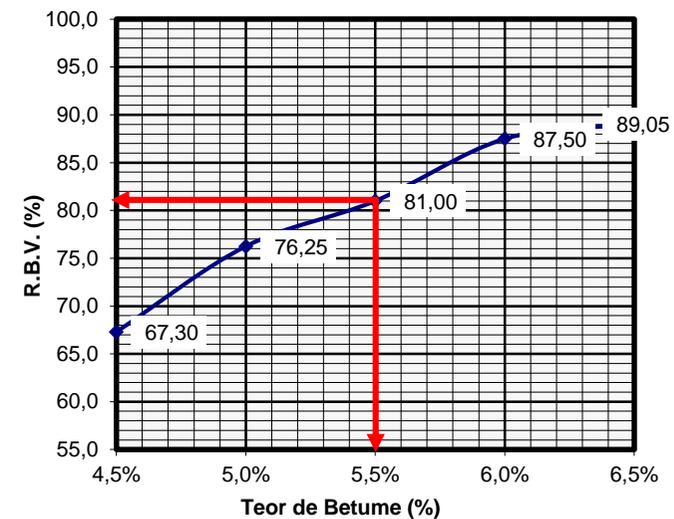
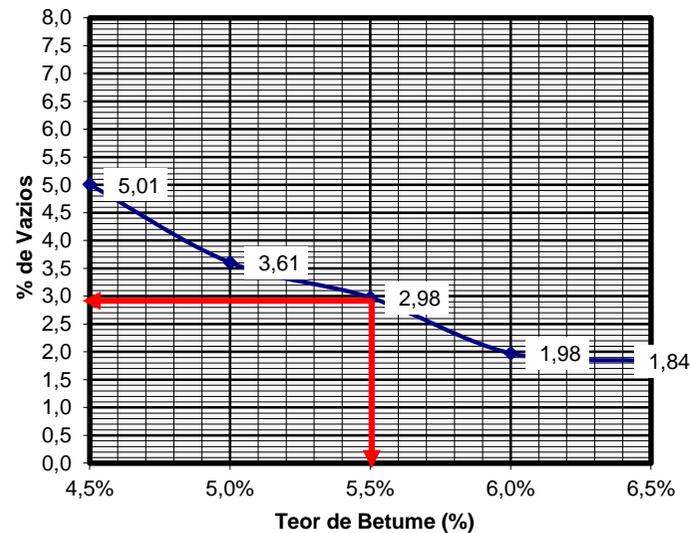
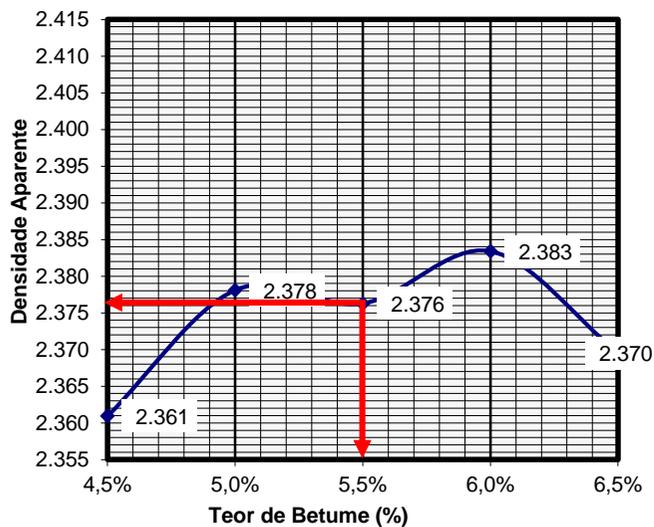
Fonte: O autor (2021).

Figura C2 - Parâmetros de dosagem para 2,0% de adição de lodo têxtil (lodo cap)



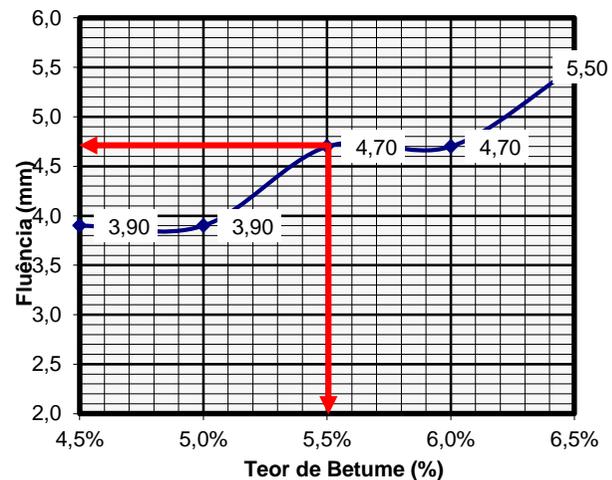
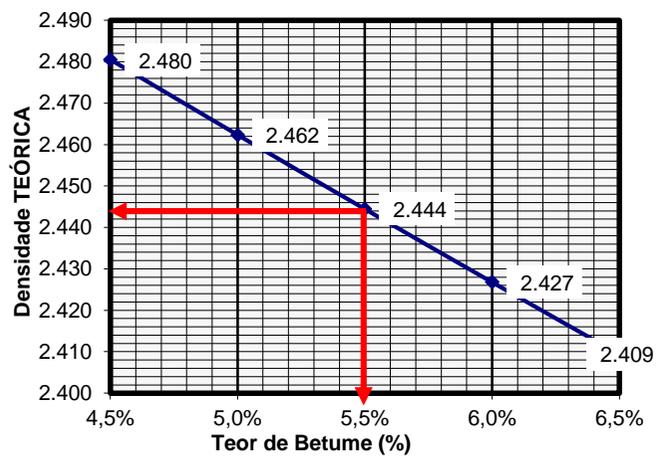
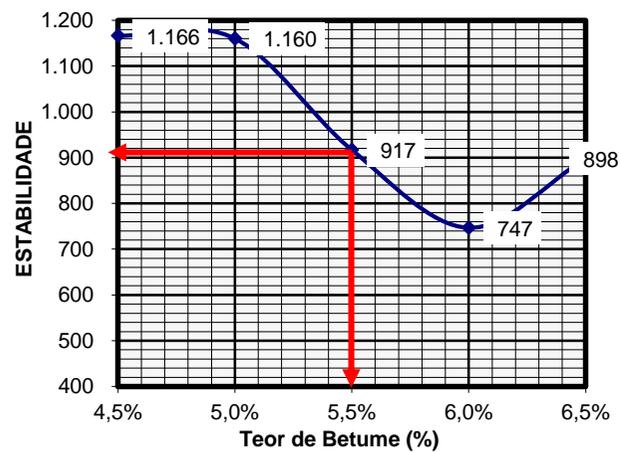
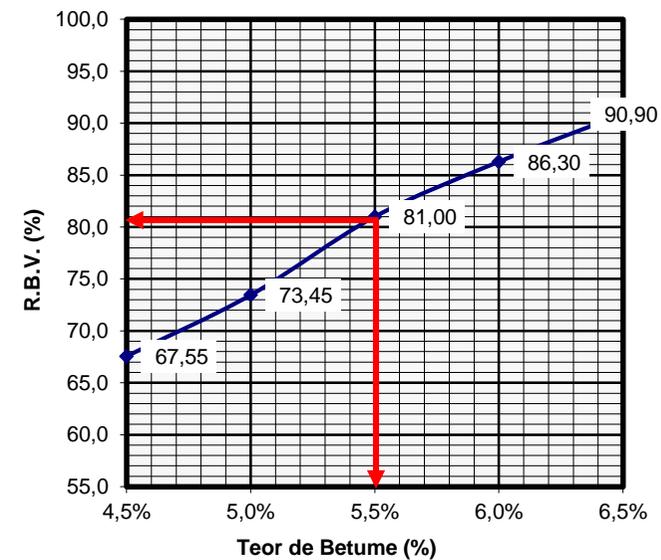
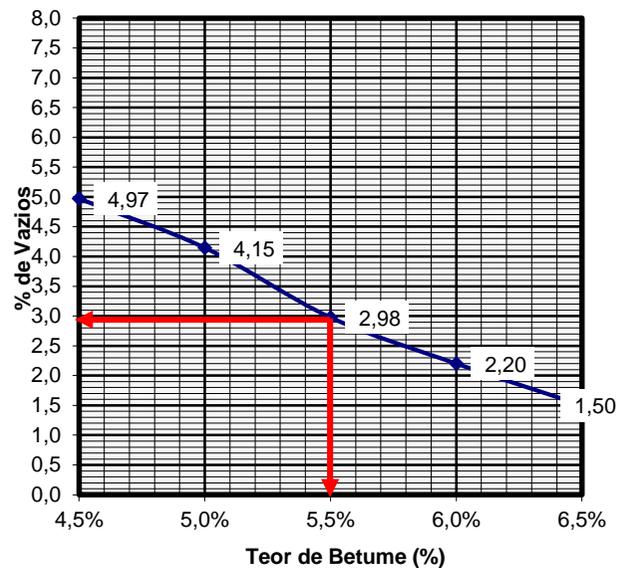
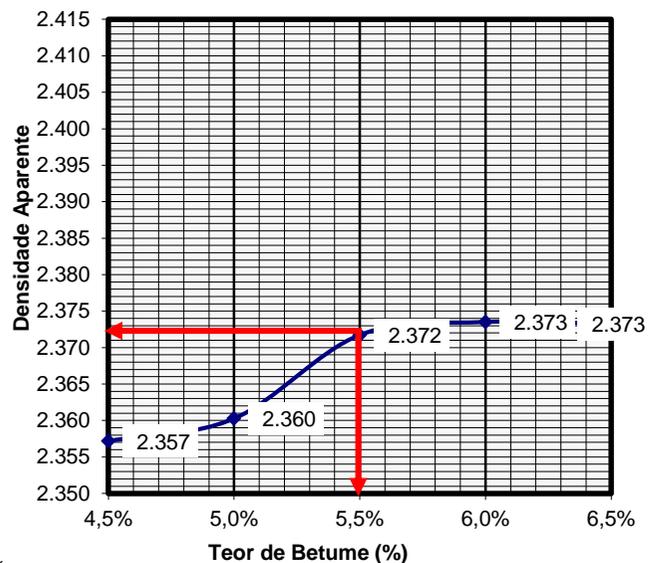
Fonte: O autor (2021).

Figura C3 - Parâmetros de dosagem para 3,0% de adição de lodo têxtil (lodo cap)



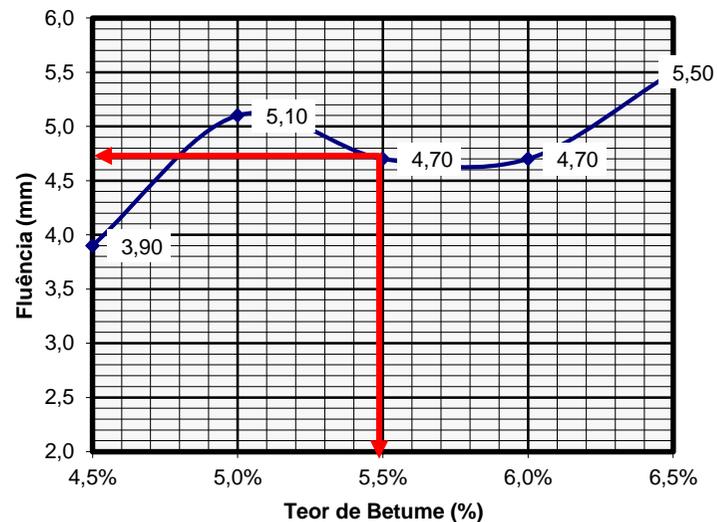
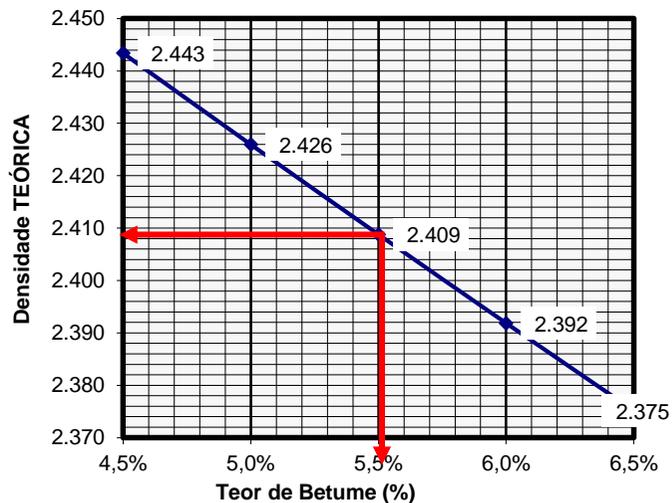
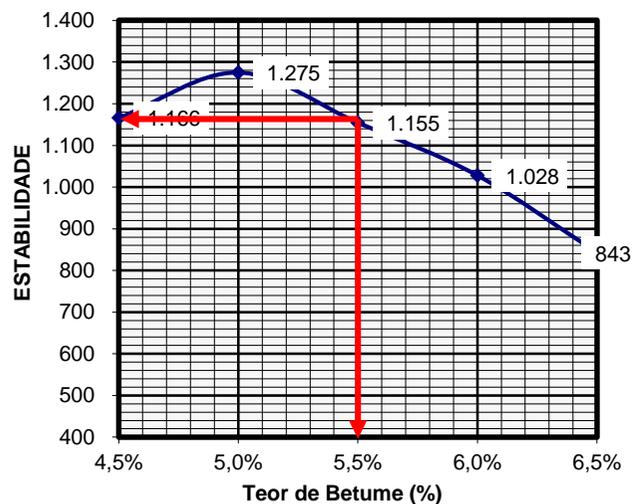
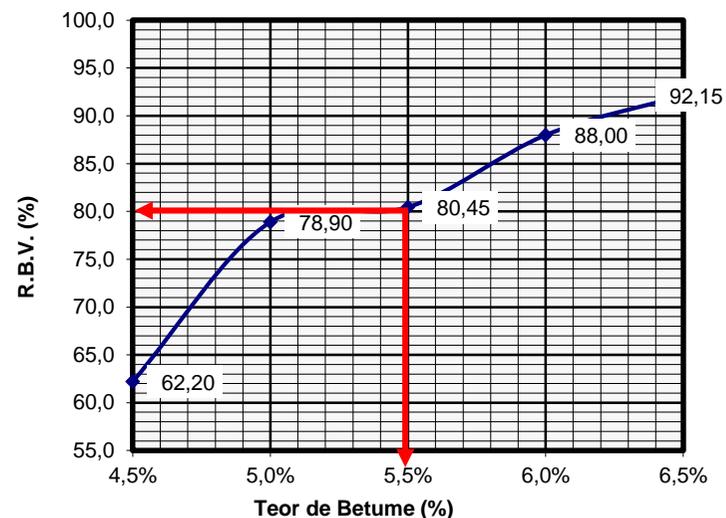
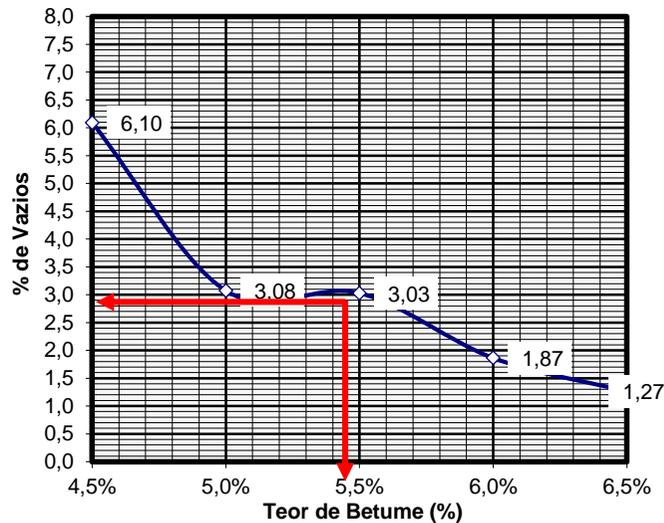
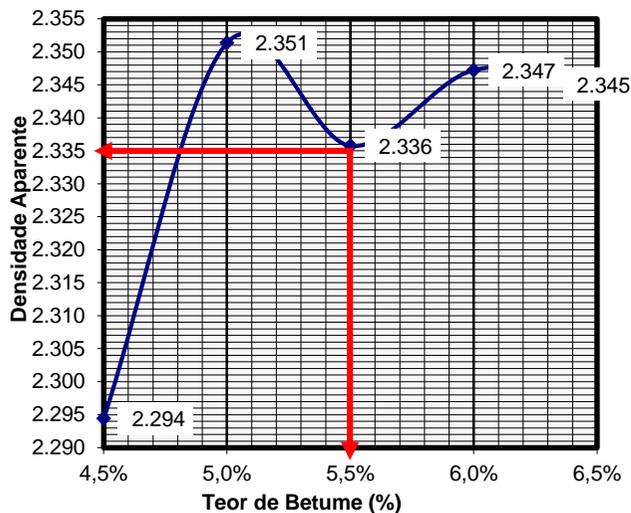
Fonte: O autor (2021).

Figura C4 - Parâmetros de dosagem para 4,0% de adição de lodo têxtil (lodo cap)



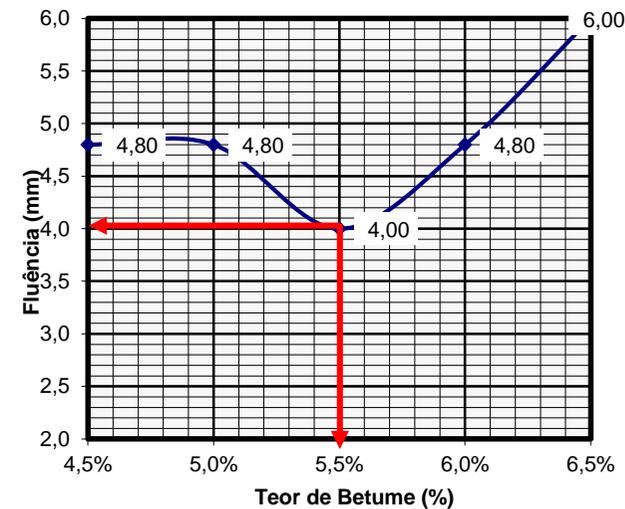
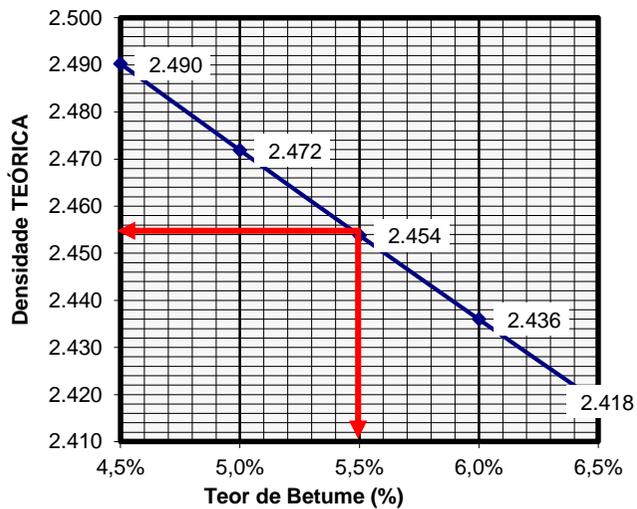
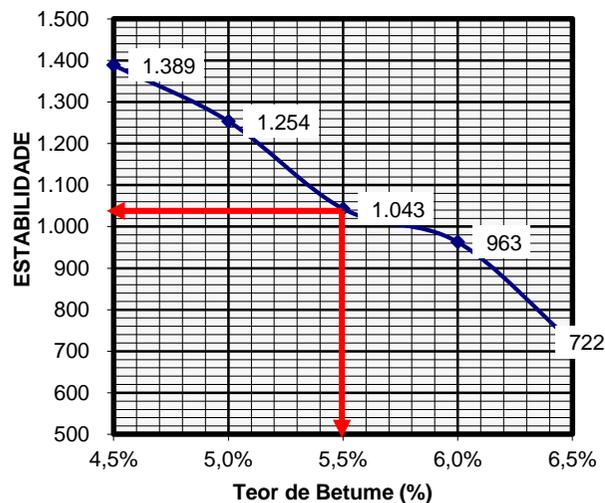
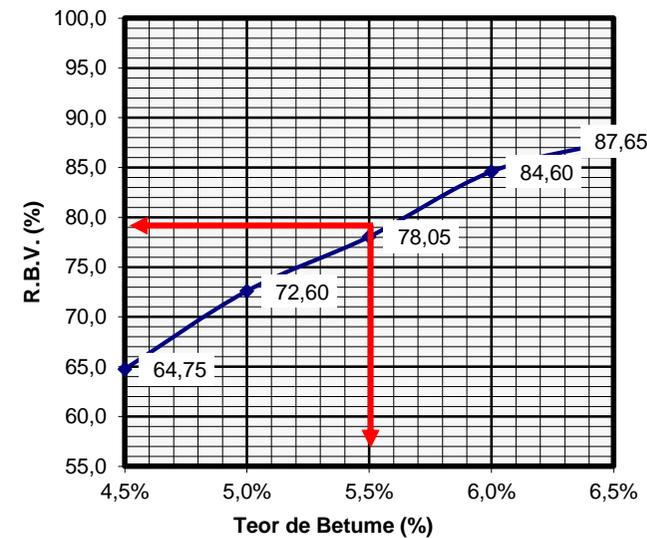
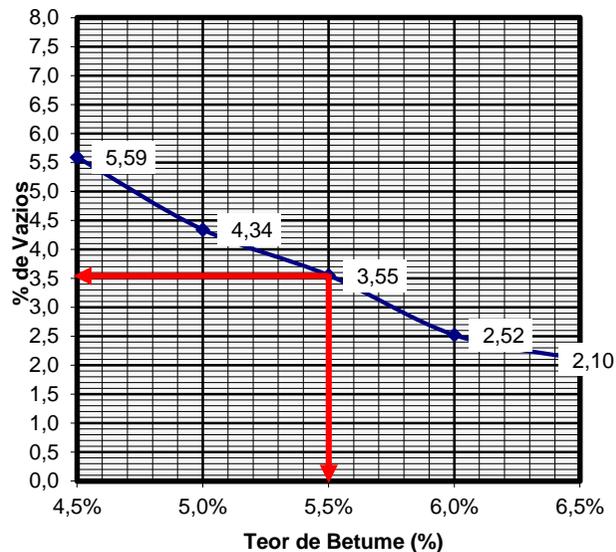
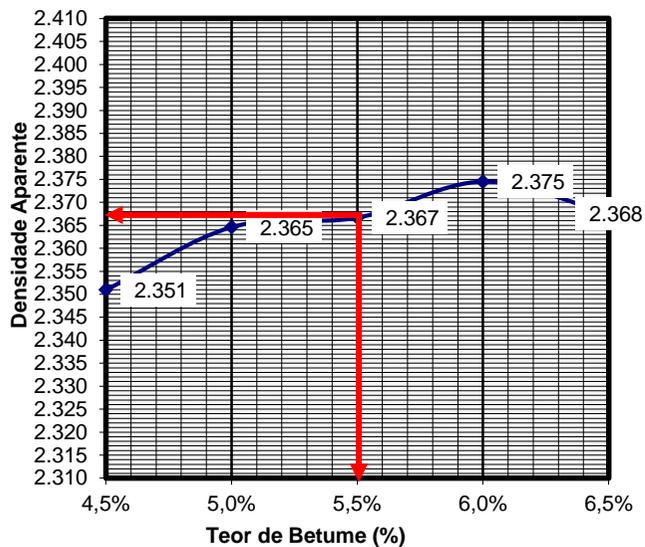
Fonte: O autor (2021).

Figura C5 - Parâmetros de dosagem para 5,0% de adição de lodo têxtil (lodo cap)



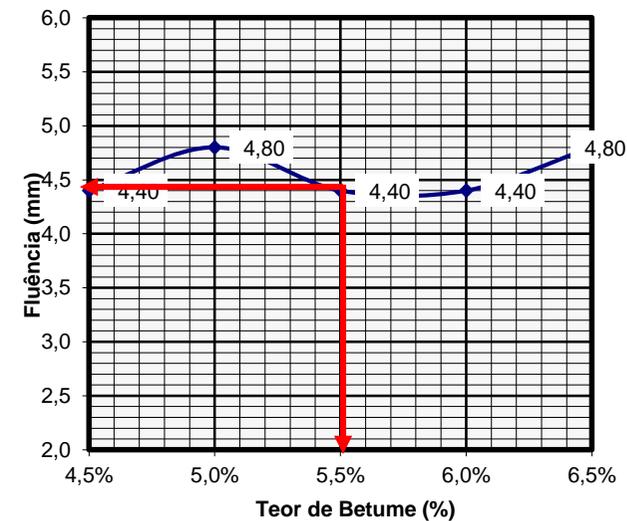
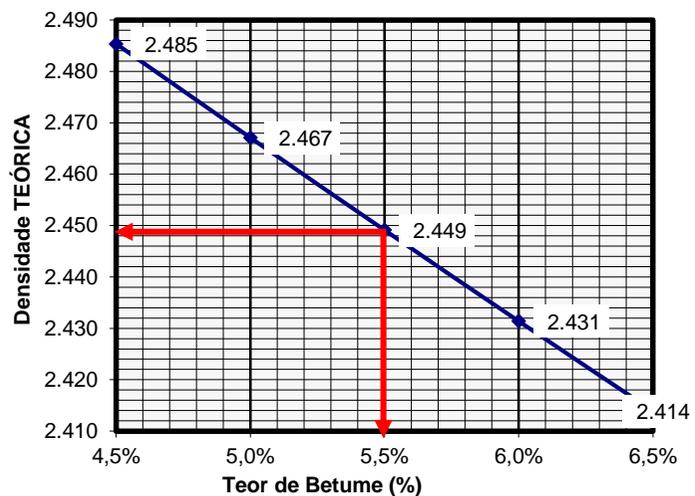
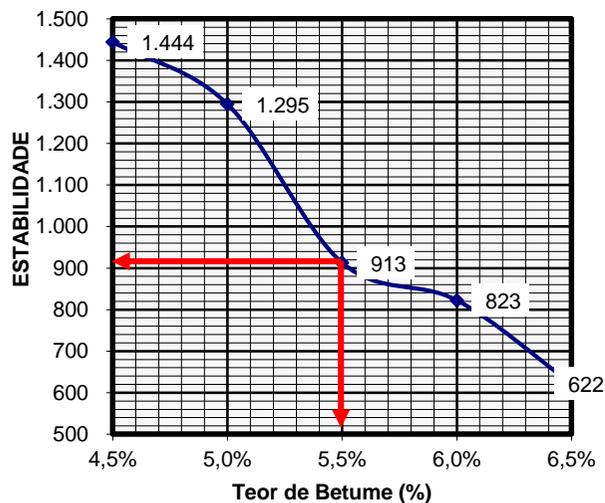
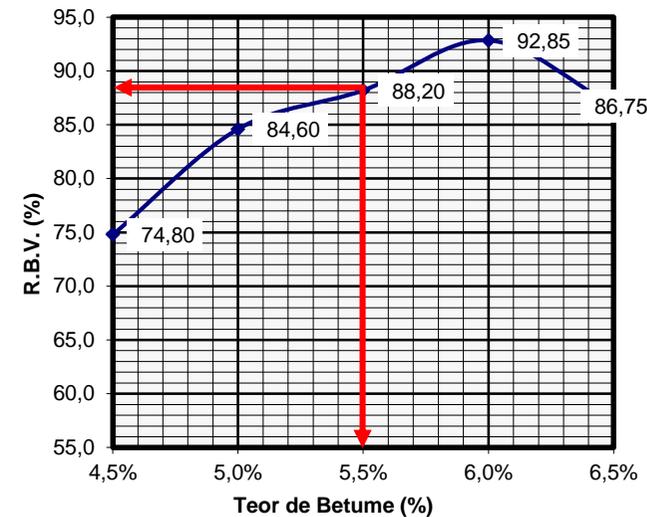
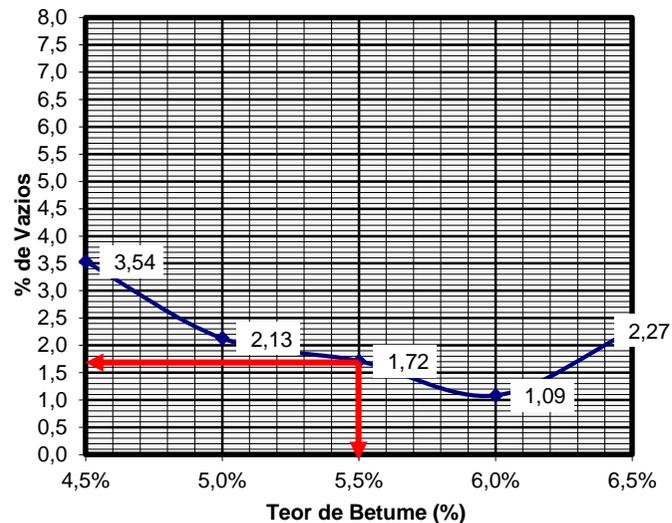
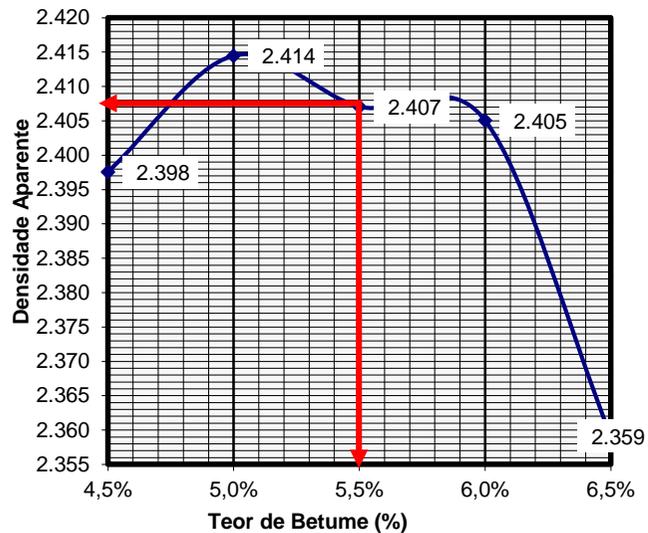
Fonte: O autor (2021).

Figura C6 - Parâmetros de dosagem para 2,0% de adição de lodo têxtil (lodo seco)



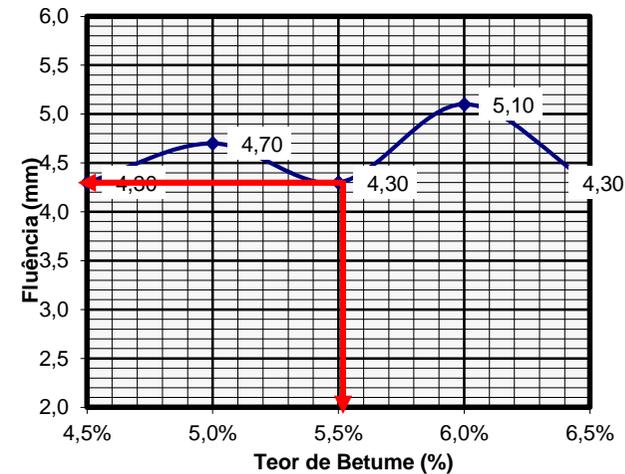
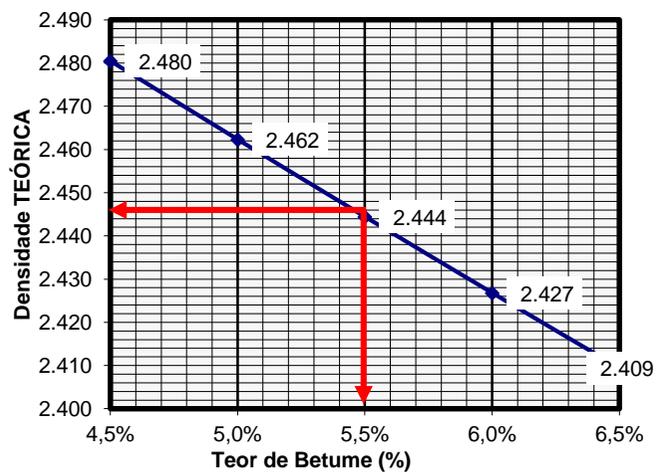
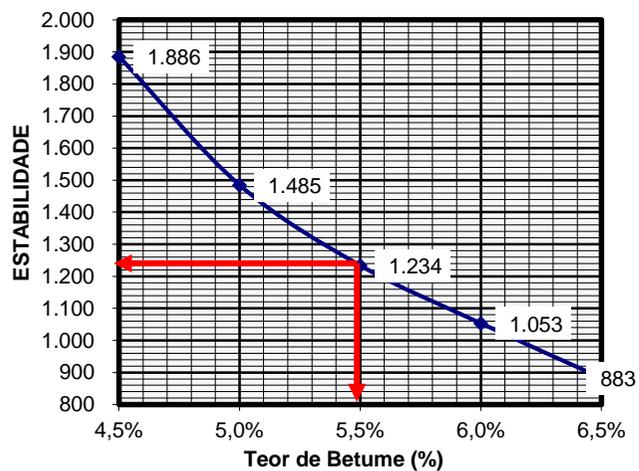
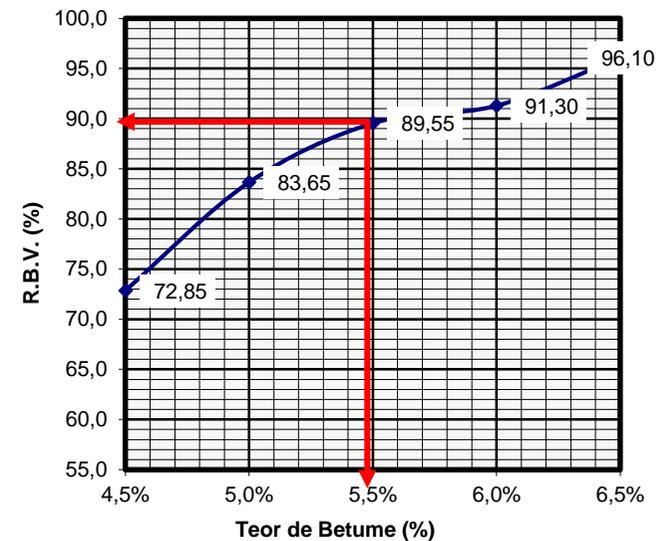
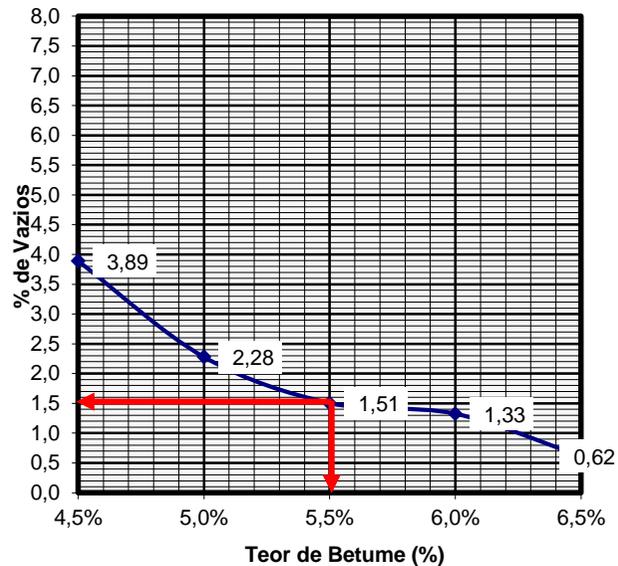
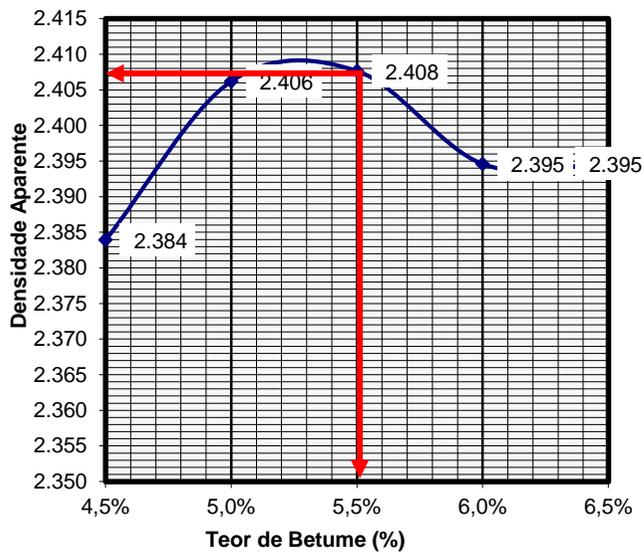
Fonte: O autor (2021).

Figura C7 - Parâmetros de dosagem para 3,0% de adição de lodo têxtil (lodo seco)



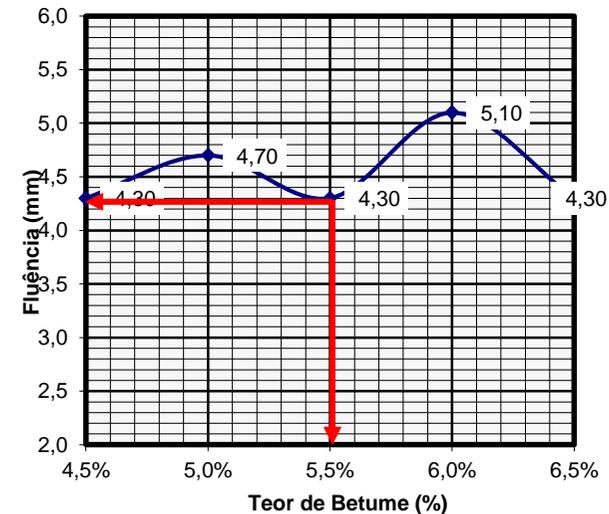
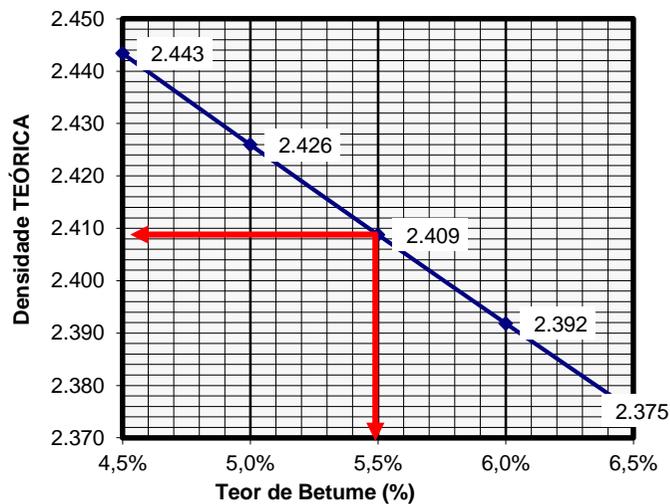
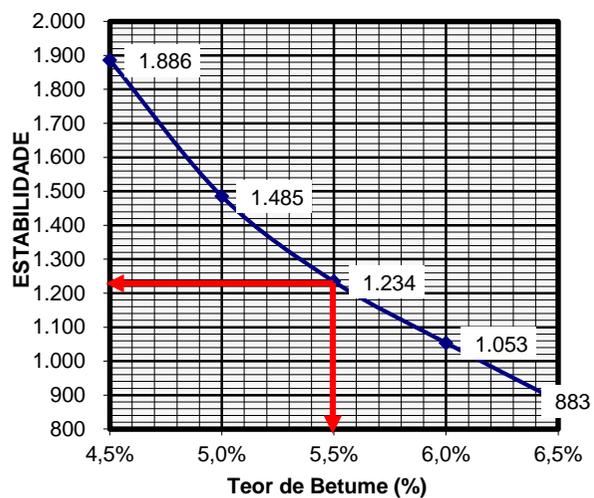
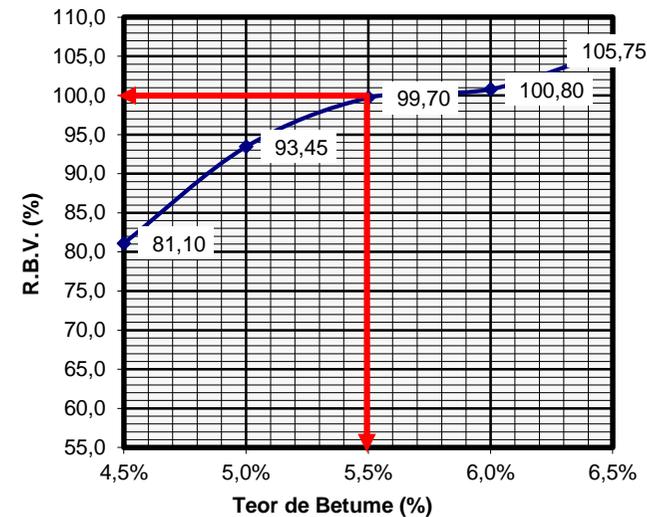
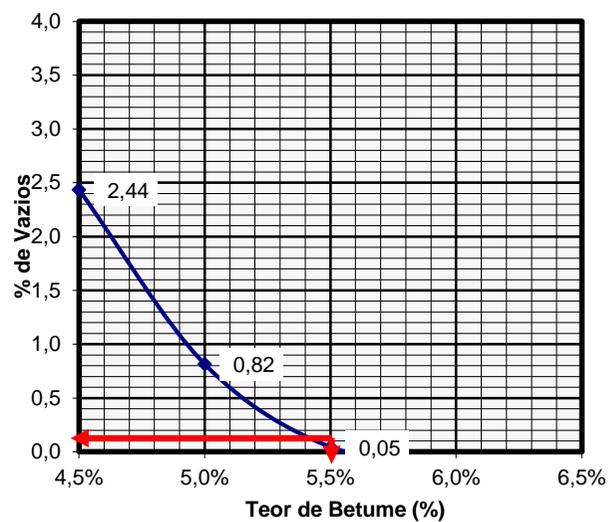
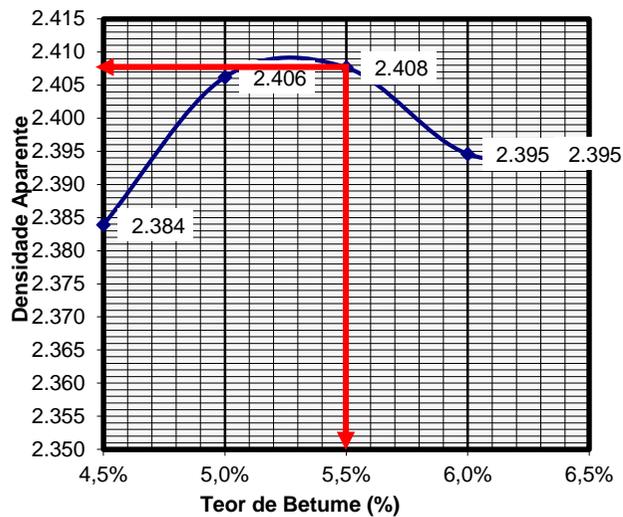
Fonte: O autor (2021).

Figura C8 - Parâmetros de dosagem para 4,0% de adição de lodo têxtil (lodo seco)



Fonte: O autor (2021).

Figura C9 - Parâmetros de dosagem para 5,0% de adição de lodo têxtil (lodo seco)



Fonte: O autor (2021).

## APÊNDICE D – VALORES E STATUS DO TESTE F E T- STUDENT

Tabela D1 - Análise estatística do ensaio de resistência à tração

COMPARAÇÃO	TESTE F	VARIÂNCIAS	TESTE T	EQUIVALÊNCIA
SEM LODO - LODO SECO 2%	0,045454545	Diferentes	0,39518022	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 2%	0,771428571	Iguais	0,32877037	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 3%	0,934782609	Iguais	0,075510583	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 2%	0,071428571	Iguais	0,362329318	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 3%	0,04	Diferentes	0,081467803	Equivalentes
LODO CAP 2% - LODO CAP 3%	0,710526316	Iguais	0,105086789	Equivalentes

Fonte: O autor (2021).

Tabela D2 - Análise estatística do Módulo de Resiliência - DNIT

COMPARAÇÃO	TESTE F	VARIÂNCIAS	TESTE T	EQUIVALÊNCIA
SEM LODO - LODO SECO 2%	0,55436452	Iguais	0,268589	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 2%	0,15125628	Iguais	0,256022	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 3%	0,0161179	Diferentes	0,288062	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 2%	0,35167595	Iguais	0,475091	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 3%	0,04149359	Diferentes	0,070194	Equivalentes
LODO CAP 2% - LODO CAP 3%	0,18066297	Iguais	0,004645	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D3 - Análise estatística do Módulo de Resiliência - ASTM

COMPARAÇÃO	TESTE F	VARIÂNCIAS	TESTE T	EQUIVALÊNCIA
SEM LODO - LODO SECO 2%	0,38110975	Iguais	0,338393	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 2%	0,05617485	Iguais	0,371409	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 3%	0,02084861	Diferentes	0,230031	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 2%	0,21867324	Iguais	0,397929	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 3%	0,08566122	Iguais	0,023512	Diferença significativa
LODO CAP 2% - LODO CAP 3%	0,53427594	Iguais	0,001559	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D4 - Análise estatística do ensaio Cântabro

COMPARAÇÃO	TESTE F	VARIÂNCIAS	TESTE T	EQUIVALÊNCIA
SEM LODO - LODO SECO 2%	0,948051948	Iguais	0,13732	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 2%	0,649523695	Iguais	0,375336	Equivalentes
SEM LODO - LODO CAP 3%	0,591923077	Iguais	0,008971	Diferença significativa
LODO SECO 2% - LODO CAP 2%	0,604771397	Iguais	0,271472	Equivalentes
LODO SECO 2% - LODO CAP 3%	0,549524564	Iguais	0,020604	Diferença significativa
LODO CAP 2% - LODO CAP 3%	0,932786407	Iguais	0,018301	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D5 - Análise estatística do ensaio de fadiga 40% RT

<b>COMPARAÇÃO</b>	<b>TESTE F</b>	<b>VARIÂNCIAS</b>	<b>TESTE T</b>	<b>EQUIVALÊNCIA</b>
<b>SEM LODO - LODO SECO 2%</b>	0,97659	Iguais	0,3979462	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 2%</b>	0,976357	Iguais	0,3940689	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 3%</b>	0,541826	Iguais	0,0083231	Diferença significativa
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 2%</b>	0,999766	Iguais	0,495962	Equivalentes
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 3%</b>	0,523527	Iguais	0,0117644	Diferença significativa
<b>LODO CAP 2% - LODO CAP 3%</b>	0,976436	Iguais	0,0119098	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D6 - Análise estatística do ensaio de fadiga 37,5% RT

<b>COMPARAÇÃO</b>	<b>TESTE F</b>	<b>VARIÂNCIAS</b>	<b>TESTE T</b>	<b>EQUIVALÊNCIA</b>
<b>SEM LODO - LODO SECO 2%</b>	0,975746	Iguais	0,3007807	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 2%</b>	0,991408	Iguais	0,0510984	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 3%</b>	0,9029	Iguais	0,0004377	Diferença significativa
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 2%</b>	0,832003	Iguais	0,1066659	Equivalentes
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 3%</b>	0,926981	Iguais	0,0005813	Diferença significativa
<b>LODO CAP 2% - LODO CAP 3%</b>	0,926981	Iguais	0,0008555	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D7 - Análise estatística do ensaio de fadiga 35% RT

<b>COMPARAÇÃO</b>	<b>TESTE F</b>	<b>VARIÂNCIAS</b>	<b>TESTE T</b>	<b>EQUIVALÊNCIA</b>
<b>SEM LODO - LODO SECO 2%</b>	0,976121	Iguais	0,3826767	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 2%</b>	0,589201	Iguais	0,1945359	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 3%</b>	0,273243	Iguais	0,0012018	Diferença significativa
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 2%</b>	0,569544	Iguais	0,2991476	Equivalentes
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 3%</b>	0,262169	Iguais	0,0016474	Diferença significativa
<b>LODO CAP 2% - LODO CAP 3%</b>	0,549565	Iguais	0,0006106	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D8 - Análise estatística do ensaio de fadiga 32,5% RT

<b>COMPARAÇÃO</b>	<b>TESTE F</b>	<b>VARIÂNCIAS</b>	<b>TESTE T</b>	<b>EQUIVALÊNCIA</b>
<b>SEM LODO - LODO SECO 2%</b>	0,97642	Iguais	0,1416543	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 2%</b>	0,7247	Iguais	0,0858465	Equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 3%</b>	0,901844	Iguais	0,0033862	Diferença significativa
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 2%</b>	0,746635	Iguais	0,2932106	Equivalentes
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 3%</b>	0,925251	Iguais	0,0086853	Diferença significativa
<b>LODO CAP 2% - LODO CAP 3%</b>	0,817936	Iguais	0,023466	Diferença significativa

Fonte: O autor (2021).

Tabela D9 - Análise estatística do ensaio *Flow Number*.

<b>COMPARAÇÃO</b>	<b>TESTE F</b>	<b>VARIÂNCIAS</b>	<b>TESTE T</b>	<b>EQUIVALÊNCIA</b>
<b>SEM LODO - LODO SECO 2%</b>	0,20824434	V. Iguais	0,128235813	equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 2%</b>	0,4871055	V. Iguais	0,412006327	equivalentes
<b>SEM LODO - LODO CAP 3%</b>	0,953990025	V. Iguais	0,057174959	equivalentes
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 2%</b>	0,5304679	V. Iguais	0,082290394	equivalentes
<b>LODO SECO 2% - LODO CAP 3%</b>	0,226060747	V. Iguais	0,121647108	equivalentes
<b>LODO CAP 2% - LODO CAP 3%</b>	0,52183153	V. Iguais	0,043313479	diferença significativa

Fonte: O autor (2021).