



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**CONTRIBUIÇÕES PARA COMPREENSÃO DO COMPORTAMENTO DA BASE**  
**IMPRIMADA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**FERNANDO DÁCIO DE ALMEIDA**

**FORTALEZA**

**2024**

FERNANDO DÁCIO DE ALMEIDA

CONTRIBUIÇÕES PARA COMPREENSÃO DO COMPORTAMENTO DA BASE  
IMPRIMADA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Eng.<sup>a</sup> Suelly Helena de Araújo Barroso

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A446c Almeida, Fernando Dácio de.  
Contribuições para compreensão do comportamento da base imprimada de pavimentos rodoviários /  
Fernando Dácio de Almeida. – 2024.  
211 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Interface. 2. Aderência. 3. Coesão. 4. Penetração. I. Título.

CDD 388

---

FERNANDO DÁCIO DE ALMEIDA

CONTRIBUIÇÕES PARA COMPREENSÃO DO COMPORTAMENTO DA BASE  
IMPRIMADA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovado em: 27 / 05 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso - Orientadora  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira - Examinador Interno  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos - Examinador Externo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Luis Alberto Hermann do Nascimento - Examinador Externo  
PETROBRAS/CENPES

---

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena - Examinador Externo  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

A Deus, por ser minha fonte inesgotável de amor, compreensão e paciência nas horas difíceis e por me presentear com tantas pessoas maravilhosas.

À minha querida mãe, Nair, por toda compreensão, amor e suas orações. Ao meu Pai, José Dácio, um exemplo de Pai, de amigo e pelos seus ensinamentos.

À minha amada esposa, Juceline, por todo incentivo, companheirismo, amor, paciência, compreensão e dedicação. Sem ela seria impossível.

Aos meus filhos, Yasmin Maria e João Manoel, por compreender minha ausência, por encher a minha vida de felicidade e por ser o maior presente que Deus me deu.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha estimada orientadora, Suelly Helena de Araújo Barroso, por todo incentivo, amizade e dedicada orientação essencial para realização deste trabalho. Com toda sua experiência, complacência e por ter acreditado que este trabalho fosse possível.

Aos Professores e Amigos do Programa de Pós-graduação de Engenharia de Transportes pela convivência e o aprendizado transmitidos que em muito contribuíram para o meu engrandecimento profissional e pessoal. Muitas dessas relações carregarei por toda a vida.

Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) e sua equipe pelo auxílio no dia a dia do laboratório e pelo apoio na realização dos meus ensaios, bem como a todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC pela atenção e carinho dispensados.

Aos colegas do Centro de Tecnologia em Asfalto (CT Asfalto/UFC) que fizeram desta etapa da minha vida algo inesquecível. Sem vocês essa trajetória não teria sido tão prazerosa! Também sou grato às empresas parceiras (PETROBRAS, Asfaltos Nordeste, Brasquímica, Betunel), pelo fornecimento dos materiais e pelas informações concedidas para realização desta pesquisa.

Aos meus amigos e familiares, pelo carinho e pela compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi prioridade. E a todos que contribuíram de alguma maneira para que eu alcançasse mais esta vitória.

Muito obrigado!

## RESUMO

Atualmente, há no Brasil um esforço para modernizar o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos. No entanto, observa-se de uma forma geral que a consideração da interface entre as camadas de revestimento asfáltico e de base no pavimento não está bem definida, alguns métodos a consideram perfeitamente aderidas outros totalmente deslizantes, o que pode superestimar ou subestimar a vida útil de um pavimento. Diante disso, esta pesquisa procurou esclarecer o comportamento da interface entre o revestimento e a base, especialmente no que se refere à aderência entre essas camadas que é proporcionada pela imprimação betuminosa, trazendo mais informações sobre o comportamento dessa ligação. Foram investigados seis diferentes ligantes para imprimação no qual foram avaliados os parâmetros e propriedades, como: taxa de aplicação, coesão, aderência, desgaste e emissão de voláteis. Onde, a partir dessa avaliação um dentre esses ligantes (G8) foi escolhido para ser utilizado nos testes de cisalhamento direto da interface entre o revestimento e a base imprimada e a partir dos resultados obtidos por possível perceber o efeito da imprimação sob a forma de uma condição de aderência parcial mas que se en aproximasse . Ainda, como forma de contribuir com a comunidade técnica, foram propostos parâmetros e limites escolhidos para a aceitação do serviço de imprimação gerando um material consultivo na forma de um manual de práticas e procedimentos que orientam a execução, aceitação e controle tecnológico dos materiais e serviços de imprimação betuminosa de rodovias. Assim, foi possível também inferir qual a contribuição da imprimação na aderência e no comportamento da estrutura a partir do uso de dois tipos de revestimento, no qual foram usadas amostras com Concreto Asfáltico (CA) e outras com *Cape Seal*. Para tanto, resultados foram gerados parâmetros de laboratório e campo que contribuirão para o uso mais adequado do novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos por meio de um melhor entendimento do comportamento da interface entre bases imprimadas e revestimentos, para assim reduzir a ocorrência de falhas causadas pela imprimação asfáltica em rodovias.

**Palavras-chave:** Interface, aderência, coesão, penetração.

## ABSTRACT

Currently, there is an effort in Brazil to modernize the method of dimensioning asphalt pavements. However, it is generally observed that the consideration of the interface between the asphalt surfacing and the base layer in the pavement is not well defined, with some methods considering them perfectly bonded and others completely sliding, which can overestimate or underestimate the service life of a pavement. Given this, this research sought to clarify the behavior of the interface between the surfacing and the base, especially with regard to the adhesion between these layers provided by the bituminous prime coat, bringing more information about the behavior of this bond. Six different priming binders were investigated, in which parameters and properties such as application rate, cohesion, adhesion, wear, and volatile emissions were evaluated. From this evaluation, one of these binders (G8) was chosen to be used in the direct shear tests of the interface between the surfacing and the primed base, and from the results obtained, it was possible to perceive the effect of the priming in the form of a partial adhesion condition but approaching. Furthermore, as a way to contribute to the technical community, parameters and limits were proposed for the acceptance of the priming service, generating an advisory material in the form of a manual of practices and procedures that guide the execution, acceptance and technological control of the materials and services of bituminous priming of highways. Thus, it was also possible to infer the contribution of the priming to the adhesion and behavior of the structure from the use of two types of surfacing, in which samples with Asphalt Concrete (AC) and others with Cape Seal were used. To this end, laboratory and field parameters were generated that will contribute to the more appropriate use of the new Brazilian method of dimensioning asphalt pavements through a better understanding of the behavior of the interface between primed bases and surfacings, in order to reduce the occurrence of failures caused by asphalt priming on highways.

**Keywords:** Interface, adherence, cohesion, penetration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do método proposto para a estruturação desta Tese de Doutorado .....	27
Figura 2 – Pesquisa bibliométrica .....	32
Figura 3 – Nuvens de palavras contidas nos resumos dos artigos.....	33
Figura 4 – Nuvens de Palavras contidas nos resumos dos artigos .....	33
Figura 5 – Emulsão asfáltica com filtro vermelho .....	35
Figura 6 – Porção do ligante penetrado na base granular.....	38
Figura 7 – Resumo esquemático dos ensaios de avaliação da imprimação.....	55
Figura 8 – Ensaio de aderência por meio da resistência ao arrancamento da base imprimada	57
Figura 9 – Resultados de penetração dos ligantes investigados .....	61
Figura 10 – Coesão para o solo argiloso .....	62
Figura 11 – Arrancamento <i>versus</i> Penetração .....	63
Figura 12 – Desgaste WTAT.....	64
Figura 13 – Cromatogramas obtidos após a coleta dos compostos voláteis no DEC.....	65
Figura 14 – QR code do manual elaborado de boas práticas de imprimação betuminosa de rodovias. ....	69
Figura 15 – Modelo esquemático da imprimação em um pavimento existente .....	69
Figura 16 – Penetração da imprimação, pelo método da Marshall, em função da variação de taxa e do tipo de ligante betuminoso utilizado .....	72
Figura 17 - Penetração de diferentes ligantes a partir da variação da umidade.....	72
Figura 18 – Penetração da imprimação, pelo método da Marshall, em função do teor de umidade e do tipo de ligante utilizado.....	73
Figura 19 – Resumo do histórico de pesquisas sobre os métodos propostos para avaliação da imprimação .....	77
Figura 20 – Defeitos ocorrentes em função de uma imprimação mal executada .....	79
Figura 21 – QR code relativo a proposição de norma XX-ME-P 01/24 .....	82
Figura 22 – QR code relativo a proposição de norma XX-ME-P 02/24 .....	83
Figura 23 – Avaliação da coesão superficial com o coesímetro.....	84
Figura 24 – Ensaio de aderência por arrancamento da base imprimada .....	85
Figura 25 – QR code relativo a proposição de norma XX-ME-P 03/24 .....	85
Figura 26 – Equipamentos para avaliação do desgaste superficial .....	86

Figura 27 – QRs codes relativos as proposições de normas SOP-ME-P 04/24 e SOP-ME-P 05/24.....	87
Figura 28 – Analogia do modelo de Fredlund e Mostergen.....	93
Figura 29 – Lei de Goodman.....	93
Figura 30 – Relação entre a tensão de cisalhamento e o deslocamento relativo entre camadas.....	94
Figura 31 – Formas de avaliar as interfaces entre camadas: (a) cisalhamento direto, (b) tração, e (c) cisalhamento por torção.....	101
Figura 32 – Ensaio de Cisalhamento Direto.....	102
Figura 33 – Ensaio de Cisalhamento Leutner.....	103
Figura 34 – Envoltória de Mohr-Coulomb (tensões na convenção geotécnica).....	105
Figura 35 – Distribuição de tensões sobre a interface (eixo central do carregamento na origem.....	106
Figura 36 – Curva tensão e deslocamento da interface revestimento asfáltico – base granular.....	107
Figura 37 – Detalhes da compactação do solo.....	109
Figura 38 – Detalhes do protocolo de imprimação.....	109
Figura 39 – Detalhes de compactação da mistura.....	110
Figura 40 – Detalhes do revestimento do tipo TSS.....	111
Figura 41 – Molde de compactação com sistema de aplicação de carga acoplado - Protótipo.....	112
Figura 42 – Aplicação da carga axial (a) e Ensaio de interface sem tensões axiais (b).....	112
Figura 43 – Prensa utilizada para a calibração do macaco hidráulico.....	113
Figura 44 – Detalhes da peça deslizante.....	114
Figura 45 – Membrana de imprimação e camadas adjacentes.....	114
Figura 46 – Fluxograma de caracterização e análise estrutural da imprimação.....	115
Figura 47 – Corpo de prova após o ensaio de cisalhamento.....	116
Figura 48 – Tensão de cisalhamento máxima pelo deslocamento.....	117
Figura 49 – Tensão de cisalhamento máxima pela tensão normal.....	117
Figura 50 – Tensão de cisalhamento máxima pela tensão normal ajustada.....	118
Figura 51 – Módulo de Reação Transversal $\times$ Tensão Normal.....	120
Figura 52 – Módulo de Reação Transversal $\times$ Tensão Normal – gráfico ajustado.....	121

Figura 53 – Amostra com revestimento do tipo <i>Cape Seal</i> .....	122
Figura 54 – Gráfico de Tensão de cisalhamento máxima pelo deslocamento.....	123
Figura 55 – Tensão de cisalhamento máxima pela tensão normal .....	124
Figura 56 – Módulo de Reação Transversal × Tensão Normal.....	125
Figura 57 – Comparativo entre valores de <b><i>Kt</i></b> obtidos e os limites de referências .....	126
Figura 58 – Simulação da estrutura com CA na condição de aderência nula .....	128
Figura 59 – Simulação da estrutura com CA na condição de aderência obtida no ensaio de ruptura.....	128
Figura 60 – Deformações principais específicas da solução com CA em diferentes condições de aderência .....	129
Figura 61 – Deformações principais específicas da solução com <i>Cape Seal</i> em diferentes condições de aderência .....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>String</i> de busca utilizado.....	32
Tabela 2 – Atribuições para a amostra no ensaio LWT – base imprimada .....	45
Tabela 3 – Atribuições para a amostra no ensaio LWT – camada antipó .....	45
Tabela 4 – Conceitos para qualificação do ensaio LWT .....	46
Tabela 5 – Atribuições para a amostra no ensaio WTAT – base imprimada .....	47
Tabela 6 – Conceitos para qualificação do ensaio WTAT .....	47
Tabela 7 – Resultados da caracterização dos solos .....	59
Tabela 8 – Pesquisas desenvolvidas com uso de ligantes alternativos para imprimação .....	75
Tabela 9 – Ensaio para avaliação da Imprimação em laboratório .....	82
Tabela 10 – Atribuições de conceitos para a amostra no ensaio LWT – base imprimada. ....	87
Tabela 11 – Caracterização da mistura asfáltica utilizada.....	110
Tabela 12 – Composição da mistura – Faixa III da SOP-ES-P 19/19.....	111
Tabela 13 – Parâmetros dos materiais utilizados na simulação da estrutura.....	126

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Resumo da avaliação tecnológica e ambiental dos ligantes testados .....	67
--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

W <sub>ót</sub>	Umidade ótima (%)
W <sub>ót-2</sub>	Umidade ótima menos 2%
W <sub>ót+2</sub>	Umidade ótima mais 2%
E <sub>c</sub>	Energia de compactação
P	Peso do soquete
H	Altura de queda
n	Número de golpes
V	Volume do corpo de prova
M	Torque máximo medido
$\tau$	Força de ligação interfacial
D	Diâmetro do corpo de prova

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
AEMA	<i>Asphalt Emulsion Manufacturers Association</i>
AI	<i>Asphalt Institute</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CA	Concreto Asfáltico
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CBR	<i>California Bearing Ratio (%)</i>
CM	Cura Média
CP	Corpo de Prova
DER	Departamento Estadual de Rodovias
DIPEA	Dispositivo Portátil para Ensaio de Aderência
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAI	Emulsão Asfáltica Especial
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IP	Índice de Plasticidade (%)
ISSA	<i>International Shurry Surfacing Association</i>
LL	Limite de Liquidez (%)
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LWT	<i>Loaded Wheel Test</i>
MR	Módulo de Resiliência
NL	Não Líquido
NP	Não Plástico
PMF	Pré-Misturados à Frio
RBVT	Rodovia de Baixo Volume de Tráfego
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SAFL	Solo Arenoso Fino Laterítico
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
SNV	Sistema Nacional Viário
SSF	Segundos de Saybolt Furol
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TS	Tratamentos Superficiais
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VMD	Volume Médio Diário
VOCs	Hidrocarbonetos Orgânicos Voláteis

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 Problema de pesquisa e justificativa.....	25
1.2 Objetivo geral .....	26
1.3 Objetivos específicos.....	26
1.4 Metodologia da pesquisa.....	26
1.5 Estrutura da tese .....	27
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>29</b>
2.1 Considerações gerais sobre a imprimação .....	29
2.2 Breve revisão bibliométrica acerca do tema imprimação .....	31
2.3 Materiais utilizados em serviços de imprimação.....	34
2.3.1 <i>Asfalto diluído de petróleo .....</i>	<i>34</i>
2.3.2 <i>Emulsões asfálticas especiais (EAI).....</i>	<i>35</i>
2.4 Fatores que podem interferir na qualidade da imprimação .....	36
2.5 Outros fatores que influenciam no comportamento da imprimação.....	40
2.5.1 <i>Aderência.....</i>	<i>40</i>
2.5.2 <i>Coesão.....</i>	<i>42</i>
2.5.3 <i>Desgaste superficial .....</i>	<i>43</i>
2.5.4 <i>Questões ambientais relacionadas à imprimação betuminosa .....</i>	<i>48</i>
2.5.5 <i>Considerações finais .....</i>	<i>50</i>
<b>3 HIERARQUIZAÇÃO DE MELHORES LIGANTES A SEREM APLICADOS NA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DE RODOVIAS EM FUNÇÃO DE CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E AMBIENTAIS .....</b>	<b>51</b>
3.1 Considerações iniciais .....	52
3.2 Materiais e métodos.....	54

3.2.1	<i>Caracterização dos materiais (Solos e Ligantes)</i> .....	55
<b>3.3</b>	<b>Ensaio de imprimação</b> .....	<b>56</b>
3.3.1	<i>Ensaio de penetração</i> .....	56
3.3.2	<i>Coesão da base imprimada</i> .....	56
3.3.3	<i>Aderência da base imprimada</i> .....	57
3.3.4	<i>Ensaio de desgaste superficial</i> .....	57
3.3.5	<i>Ensaio de emissões de compostos voláteis</i> .....	58
<b>3.4</b>	<b>Apresentação e discussões dos resultados</b> .....	<b>59</b>
3.4.1	<i>Solos e ligantes</i> .....	59
3.4.2	<i>Ensaio de penetração da imprimação betuminosa</i> .....	60
3.4.3	<i>Coesão dos solos imprimados</i> .....	61
3.4.4	<i>Aderência dos solos imprimados</i> .....	63
3.4.5	<i>Ensaio de desgaste WTAT (Wet Track Abrasion Test)</i> .....	63
3.4.6	<i>Ensaio ambientais</i> .....	64
<b>3.5</b>	<b>Principais constatações do programa experimental</b> .....	<b>65</b>
3.5.1	<i>Quanto aos resultados de penetração</i> .....	65
3.5.2	<i>Quanto aos resultados de coesão</i> .....	65
3.5.3	<i>Quanto aos resultados da aderência</i> .....	66
3.5.4	<i>Quanto aos resultados de desgaste</i> .....	66
3.5.5	<i>Quanto aos resultados dos ensaios ambientais</i> .....	66
<b>3.6</b>	<b>Considerações finais e recomendações</b> .....	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>PROPOSIÇÃO DE NORMAS, ESPECIFICAÇÕES E MANUAL DE BOAS PRÁTICAS PARA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DOS PAVIMENTOS</b> .....	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	<b>68</b>
<b>4.2</b>	<b>Fatores que influenciam a qualidade da imprimação</b> .....	<b>69</b>
4.2.1	<i>Tipo e taxa de ligante</i> .....	71
4.2.2	<i>Teor de umidade de compactação e seu efeito no solo no momento da imprimação</i> .	73
4.2.3	<i>Irrigação prévia da superfície</i> .....	74
<b>4.3</b>	<b>Pequeno histórico de pesquisas sobre imprimação no estado do Ceará</b> .....	<b>75</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise dos procedimentos atuais</b> .....	<b>78</b>
<b>4.5</b>	<b>Importância da existência de normas e especificações técnicas</b> .....	<b>81</b>
<b>4.6</b>	<b>Proposições de normas</b> .....	<b>81</b>

4.6.1	<i>Determinação da taxa de imprimação</i> .....	82
4.6.2	<i>Determinação da coesão da imprimação</i> .....	83
4.6.3	<i>Determinação da aderência da imprimação</i> .....	84
4.6.4	<i>Determinação do desgaste superficial da imprimação</i> .....	86
<b>4.7</b>	<b>Considerações Finais</b> .....	<b>88</b>
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO MECÂNICA DA INTERFACE BASE-REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS PROMOVIDA PELA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA</b> .....	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	<b>89</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelagem da interface</b> .....	<b>92</b>
5.2.1	<i>Considerações sobre a verificação de interface</i> .....	96
5.2.2	<i>Fatores que podem influenciar o comportamento da interface entre camadas</i> .....	97
<b>5.3</b>	<b>Considerações sobre a resistência ao cisalhamento entre camadas</b> .....	<b>101</b>
5.3.1	<i>Ensaio de cisalhamento leutner</i> .....	103
5.3.2	<i>Critério de falha segundo Mohr-Coulomb</i> .....	104
<b>5.4</b>	<b>Materiais e métodos</b> .....	<b>107</b>
5.4.1	<i>Caracterização do solo e fluido imprimante</i> .....	108
5.4.2	<i>Moldagem dos corpos de prova</i> .....	108
5.4.3	<i>Imprimação dos corpos de prova</i> .....	109
5.4.4	<i>Moldagem dos revestimentos asfálticos</i> .....	109
5.4.5	<i>Interface da base-revestimento</i> .....	111
<b>5.5</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>115</b>
5.5.1	<i>Cisalhamento entre a base granular/revestimento asfáltico</i> .....	115
5.5.2	<i>Cisalhamento entre a base granular/tratamento superficial</i> .....	121
5.5.3	<i>Influência da aderência no comportamento da estrutura do pavimento</i> .....	126
<b>5.6</b>	<b>Considerações finais</b> .....	<b>130</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>131</b>
<b>6.1</b>	<b>Principais contribuições da pesquisa</b> .....	<b>131</b>
<b>6.2</b>	<b>Contribuições secundárias da tese</b> .....	<b>131</b>
6.2.1	<i>Quanto à taxa de aplicação da imprimação</i> .....	132
6.2.2	<i>Quanto à coesão da imprimação</i> .....	133
6.2.3	<i>Quanto à aderência da imprimação</i> .....	133
6.2.4	<i>Quanto ao desgaste WTAT e LWT da base imprimada</i> .....	134

6.2.5	<i>Quanto às modificações do dispositivo de ensaio</i> .....	135
6.2.6	<i>Quanto às soluções de revestimento utilizados</i> .....	135
6.2.7	<i>Quanto às condições de interface encontradas</i> .....	136
<b>6.3</b>	<b>Sugestões para futuras pesquisas</b> .....	<b>136</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....		<b>138</b>
<b>APÊNDICE A (MANUAL DE IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA)</b> .....		<b>146</b>
<b>1</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>146</b>
<b>2</b>	<b>DEFINIÇÃO</b> .....	<b>146</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS PARA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA</b> .....	<b>149</b>
<b>3.1</b>	<b>Asfalto diluído</b> .....	<b>149</b>
<b>3.2</b>	<b>Emulsão asfáltica</b> .....	<b>150</b>
<b>3.3</b>	<b>Ligantes alternativos</b> .....	<b>151</b>
<b>4</b>	<b>DETERMINAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO</b> .....	<b>152</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio de laboratório para avaliação do comportamento da imprimação</b> ....	<b>153</b>
4.1.1	<i>Ensaio de determinação do taxa de ligante por penetração</i> .....	153
4.1.2	<i>Ensaio de determinação do tempo de cura da imprimação</i> .....	154
4.1.3	<i>Ensaio de determinação da aderência da imprimação</i> .....	154
4.1.4	<i>Ensaio de desgaste superficial</i> .....	155
<b>4.2</b>	<b>Procedimento complementar de determinação de taxa em campo</b> .....	<b>156</b>
<b>5</b>	<b>EQUIPAMENTOS</b> .....	<b>158</b>
<b>6</b>	<b>EXECUÇÃO</b> .....	<b>159</b>
<b>7</b>	<b>CONTROLE E ACEITAÇÃO</b> .....	<b>161</b>
<b>7.1</b>	<b>Ligantes asfálticos</b> .....	<b>161</b>
7.1.1	<i>Asfalto diluído</i> .....	162
7.1.2	<i>Emulsão asfáltica do tipo EAI</i> .....	162
<b>7.2</b>	<b>Controle da execução</b> .....	<b>162</b>
7.2.1	<i>Temperatura de aplicação</i> .....	163
7.2.2	<i>Taxa de aplicação (T)</i> .....	163
<b>7.3</b>	<b>Controle geométrico</b> .....	<b>163</b>
7.3.1	<i>Largura</i> .....	164
7.3.2	<i>Acabamento da superfície</i> .....	164
<b>7.4</b>	<b>Plano de amostragem e condições de aceitação</b> .....	<b>164</b>

7.5	Condições de conformidade e não conformidade.....	164
7.6	Cuidados ambientais .....	166
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>166</b>
	<b>APÊNDICE B (DETERMINAÇÃO DA TAXA DE IMPRIMAÇÃO).....</b>	<b>170</b>
1	DEFINIÇÃO .....	170
2	REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	170
3	APARELHAGEM E MATERIAL .....	171
4	AMOSTRAGEM.....	171
5	RESULTADOS.....	174
	<b>APÊNDICE C (DETERMINAÇÃO DA COESÃO DE IMPRIMAÇÃO).....</b>	<b>177</b>
1	DEFINIÇÃO .....	177
2	REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	177
3	APARELHAGEM E MATERIAL .....	178
4	AMOSTRAGEM.....	178
5	RESULTADOS.....	179
	<b>APÊNDICE D (DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA DE IMPRIMAÇÃO).....</b>	<b>183</b>
1	DEFINIÇÃO .....	183
2	REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	183
3	APARELHAGEM E MATERIAL .....	184
4	AMOSTRAGEM.....	184
5	RESULTADOS.....	186
	<b>APÊNDICE E (DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO WTAT DA BASE IMPRIMADA)</b>	<b>190</b>
1	DEFINIÇÃO .....	190
2	REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	190
3	APARELHAGEM E MATERIAL .....	191
4	AMOSTRAGEM.....	191
5	RESULTADOS.....	193
	<b>APÊNDICE F (DETERMINAÇÃO DO DESGASTE LWT DA BASE IMPRIMADA)</b>	<b>197</b>
1	DEFINIÇÃO .....	197
2	REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	197
3	APARELHAGEM E MATERIAL .....	198

<b>4</b>	<b>AMOSTRAGEM.....</b>	<b>198</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>200</b>
	<b>ANEXO A – CHECKLIST: IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA.....</b>	<b>205</b>
	<b>ANEXO B – FICHA DE CONTROLE DE CAMPO – SERVIÇO DE IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA.....</b>	<b>207</b>
	<b>ANEXO C – MAPA MENTAL: IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA.....</b>	<b>209</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo a pesquisa CNT de rodovias 2023 (CNT, 2023), de um total de 111.502 km pesquisados nesse ano, apenas 32,5% (ou seja, 36.312 quilômetros) dos trechos avaliados estão em ótimo (7,9%) ou bom (24,6%) estado de conservação. Problemas foram identificados na maior parte da extensão, representando 67,5% (75.190 quilômetros) do total avaliado e que foram classificados como regular, ruim ou péssimo. Sabe-se que são por elas que escoam uma parte considerável da produção agrícola do país, apesar de, por muitas vezes, não oferecerem condições de trafegabilidade favoráveis, possuem uma grande relevância social e econômica. Nesse contexto, observa-se que os pavimentos rodoviários flexíveis que são projetados para proporcionar segurança e conforto aos seus usuários, geralmente com uma vida útil estimada em 10 anos, na grande maioria das vezes não atingem esse patamar.

Nos últimos anos, o desempenho e as condições funcionais e estruturais dos pavimentos flexíveis, vem sendo aprimorados para atender à crescente demanda por cargas de tráfego e às variações climáticas. Entretanto, observa-se também um crescente número de defeitos relacionados à falhas de interface entre o revestimento e a base granular, provenientes em parte pelos esforços causados por esse aumento do tráfego. Outras variáveis como, defeitos relativos à erros no processo construtivos e mau uso dos materiais provocam efeitos deletérios no pavimento em um curto espaço de tempo. A possibilidade de falha se torna mais suscetível devido a forma como são construídos os pavimentos, compostos por uma estrutura de múltiplas camadas horizontais, constituídas por diversos materiais compactados adequadamente, com controles rudimentares e pouco precisos do processo construtivo.

Outro ponto é a forma como são dimensionados os pavimentos no Brasil, pois apesar do esforço de modernização do método de dimensionamento de pavimentos no Brasil que é o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), que considera todas as propriedades mecânicas das camadas do pavimento, tráfego, clima da região o mesmo ainda considera a condição de aderência entre as camadas do pavimento na forma de totalmente aderidas ou não aderidas (FRANCO e MOTTA, 2020). A problemática da aderência se torna mais visível quando avalia-se a interface entre o revestimento e a base, pois entre essas camadas ocorrem tensões de tração provocados pelo efeito da passagem de cargas, bem como efeitos de carregamento de compressão por conta do peso por eixo dos veículos no momento da sua passagem.

Ressalta-se que a união entre essas camadas de comportamento tão diferentes é favorecida por uma etapa construtiva chamada de imprimação, onde um dos seus objetivos

principais na composição de um pavimento é o de, impermeabilizar a superfície da base, fornecer coesão e aderência ao revestimento e resistir aos esforços horizontais de frenagem e aceleração. Tendo em vista a responsabilidade estrutural das camadas de base desses pavimentos, é importante que a imprimação cumpra adequadamente sua finalidade, fazendo com que a base tenha uma forte ligação com o revestimento. A partir dessa premissa entende-se que algumas condições precisam ser asseguradas para que a imprimação cumpra essa função.

Segundo a especificação do DNIT (2014), a imprimação deve proporcionar à base, impermeabilização, coesão, durabilidade e aderência. Entretanto, apesar dessa lista de atributos, essa especificação não indica como determinar, os limites aceitáveis ou como aferir essas propriedades que não são usuais de serem medidas (coesão e aderência, por exemplo) principalmente em campo, além de, outros dados, como definição de taxa e desgaste que podem ser determinados em laboratório, mas não possuem protocolo definido para sua determinação.

No entanto, em laboratório, é possível avaliar a espessura da penetração do ligante asfáltico na base finalizada como indicativo da qualidade da imprimação. Esse critério já foi estudado por Dantas (1959); Villibor (1981); Villibor *et al.* (1989); ASTM D8-02 (2003); Castro (2003); Duque Neto (2004); Rabelo (2006); Ramalho (2011) e Almeida (2017). Esses autores abordaram sobre faixas de penetração para a qual se acredita que a imprimação funcionará adequadamente em diferentes tipos de materiais de base, variando, em média, de 4,0 a 13,0 mm. Os pesquisadores relataram ainda que se a penetração do ligante for reduzida, poderá ocorrer exsudação no revestimento pelo excesso desse na base. Por outro lado, se a penetração do ligante for excessiva pode ocorrer o desprendimento do revestimento devido à falta de aderência entre este e a base, demonstrando, assim, que é necessário que exista uma quantidade de ligante na base suficiente para permitir uma interface aderente e coesa entre esta e o revestimento.

A camada imprimada deve fornecer, também, adesão mecânica, sendo essa, resultado de uma combinação de mecanismos que ocorrem simultaneamente à aderência, tais como: intertravamento mecânico, físico-químico de adesão causada pela energia livre de superfície de materiais e colagem causada por meio de reações químicas em sua interface (MORAES *et al.* 2011). Apesar do avanço das técnicas de execução e de novas tecnologias dos materiais utilizados em pavimentação, o estudo sobre o comportamento da camada de aderência ainda é um assunto com diversas lacunas, embora os estudos sobre as propriedades dos materiais em detrimento do aumento de desempenho da mistura global tem sido priorizado, observa-se, no entanto, que o desempenho da ligação entre camadas de pavimento tem sido frequentemente ignorado. Esse descuido faz com que ocorra um movimento de transferência

de cisalhamento de tensão horizontal relativa entre diferentes camadas, visto que a má adesão ou descolamento entre camadas permite movimentos laterais, que ocasionarão danos acidentais e prematuros ao pavimento afetando assim o desempenho da estrutura das multicamadas (CANASTRI *et al.*, 2012).

Visto que, a aderência entre camadas é um fator primordial para a manutenção da vida de serviço e desempenho esperados do pavimento, se torna importante seu estudo, para entender que as estruturas de pavimentos multicamadas na grande parte do tempo não se comportam como sistemas monolíticos. Para compreender razoavelmente as condições de aderência na interface, é necessário extrair parâmetros mecânicos tais como: (i) de rigidez a fim de relacionar a tensão e deslocamento entre as duas camadas de interfaces adjacentes e (ii) ruptura, para expor os estados de tensões admissíveis por esta. Por falta de dados que caracterizem essas condições de interface é comum se adotar uma simplificação da verdadeira aproximação desse fator na modelagem da estrutura do pavimento, afetando sua durabilidade e praticidade. Segundo Torquato e Silva (2017), deve-se levar em conta que a ligação entre as duas camadas superiores do pavimento é estruturalmente mais expressiva do que a ligação entre as camadas inferiores. Fato este corroborado por uma literatura internacional direcionada para pesquisas científicas sobre a aderência entre camadas asfálticas (MOHAMMAD *et al.*, 2011; HUANG *et. al*, 2015; WANG *et. al*, 2016; DAS *et. al*, 2017; YANG e LI, 2021).

A tentativa de conhecimento dessa interface com um viés mecanicista foi estudado por Boussinesq (1885), que considerou a estrutura como meio semi-infinito elástico linear, homogêneo, isotrópico, submetido a um carregamento circular e estático. Uma das principais deficiências dessa modelagem é que considera o pavimento como uma estrutura de uma única camada. Esse problema foi solucionado parcialmente por Burmister (1943) que expandiu a solução para uma estrutura de duas e, subseqüentemente, de três camadas, seguindo as mesmas hipóteses simplificadoras de seu antecessor, à exceção do número de camadas analisadas.

A solução de Burmister se vale ainda da hipótese de que as camadas do pavimento são perfeitamente coladas entre si. Segundo essa solução, revestimento e base, por exemplo, não deslizam quando da aplicação de um carregamento. Assumir essa hipótese como verdadeira é equivalente a assumir que a película formada pela imprimação constitui uma cola rígida e irrompível, o que, sabidamente, não é verdade quando se trata dos tipos de materiais que compõem a interface em questão (TORQUATO e SILVA, 2017).

A partir disso, Torquato e Silva (2017) ao realizar ensaios de laboratório propôs um ajuste das variáveis de rigidez e resistência a fim de modelar mecanicamente a interface para fins de utilização na análise estrutural. Contudo, na pesquisa citada não foi possível expandir o

número de materiais investigados. Isso se tornou imperativo para poder validar essa modelagem. Assim, é insuficiente a consideração da aderência por meio apenas de simulações computacionais sem a validação experimental, seja por meio de dados advindos de instrumentação de pista ou de ensaios laboratoriais de diferentes soluções de pavimentos. Conjectura-se ainda que parâmetros como, umidade de compactação, taxa de ligante da imprimação, preparo da superfície da base, granulometria, permeabilidade, interferem na qualidade da imprimação, comprometendo a aderência na interface base-revestimento.

Adicionalmente, tendo em vista o contexto tecnológico das pesquisas em pavimentação no qual o Brasil está inserido, é desejável que a caracterização mecânica da imprimação seja obtida a partir de ensaios simples de realizar, que possam extrair suas propriedades (aderência e resistência ao cisalhamento) de maneira rápida e confiável. Essa condição é fundamental para que a prática da consideração adequada da imprimação como parte constituinte da interface base-revestimento seja disseminada no país, possibilitando a sua consideração no novo método de dimensionamento empírico-mecânico em desenvolvimento no Brasil, intitulado de MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), e assim aprimorar a análise estrutural dos pavimentos.

Na atualidade, outra questão que envolve os serviços de imprimação betuminosa é a busca de materiais alternativos ao Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) do tipo CM-30, pois sabe-se que ele é potencialmente perigoso para os trabalhadores que o manipulam, devido à liberação de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) durante sua aplicação e processo de cura. Esse produto é constituído de uma mistura de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e querosene, sendo capaz de contaminar o solo e reservas de água devido ao seu possível escoamento ou cura inadequada.

Os VOCs podem ser encontrados em resíduos e voláteis emitidos durante o processo de aquecimento do ligante asfáltico conforme citado por Fernandes *et al.* (2007). Ainda segundo esses autores, embora os níveis de exposição dos profissionais no setor de pavimentação a esses compostos sejam geralmente baixos, longos períodos de tempo de exposição por inalação ou mesmo riscos por contaminação da pele podem causar danos à saúde do trabalhador.

Dada a importância do emprego da imprimação betuminosa na pavimentação, instiga-se a comunidade científica e técnica local a definir procedimentos normativos para avaliação da imprimação e incentivar a busca por materiais alternativos e menos poluentes para emprego em serviços de imprimação betuminosa de rodovias melhorando a interface base-revestimento, visando o aumento da qualidade da imprimação dos pavimentos e a segurança da

saúde da população, já que não se pode excluir o risco cancerígeno dos materiais utilizados nesses serviços.

### **1.1 Problema de pesquisa e justificativa**

Atualmente, há no Brasil um esforço para modernizar o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, tornando-o menos empírico. Apesar disso, mesmo no novo método empírico-mecanístico MeDiNa, simplificações na consideração das camadas de revestimento asfáltico e de base em um pavimento estarem perfeitamente aderidas ou totalmente deslizantes podem superestimar ou subestimar a vida útil de pavimentos asfálticos. Assim, é necessário, para uma consideração consistente das condições de aderência nesta interface, extrair-se parâmetros mecânicos: (i) de rigidez a fim de relacionar tensão e deslocamento entre as duas camadas adjacentes à interface e (ii) de ruptura para expressar os estados de tensões admissíveis por essa interface.

Dado o que foi exposto, entende-se que a imprimação tem um papel importante na melhoria da aderência entre as camadas de revestimento e base, no entanto, não há um consenso de como isso ocorre de fato e quais as características são mais determinantes para que a imprimação cumpra seu objetivo. Entretanto, existem lacunas no âmbito operacional que podem ser exploradas e melhoradas para que os defeitos provenientes de um processo construtivo mau acompanhado sejam reduzidos, quais sejam: determinação de taxa de aplicação, estimativa do tempo de cura da base imprimada, aferição do endurecimento da base e medição de desgaste superficial.

Percebe-se ainda que os órgãos rodoviários, regionais e nacionais, não possuem material técnico atualizado que aborde como medir as principais características atribuídas pela imprimação à base e a falta de conhecimento sobre como considerar a imprimação na resposta estrutural gera incertezas sobre a adoção do novo método de dimensionamento. Complementar a isso, a escassez de dados a respeito da caracterização dessas condições de interface ocasiona a simplificação da condição real desse fator na modelagem estrutural dos pavimentos, sobretudo em revestimentos esbeltos que são uma realidade predominante no estado do Ceará.

Essas dúvidas geram incertezas sobre quais métodos de ensaio laboratorial são mais adequados para que se compreenda o efeito da variação dos parâmetros das taxas de aplicação de ligante, tipo de ligante e umidade da base. Por outro lado, há a necessidade de normas ou especificações técnicas que indiquem procedimentos e valores aceitáveis para a avaliação da imprimação betuminosa de rodovias a partir de parâmetros empírico-mecanísticos. Por fim,

sente-se falta de um ensaio que se possa variar as amostras de base, ligantes e tipo de revestimento com vistas ao desenvolvimento de métodos de avaliação de desempenho para a interface base-revestimento à luz do parâmetro de aderência.

## **1.2 Objetivo geral**

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir com o novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos por meio da investigação do comportamento da base imprimada e revestimento, de forma a propor parâmetros, em laboratório e no campo, para melhorar a qualidade e análise desse serviço.

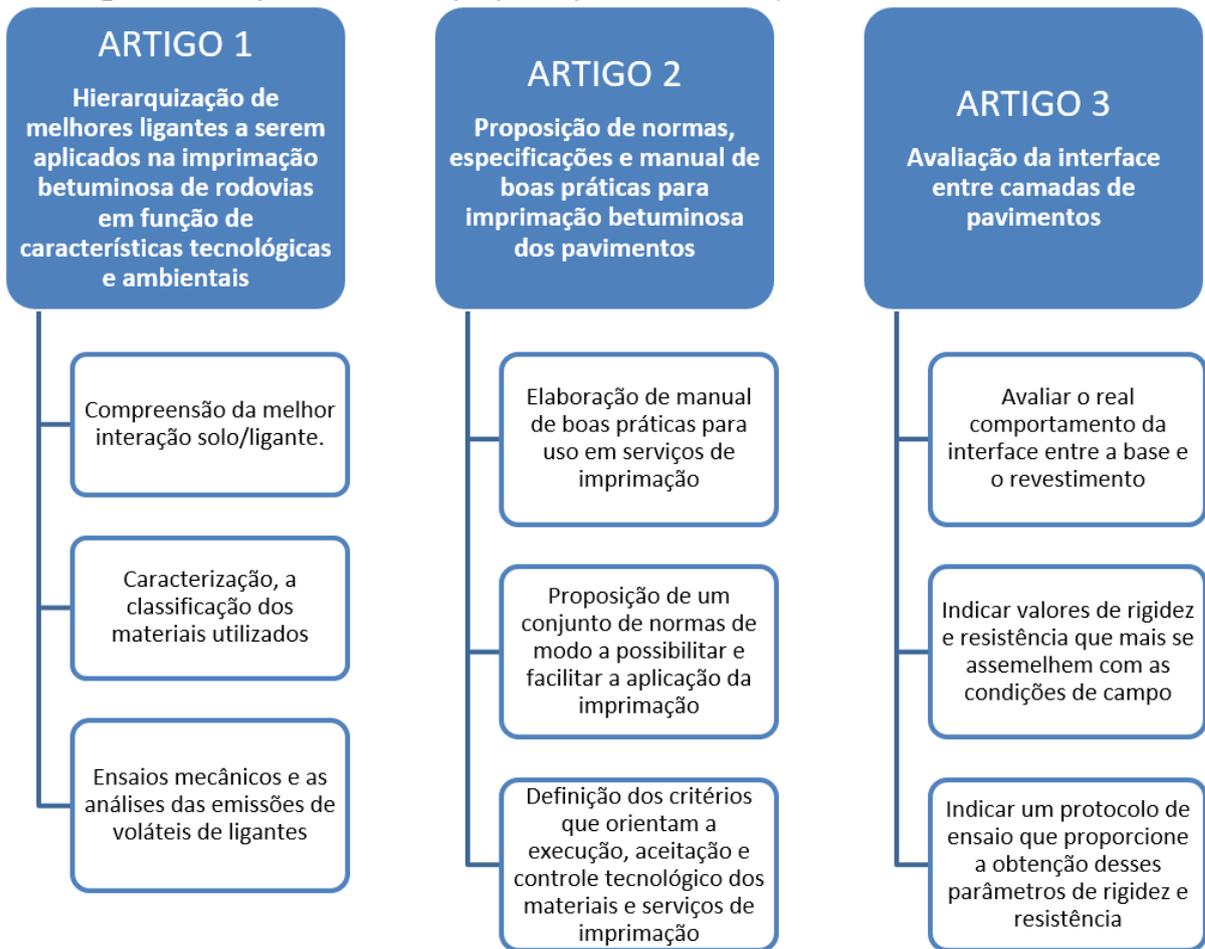
## **1.3 Objetivos específicos**

- a) Investigar o comportamento de ligantes comerciais e alternativos para o emprego em serviços de imprimação betuminosa à luz de parâmetros tecnológicos e ambientais.
- b) Elaborar nota técnica com proposição de um manual de práticas e normas para avaliação da imprimação em laboratório relacionando os dados experimentais com aqueles observados em campo.
- c) Avaliar através de um ensaio mecânico o comportamento da interface base-revestimento imprimado à luz do parâmetro de aderência em diferentes materiais de base e tipos de revestimento.

## **1.4 Metodologia da pesquisa**

O trabalho foi estruturado, na sua maioria, em forma de artigos conforme apresentado na Figura 1 que apresenta um esquema da estrutura dos artigos desenvolvidos nesta Tese de Doutorado. Os capítulos que compõem o trabalho referem-se: Introdução, Revisão Bibliográfica, Artigo 1, Artigo 2, Artigo 3 e Conclusões. Os itens que seguem explicam como as etapas foram desenvolvidas.

Figura 1 – Etapas do método proposto para a estruturação desta Tese de Doutorado



Fonte: Próprio Autor (2024)

### 1.5 Estrutura da tese

A presente Tese foi escrita em formato de artigos sendo constituída de seis capítulos. Além deste capítulo introdutório o Capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos básicos do serviço de imprimação, quais pesquisas a nível nacional e internacional se dedicaram ao tema, bem como os materiais empregados nesse serviço e os parâmetros de avaliação a serem observados. O Capítulo 3 é apresentado um artigo, já publicado na Revista Transportes em 2022, que trata da avaliação de ligantes alternativos através de análise técnica e ambiental, bem como apresenta os principais parâmetros usados para se avaliar a imprimação frente ao uso de diferentes ligantes. O Capítulo 4 trata de uma contribuição técnica e apresenta proposições de norma para avaliação da imprimação betuminosa, indicando o procedimento experimental e as metodologias empregadas nessa avaliação, bem como um manual de boas práticas de imprimação. No Capítulo 5 explana-se sobre a avaliação da interface entre a base e o

revestimento com o estabelecimento de protocolos de ensaio e melhorias no método anteriormente utilizado visando aumentar a confiabilidade nos resultados e análises realizadas. No Capítulo 6 são apresentadas as principais contribuições realizadas nesta tese através das conclusões e constatações do programa experimental desenvolvido, bem como são apontadas recomendações para estudos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo tem como objetivo apresentar o serviço de imprimação betuminosa de rodovias, fundamentando-se em normativas e estudos sobre a seleção de ligantes apropriados e sua aplicação. Além disso, serão abordadas as condições mínimas necessárias para garantir a execução satisfatória desse processo.

A pesquisa bibliométrica realizada também enfatizou a relevância do tema em um contexto mundial, além de destacar os materiais utilizados e os requisitos técnicos esperados para promover a aderência entre a base e o revestimento. Essa abordagem visa diretamente o aumento da durabilidade da estrutura, contribuindo para a sua integridade ao longo do tempo.

### **2.1 Considerações gerais sobre a imprimação**

A imprimação betuminosa é um processo utilizado na construção e manutenção de rodovias, que consiste na aplicação de uma camada fina de asfalto diluído sobre a superfície do pavimento. Essa camada tem como objetivo principal promover a aderência entre as camadas do pavimento, base e revestimento, aumentando a resistência e a durabilidade da estrutura.

Além de melhorar a aderência entre essas camadas do pavimento, a imprimação betuminosa também auxilia na proteção da estrutura do pavimento frente as ações das intempéries, reduzindo a formação de trincas e fissuras na superfície da rodovia. Por isso, é um processo fundamental para garantir a qualidade e a segurança das rodovias.

Para isso, alguns cuidados devem ser observados, após a realização da imprimação, sendo importante que se espere um período adequado antes de liberar o tráfego sobre a superfície imprimada. Esse período de espera varia de acordo com o tipo de ligante utilizado e as condições ambientais, mas geralmente pode demorar horas ou até dias.

Isso porque, durante esse período, o ligante da imprimação precisa se estabilizar e curar, seja pelo efeito de ruptura nas Emulsões Asfálticas especiais para Imprimação (EAI) ou pela evaporação do solvente nos ADPs, e assim garantir a aderência adequada entre as camadas do pavimento e evitar danos causados pelo tráfego que são acelerados quando a imprimação falha. Se o tráfego for liberado antes do período adequado de cura, pode ocorrer o deslocamento da imprimação e a perda da aderência entre as camadas do pavimento.

Além disso, é importante que se evite o tráfego pesado e intenso sobre a superfície pavimentada logo após a realização da imprimação, pois isso pode comprometer a qualidade

do pavimento e afetar sua durabilidade, o que pode prejudicar a aderência entre as camadas e aumentar o risco de deslizamentos e trincas.

Por isso, é importante seguir as especificações do projeto de pavimentação e os procedimentos de segurança recomendados antes de liberar o tráfego sobre a superfície pavimentada. O período de cura da imprimação e a restrição do tráfego são importantes para garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento e evitar a necessidade de manutenções e reparos precoces.

Segundo a especificação ES 144/2014 (DNIT, 2014), a imprimação consiste na aplicação de material asfáltico sobre uma superfície de base concluída, antes da execução de um revestimento asfáltico qualquer. O *United States Army Corps of Engineers – USACE* (2001), em seu guia de especificações para construção militar, define a imprimação betuminosa como sendo uma camada primária resultante de uma aplicação de um material de asfalto líquido de baixa viscosidade sobre uma camada de base não tratada quimicamente (não coesiva) antes da colocação de um pavimento de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Essa instituição aponta também como objetivos da imprimação o de impedir a movimentação lateral da mistura asfáltica durante a construção do revestimento.

Asphalt Institute (AI) (2001) afirma que a imprimação mitiga a absorção da base granular pelo excesso de umidade proveniente de chuvas ocorrentes antes da execução do revestimento e que sua finalidade é proteger os materiais subjacentes da água da chuva, fornecendo uma camada de impermeabilização temporária antes de pavimentar.

Rabelo (2006) e Villibor *et al.* (2009) relatam que a imprimação é uma etapa na construção de revestimentos betuminosos, executada sobre bases permeáveis, que tem basicamente três funções:

- i. aumentar a coesão da superfície superior da base até a profundidade próxima de 10 mm, a ela incorporando todo material fino que não possa ser eliminado pela varredura, de modo a tornar uma superfície lisa, polida e completamente isenta de pó;
  - ii. permitir, pelo amolecimento do material betuminoso usado, seja pela ação do calor ou pela ação de solventes, uma ligação com a camada do revestimento;
  - iii. proteger a base da ação da água que porventura possa atravessar o revestimento.
- Ishai e Livneh (1984) ressaltam que a mútua ligação criada pela imprimação contribui para a adesão interfacial, para maior eficiência no entrosamento do sistema constituído pelas duas camadas e para a melhoria da capacidade estrutural do pavimento. No entanto, observa-se que em muitos estudos a

penetração do ligante na base é o único parâmetro para avaliação do serviço de imprimação.

Godoi (2011) ao estudar o comportamento da imprimação sob o aspecto da emissão de VOCs cita que a imprimação é responsável pela adesão entre a base e a camada de rolamento do asfalto, sendo que a aderência exerce papel fundamental para a integridade estrutural do pavimento.

## **2.2 Breve revisão bibliométrica acerca do tema imprimação**

Nos últimos vinte anos, ao elencarmos as pesquisas realizadas viu-se que testes com novos produtos com vistas a variação de taxas e tempo de cura e não obstante a preocupação ambiental através da busca de novos diluentes que viessem substituir o querosene na diluição de ADPs, definição de taxas e procedimentos de laboratório de campo foram temas relacionados por alguns autores, quais sejam: Castro (2003), Rabelo (2006), Lopes (2008), Sant'ana e Villibor (2009), Silva (2009), Ramalho (2011), Zhang (2014), Santiago (2017), Torquato e Silva (2017), Wang (2017), Scherer (2018), Sufian (2020), Scherer (2022), Nascimento *et al.* (2023).

Esses são alguns dos autores que se dedicaram ao tema, suas contribuições tiveram uma resposta frente às preocupações trazidas ao longo de anos de pesquisa com a atualização da norma para imprimação (DNIT 144), que em 2014 trouxe alterações para incluir dentre os produtos elegíveis ao serviço de imprimação as EAIs, criando uma alternativa ao uso dos Asfaltos diluídos. Embora ainda não trate com profundidade assuntos como, definição da melhor taxa ou tempo de cura.

No contexto mundial, foi realizada uma busca sobre as pesquisas realizadas sobre o tema imprimação nos últimos trinta anos através de uma busca sistemática feito com o uso do software StArt (*State of Art through Systematic Review*), desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (Lapes) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A etapa de identificação dos trabalhos ocorreu em agosto de 2023, nas bases de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, selecionadas devido suas abrangências e relevâncias para o tema de estudo.

A partir da literatura de controle e dos sinônimos dos termos foram definidas as algumas palavras-chave para o levantamento dos trabalhos relevantes para o estudo: *Adhesion*, *prime coat*, *Cohesion*, *Surface wear*, *Interface*, *Application rate*, *Curing time*, *Alternative*

*binders*. Com base nas palavras-chave obtidas e uso de operadores booleanos foi determinada a *string* de busca a ser inserida nas bases de dados escolhidas, apresentada na Tabela 1.

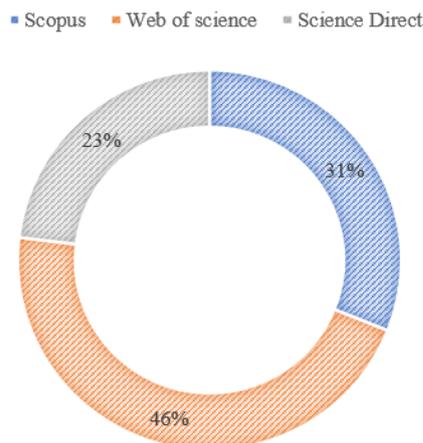
Tabela 1 – *String* de busca utilizado

("Adhesion") and ("prime coat") or ("Cohesion") and ("prime coat") or ("Surface wear") and ("prime coat") or ("Interface") and ("prime coat") or ("prime coat") or ("Application rate") and ("prime coat") or "Curing time" or ("Alternative binders")

Fonte: Próprio autor (2024).

Para tanto, a Figura 2 apresenta os resultados do levantamento inicial distribuídos pelas bases utilizadas. Ao todo foram encontrados 628 trabalhos. Distribuída nas bases da seguinte forma, na *Science Direct*, com 145 artigos, correspondendo a 23%, a *Scopus*, com 195 artigos, correspondendo a 31% e *Web of Science*, com a maior parcela de retorno, com 288 artigos, ou seja, 46% do total de artigos encontrados.

Figura 2 – Pesquisa bibliométrica



Fonte: Próprio Autor (2024)

De um total de 628 trabalhos encontrados apenas 67 trabalharam com alguma linha de pesquisa voltada para imprimação, pouco mais de 10%, onde a exclusão de muitos desses trabalhos se deu por conta do desenvolvimento das pesquisas terem como foco outros objetivos que não o comportamento de materiais em serviços de imprimação betuminosa. Esse filtro foi importante para incluir trabalhos pertinentes e excluir alguns outros que não relacionado ao tema pesquisado, isso foi possível pelo filtro realizado com a definição de *strings* de busca a partir da escolha de algumas palavras chaves, conforme mostrado na Figura 3.

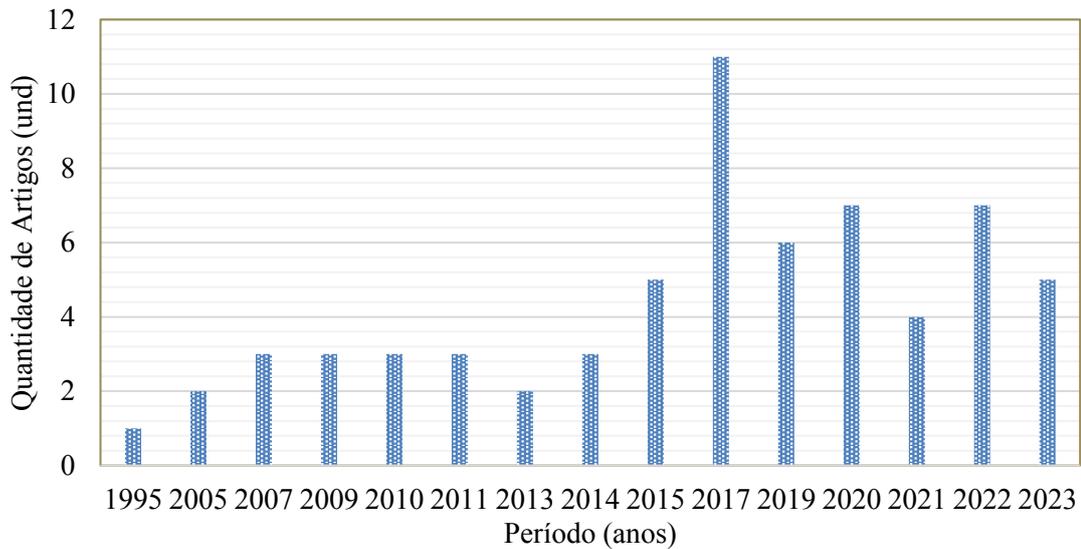
Figura 3 – Nuvens de palavras contidas nos resumos dos artigos



Fonte: Próprio Autor (2024)

Ao fazer um filtro por ano de publicação, dentro do período pesquisado foram retornadas a seguinte distribuição por ano (Figura 4). Observa-se que o tema nos últimos 10 anos foi bem explorado, com a maior parte dos trabalhos pesquisados com foco em imprimação distribuídos nesse período.

Figura 4 – Nuvens de Palavras contidas nos resumos dos artigos



Fonte: Próprio Autor (2024)

Dessa forma, foi possível ver a importância do desenvolvimento de estudos que considerem outros parâmetros, como: taxa de aplicação de ligante, coesão, aderência e desgaste; bem como a investigação de diferentes ligantes para imprimação, além da necessidade de propor procedimentos e normas para avaliação da imprimação como forma de selecionar adequadamente ligantes com interação entre os diferentes solos disponíveis e/ou outras características que influenciem o comportamento da imprimação.

## **2.3 Materiais utilizados em serviços de imprimação**

A seguir serão elencados os materiais normalmente utilizados em serviços de imprimação betuminosa de rodovias observando as características de cada material e a sua adequada aplicação e os detalhes de cada um do ponto de vista técnico e operacional.

### **2.3.1 Asfalto diluído de petróleo**

Convencionalmente utilizados em serviços de imprimação, os ADPs são produzidos a partir do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e diluentes (querosene, nafta ou gasolina). Esses ADPs são utilizados também em revestimentos esbeltos por penetração, além de serem aplicados em temperaturas mais baixas que as usualmente empregadas quando se usa apenas o CAP. Além da imprimação impermeabilizante, os ADPs podem ser utilizados em Macadames Betuminosos (MB), Tratamentos Superficiais (TS) e alguns Pré-Misturados a Frio (PMF).

No Brasil, o ADP mais utilizado é o CM-30, recomendado para serviços de imprimação, indicado para superfícies de diferentes tipos de materiais aplicáveis em camadas de base e deve ser aplicado à taxa que varia de 0,8 a 1,6 L/m<sup>2</sup>. Essa taxa deve ser determinada experimentalmente mediante absorção pela base em 24 horas, mas dependendo das condições climáticas locais esse tempo de espera pode se estender até 72h.

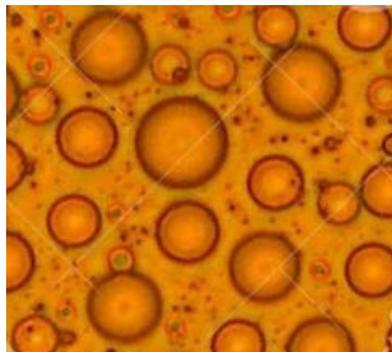
Já em alguns países seu uso é regulado e/ou até restringido devido à emissão de voláteis decorrentes do seu processo de cura. Cross e Shrestha (2005) afirmam que o ADP é o mais nocivo em emissões de voláteis dentre os produtos usados em pavimentação, isso ocorre devido ao alto teor do solvente que dilui o asfalto. Assim, o asfalto diluído de cura rápida (chamado de Cutback ou ADP) apresenta uma porcentagem em massa significativa de diluente e o seu uso contribui consideravelmente para o aumento das emissões atmosféricas. As perdas por evaporação no caso dos asfaltos de cura rápida são estimadas em 95% em massa do diluente, enquanto que em um asfalto de cura média a perda por evaporação é de 70% e em um asfalto de cura lenta apenas 25% em massa de diluente são perdidos por evaporação (EIIP, 2001).

Considera-se que a evaporação em asfalto diluído de cura média (CM) ocorre de forma mais lenta sendo que nesse tipo de asfalto (CROSS E SHRESTHA, 2005): (a) aproximadamente 20% do solvente evapora no primeiro dia após a aplicação; (b) 50% do solvente evapora durante a primeira semana e (c) 70% do solvente evapora depois de três a quatro meses após a aplicação.

### 2.3.2 Emulsões asfálticas especiais (EAI)

Segundo a Especificação de Materiais (EM) 165 (DNIT, 2013), a emulsão é um sistema constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, ou então de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica. Na Figura 5 são mostradas esferas com contorno escuro representando os glóbulos de asfalto em meio a um material avermelhado, água mais emulsificantes, estabilizado.

Figura 5 – Emulsão asfáltica com filtro vermelho



Fonte: Dreamstime.com (2014)

Quimicamente a emulsão é definida como uma mistura heterogênea de dois ou mais líquidos, os quais normalmente não se dissolvem um no outro, mas quando são mantidos em suspensão por agitação ou, mais frequentemente, por pequenas quantidades de substâncias conhecidas como emulsificantes, formam uma mistura estável (dispersão coloidal) (BR PETROBRAS, 2016). As emulsões asfálticas apresentam composição química variável conforme sua utilização. Geralmente são compostas por 30% a 50% de água, 50% a 70% de cimento asfáltico e 0,1% a 2,5% de agentes emulsificantes (ABEDA, 2010).

A revisão da Especificação de Serviço (ES) 144 (DNIT, 2014), que inclui o uso da EAI para aplicação em serviços de imprimação betuminosa de rodovias, abre precedente para a investigação de novos produtos que visem reduzir as emissões de voláteis no meio ambiente. Das modificações realizadas na norma, pode-se notar apenas o acréscimo de limites específicos de determinação da viscosidade para as emulsões quanto ao controle do material e para execução quanto à taxa de aplicação utilizada.

O emprego das EAIs melhora as condições de aplicação e proporciona cura em tempo mais reduzido, em média 24 horas, não requer diluição do produto, sendo aplicada em temperatura ambiente, contribui com a política de saúde, meio ambiente e segurança do trabalhador. Seu uso é incentivado e bem aceito, pois reduz substancialmente a emissão de

voláteis no meio ambiente, contribuindo assim para diminuição da poluição do ar e redução do efeito estufa (BETUNEL, 2016). Apesar dessas vantagens o autor da presente tese, tem observado algumas limitações quando se aplica emulsão em diferentes tipos de base, tais como: maior suscetibilidade à umidade comprometendo a penetração da emulsão, tipos de materiais utilizados em bases que podem gerar aumento do tempo mínimo para cura, utilização de taxas de aplicação equivocadas por conta da experiência com o ADP se pensa inicialmente que podem ser aplicadas taxas parecidas o que o comportamento do ligante é tão abrangente quanto era com o ADP.

Algumas confirmações sobre o uso de EAs em serviços de imprimação são sabidos, como por exemplo: a restrição de uso em bases mais fechadas ou que contenham cimento na sua mistura, bem como os cuidados com o armazenamento por conta da estabilidade do ligante em estoque. Entretanto, sua utilização é incentivada pelo órgãos ambientais e reguladores de serviços rodoviários, pois esse é um material menos poluente e promissor para substituir o uso de ADPs em serviços de imprimação.

#### **2.4 Fatores que podem interferir na qualidade da imprimação**

A ASTM D8-02 (2003) observou que em serviços de imprimação existe a necessidade que o ligante tem de penetrar na base para que essa desempenhe bem as suas funções. Contudo, estudos mostram que existem faixas de penetração que são recomendadas, dependendo do material de base, para que a imprimação tenha um bom desempenho.

Nogami, Villibor e Fabbri (1989) constataram que onde a penetração da imprimação com CM-30, para o caso de Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL), atingiu valores superiores a 15,0 mm ocorria em alguns locais o desprendimento da camada de rolamento devido à falta de aderência entre o revestimento e a base e/ou o cravamento do agregado do revestimento nesta base. Já onde a penetração da imprimação alcançou valores inferiores a 3,0 mm ocorria, na maior parte dos casos, a exsudação no revestimento. Com base nos estudos desses autores, Rabelo (2006) considerou como desempenho satisfatório para avaliar os seus experimentos em laboratório aquele pavimento no qual o intervalo da penetração média da imprimação atingisse de 4,0 a 10,0 mm.

Segundo Villibor (1981), as imprimações que apresentaram resultados satisfatórios em campo foram aquelas que apresentaram espessuras de penetração variando de 4,0 a 10,0 mm e apresentaram uma película residual do material betuminoso na superfície do solo com espessura não excessiva. Nessas condições, as imprimações resistiram satisfatoriamente aos

esforços de cravação dos agregados do revestimento na camada de base e aos esforços horizontais oriundos do tráfego, além de não apresentarem problemas de exsudação.

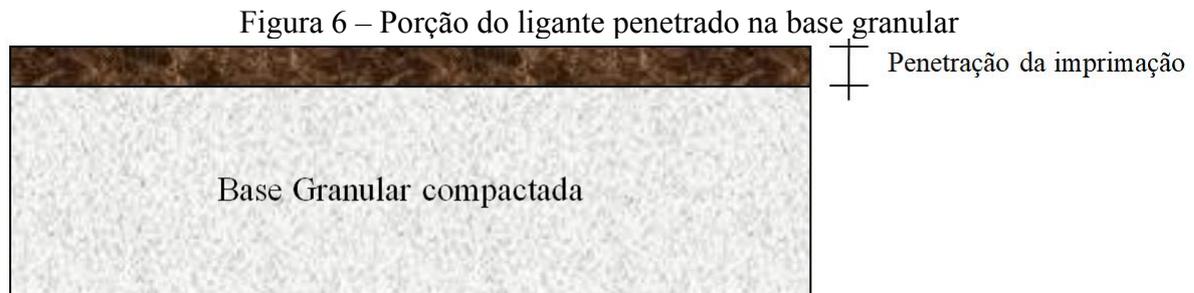
Castro (2003) ao investigar o desempenho de pavimentos de algumas cidades dos estados do Paraná e do Espírito Santo, executados em revestimento antipó sobre bases de saibros imprimadas com emulsão de óleo de xisto, concluiu que somente nos pontos onde a imprimação alcançou valores de penetração no intervalo entre 4,0 e 13,0 mm, o pavimento apresentou bom desempenho. Entretanto, Duque Neto (2004) ao estudar pavimentos executados com bases de misturas de solos naturais imprimadas com emulsão de óleo de xisto não propôs um intervalo definido para a penetração, pois ele percebeu que mais importante do que estabelecer uma faixa ideal era a de verificar o comportamento que as bases imprimadas mostraram com a variação de taxa de aplicação, pois foram conseguidos resultados satisfatórios mesmo quando as amostras apresentaram uma penetração da imprimação fora do intervalo de 4,0 a 13,0 mm proposto por Castro (2003). Por sua vez, Almeida (2013) se utiliza do intervalo de 4,0 a 13,0 mm como parâmetro comparativo como os demais estudos e propõe que não seja atribuída unicamente uma faixa de penetração para atestar o bom comportamento da base imprimada, mas que essa seja parte de uma análise mais cuidadosa de definição de uma taxa de aplicação adequada e de medição de outros parâmetros, como coesão e aderência, tornando a análise mais criteriosa e assertiva

Entende-se que as controvérsias sobre a faixa de penetração dos autores citados é fruto das diferentes condições vivenciadas por cada um deles, como por exemplo: os materiais utilizados nas camadas granulares, condições de umidade no momento do serviço de imprimação, taxa de irrigação prévia e taxa de ligante. Para tanto, diante das experiências apresentadas pelos pesquisadores citados verifica-se que a qualidade da imprimação está associada à concentração residual de asfalto quando da sua cura no topo da base pronta. Essa concentração é fruto da proporção de CAP presente na mistura CAP+ solvente, que em média é de 50/50%, ou ainda da variação da taxa de aplicação do ligante que varia de acordo com as características de cada solo estudado.

Rabelo (2006) descreveu que a concentração residual de asfalto pode ser comprovada pelos limites máximos e mínimos da medida da penetração, os quais variam com as características de cada solo e que certamente essa concentração residual de asfalto não é levada em consideração pelas especificações vigentes para serviços de imprimação, em virtude da disponibilidade comercial de poucos materiais utilizáveis para imprimação.

Villibor (1981) mostrou que o comportamento do pavimento pode também ser afetado pela eficiência da imprimação realizada. Segundo esse autor, alguns defeitos

observados em campo após a execução e liberação para o tráfego dos pavimentos estavam relacionados às condições particulares apresentadas pela imprimação. Nesse caso, foi observado que o aparecimento desses defeitos estava relacionado com a espessura de penetração da imprimação na base granular (Figura 6).



Fonte: adaptado de Villibor (1981)

Diante da literatura explorada, percebeu-se que há vários fatores que interferem na penetração da imprimação betuminosa: (a) tipo e taxa de ligante; (b) teor de umidade de compactação; (c) massa específica aparente seca máxima; (d) tipo de solo; (e) umidade do solo no momento da imprimação e (f) irrigação prévia da superfície. Esses fatores serão apresentados e discutidos separadamente para o melhor entendimento dos seus efeitos sobre a penetração da imprimação:

- a) tipo e da taxa de ligante - o efeito do tipo de ligante sobre a penetração da imprimação betuminosa foi objeto de estudo de Nogami, Villibor e Fabbri (1989). Esses autores verificaram que após realizarem ensaios de imprimação com SAFL imprimados com asfaltos diluídos CM-30 e CM-70, usando a metodologia proposta em Villibor (1981), que existem variações de penetração devido às propriedades dos materiais betuminosos empregados. Os resultados de penetração obtidos mostraram-se diferentes de acordo com a variação da viscosidade do ligante e da taxa de aplicação usada;
- b) teor de umidade de compactação - foi verificado nos ensaios de imprimação realizados por Nogami, Villibor e Fabbri (1989), para solos lateríticos imprimados com asfalto diluído CM-30, que os valores da penetração betuminosa foram maiores para baixos teores de umidade e diminuíram até o teor ótimo de umidade, quando a partir daí as penetrações se mantiveram em níveis bastante reduzidos chegando em alguns casos a não penetração;

- c) massa específica aparente seca máxima - Nogami, Villibor e Fabbri (1989) observaram que a penetração da imprimação betuminosa, com CM-30, para uma mesma energia de compactação mostrou-se maior no ramo seco da curva de compactação. Entretanto, no ramo úmido dessa curva ocorreu a formação de uma espessa camada de asfalto residual na superfície imprimada, demonstrando indícios de uma penetração menor ou, em algumas vezes, nula. Os autores também observaram uma maior penetração quando a energia de compactação foi menor;
- d) influência do tipo de solo - Rabelo (2006) relatou que o tipo de solo, se mais argiloso ou mais arenoso, influencia na penetração da imprimação betuminosa que é maior nos solos com menor porcentagem de argila;
- e) umidade do solo no momento da imprimação - Segundo Villibor, Nogami e Fabbri (1989), os valores da penetração da imprimação são máximos quando a umidade do solo, no momento da imprimação, situa-se em torno de 50 a 70% da umidade inicial de moldagem, independentemente da energia empregada na sua compactação. Esses autores afirmaram, ainda, que se o solo é moldado em um teor de umidade acima do ótimo, apesar da secagem favorecer o aumento da penetração, essa continuará em níveis bastante reduzidos;
- f) irrigação prévia da superfície – Dantas (1959), verificou-se que após a varredura da superfície a ser imprimada, é necessário realizar uma irrigação da superfície para que haja melhores resultados da penetração. Segundo o autor, a irrigação prévia, em taxas controladas, é um dos artifícios utilizados para melhorar a penetração do ligante asfáltico em bases coesivas. Esse pesquisador recomendou que a irrigação prévia fosse feita 12 horas antes do início da imprimação, devendo essa ser complementada pela raspagem da base com uma motoniveladora antes da execução da imprimação. Ainda, conforme Dantas (1959), essa raspagem, comumente chamada de “arrepisar a base”, tem como finalidade retirar as crostas de material fino existentes sobre a superfície a imprimir. Segundo Villibor, Nogami e Fabbri (1989), em laboratório e após a secagem do Corpo de Prova (CP), antes de imprimação, deve-se realizar o umedecimento da superfície rebaixada do CP à taxa aproximada de 0,5 L/m<sup>2</sup>. Ainda segundo Rabelo (2006) que aplicou taxas de 1,0 L/m<sup>2</sup> para a irrigação prévia, verificou que pode ocorrer uma redução da penetração do ligante

aplicado na base se não houver controle restrito dessa taxa de irrigação, o que pode comprometer o desempenho da imprimação.

O *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA) (2009) cita que em bases que possuem grande quantidade de finos, materiais passantes na peneira de 0,075 mm (# 200), a penetração se torna mais difícil, pois os finos atuam como um filtro e não permitem que as partículas de emulsão penetrem. A mistura mecânica ou a escarificação da superfície é recomendada para produzir uma superfície aceitável quando são utilizadas emulsões.

Nogami, Villibor e Fabbri (1989), verificaram que os solos arenosos finos lateríticos, dependendo do percentual de argila em sua composição, podem apresentar comportamento diferenciado quanto à penetração da imprimação, onde, percentuais altos de argila ocasionam uma redução significativa de penetração do ligante. Portanto, é evidente que o tipo de material exerce influência na penetração do ligante, o que demanda a verificação de outros parâmetros. Nesse sentido, o tempo de cura também é afetado, podendo ser prolongado, especialmente se não for verificada penetração significativa nas primeiras horas após a aplicação do ligante. Essa constatação foi experimentada pelo autor desta tese ao realizar teste com EAIs em diferentes tipos de materiais de bases, onde verificou-se tempos de cura superiores quando da utilização de materiais de formação mais argilosa e que não eram necessariamente de comportamento laterítico.

## **2.5 Outros fatores que influenciam no comportamento da imprimação**

Aqui serão elencados características que importantes para que imprimação consiga contribuir para o funcionamento adequado do pavimento rodoviário.

### **2.5.1 Aderência**

A aderência da imprimação é caracterizada pela resistência da interface entre a camada subjacente imprimada e o revestimento ao cisalhamento, resultante da movimentação dos veículos. Dessa forma, verifica-se que a imprimação funciona como um agente potencializador da aderência além de proteger da ação deletéria da umidade. Assim, ela contribui para a adesão interfacial, para maior eficiência no entrosamento do sistema constituído pelas duas camadas e para a melhoria da capacidade estrutural do pavimento (ISHAI E LIVNEH, 1984).

Essas respostas estruturais das camadas do pavimento, baseadas na teoria elástico-linear de Boussinesq e Burmister, preconizam as seguintes hipóteses (HUANG, 2004): (i) todas as camadas são homogêneas, isotrópicas e possuem comportamento elástico linear ao longo de sua espessura; (ii) o carregamento é uniforme e distribuído sobre carga circular; (iii) existe perfeita aderência entre as camadas garantindo que o sistema funcionará monoliticamente. Wang *et al.* (2016) relatam que a condição de aderência além de fornecer a integridade e a ligação entre camadas possibilita a formação de uma estrutura monolítica capaz de proporcionar a mesma condição de deformação nas camadas dos pavimentos além de mantê-las ligadas quando submetidas às ações externas fazendo que estas trabalhem de forma solidária na estrutura.

A total aderência na interface, porém, é algo que não se pode garantir em campo e em laboratório. Mohammad *et al.* (2002) e Kulkarni (2005) fizeram ensaios de cisalhamento entre camadas para CPs monolíticos comparando-os com os resultados de amostras de dupla camada de misturas asfálticas unidas com diferentes taxas e tipos de pintura de ligação na interface. Os melhores resultados das amostras de dupla camada chegaram a apenas 83% da resistência dos CPs monolíticos (sem interface). Analogamente, a imprimação possui esse papel de unir duas camadas do pavimento onde se espera um comportamento solidário da estrutura, mas verifica-se que de fato se assemelha ao comportamento visto com a pintura de ligação gerando uma interface que merece atenção no momento da escolha do ligante e da definição da taxa de aplicação.

A aderência corresponde à interação de interface entre dois substratos. Assim, no caso dos pavimentos asfálticos, a interação base-revestimento é dada pela imprimação. Chen e Huang (2010) verificaram que a falta de pintura de ligação é associada à baixa aderência entre camadas asfálticas, mas que, por outro lado, o excesso de ligante cria um filme mais espesso e deformável, que diminui o atrito e o intertravamento entre as camadas, causando escorregamento entre elas (TASHMAN, 2006). Na imprimação o efeito é similar, pois apesar do ligante penetrar no material de base ao invés de romper, como ocorre nas emulsões usadas em pinturas de ligação, o fato é de que o residual de asfalto presente na base após a cura do ligante auxilia nessa ligação. Dessa forma, entende-se que a taxa de aplicação e o tipo de ligante influenciam nessa aderência, tanto na imprimação quanto na pintura de ligação, podendo unir ou facilitar o deslizamento entre as camadas. Por tanto, nota-se também que, existe uma taxa ótima de aplicação do ligante que constitui, portanto, um fator preponderante para garantir boa aderência entre camadas. Assim, percebe-se que a construção de pavimentos em multicamadas

garante melhorias no grau de compactação das misturas, mas, por outro lado, cria zonas de fragilidade na estrutura.

Outro fator preponderante vem das repetições de carga oriundas dos veículos, os danos acumulados entre as camadas do pavimento, que podem agravar sua integridade estrutural reduzir a capacidade de carga da mesma. Isso mostra que o efeito da carga de tráfego se acumula até um determinado valor, onde a tensão de ruptura da interface se torna maior do que a resistência ao cisalhamento da camada de aderência (WANG *et al.*, 2017). Esse efeito poderá resultar na falha do desempenho da ligação entre camadas causando uma redução na vida útil da estrutura do pavimento.

### **2.5.2 Coesão**

A coesão da base imprimada pode ser caracterizada pela resistência ao cisalhamento do solo que normalmente, dada pela força de atração entre as superfícies de suas partículas, tem suas propriedades ampliadas quando penetrada pela imprimação. Dessa forma, verifica-se que a imprimação funciona como um agente melhorador da coesão e protege a base da ação deletéria da umidade.

Acredita-se que força de ligação está diretamente relacionada com a espessura do filme de ligante. Amostras de solo natural imprimadas com filme asfáltico mais espesso, após serem expostas à umidade, apresentaram falha coesiva, já as amostras com película mais fina sucederam à falha adesiva (MORAES *et al.*, 2011).

Essa coesão do solo, ou seja, a força de atração entre as superfícies de suas partículas, pode ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas (MULLINS *et al.*, 1990). Já a coesão aparente resulta da tensão superficial da água nos capilares do solo que forma meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados que tendem a aproximá-las entre si. Assim, a coesão aparente constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados.

Sabendo-se que, com a presença de umidade a resistência do solo diminui deixando-o solo mais suscetível à falha, assim, verifica-se a necessidade de um agente melhorador da coesão e que o proteja da ação deletéria da umidade, tal atributo pode ser fornecido pela imprimação. Sendo assim, a imprimação tem a função de melhorar a coesão na camada de solo que é atingida pela penetração do ligante, bem como conferir a superfície da camada imprimada aderência necessária para receber a camada de rolamento, fazendo com que a estrutura suporte melhor os esforços e solicitações do tráfego.

Normalmente, a camada de base é preparada com ligante asfáltico que impermeabiliza a sua superfície, ligando os vazios capilares e partículas minerais soltas, além de fornecer a aderência entre a base e concreto asfáltico (KULKARNI, 2005). Esse autor relata que para aplicação de asfaltos diluídos a variação da temperatura de serviço também é um parâmetro que influencia no desempenho da imprimação podendo promover danos precoces ao pavimento, como: descolamento de placa em temperatura mais baixa (20°C) e em elevadas temperaturas causando escorregamento da camada de revestimento. Acredita-se ainda que a viscosidade do ligante influencie na aderência entre camadas (CHEN e HUANG, 2010).

Em temperaturas mais altas verifica-se uma maior influência do atrito interno na resistência da aderência do que mesmo a influência do material de ligação e da taxa de aplicação, e o atrito interno depende da carga normal e da textura da superfície.

Vam Dam *et al.* (1987) afirmaram que a aderência inadequada entre as camadas de um pavimento encurta drasticamente sua vida útil e requer que sejam tomados certos cuidados durante a construção para que essa condição de ligação seja assegurada. O deslizamento entre as camadas, por exemplo, é o resultado de uma ligação interfacial fraca. Parte da superfície de asfalto se move lateralmente para fora a partir do resto da superfície devido aos esforços laterais e de cisalhamento induzidas provocadas por cargas de tráfego (HUANG, 2004). Sendo assim, a parte inferior da camada superior desenvolve esforço de tensão de tração e a parte superior da camada inferior desenvolve tensão de compressão, esse movimento favorece o escorregamento entre as camadas opostas, uma vez que a ligação interfacial é prejudicada pelas tensões descritas entre as duas camadas (VAM DAM *et al.*, 1987).

Almeida (2017) ao medir a coesão superficial de bases imprimadas com diferentes ligantes (ADPs e EAIs) em dois solos distintos, um argiloso e outro arenoso, desenvolveu um método de laboratório para avaliação da coesão superficial na base imprimada como forma de se utilizar desse parâmetro para fins de indicativo de cura do ligante na base, sugeriu, a partir de resultados de imprimação e coesão e da experiência laboratorial, adotar 10,0 kgf.cm para aceitação quanto à coesão de solos imprimados

### ***2.5.3 Desgaste superficial***

Em serviços de pavimentação, após a execução da imprimação betuminosa, existe um período antes da execução do revestimento onde o trecho pode ser liberado para o tráfego sob a restrição de carga e velocidade dos veículos. A fim de avaliar esse período são necessários

ensaios de desgaste para avaliar se a base pronta e imprimada suportará a ação do tráfego nesse período.

Para avaliar a resistência proporcionada pela superfície nessas situações, Duque Neto (2004), ao estudar o tratamento antipó, utilizou em laboratório os ensaios de desgaste WTAT (*Wet Track Abrasion Test*) e LWT (*Loaded Wheel Test*), convencionalmente utilizados na dosagem de microrrevestimento asfáltico e preconizados pelas normas NBR 14746 (2014) e NBR 14841 (2015), respectivamente. As adaptações desses dois ensaios serão vistas nos subitens que se seguem.

### 2.5.3.1 Adaptação do ensaio LWT

O ensaio de LWT (*Loaded Wheel Test*) tem o objetivo de medir o afundamento em trilha de roda (ATR) da camada de base, a partir do número de passadas de roda e de um carregamento padrão, representando o desgaste sofrido pela superfície da imprimação quando o tráfego é liberado antes da aplicação do revestimento, ou seja, simulando a ação do tráfego sobre a base imprimada. Nesse sentido, com o intuito de melhorar as propriedades de resistência da base é realizada a imprimação que ao causar o endurecimento da superfície da base associado à porção do solo penetrada pela imprimação. Duque Neto (2004) utilizou o mesmo equipamento LWT da norma aplicada ao microrrevestimento com adoção das seguintes modificações:

- a) foi utilizado um molde composto de chapas de 13,0 mm de espessura a fim de se obter um molde de 25,0 mm de altura, 51,0 mm de largura e 381,0 mm de comprimento;
- b) foi utilizada uma base de fixação do molde;
- c) empregou-se um êmbolo de compactação, com dimensões de 20,0 mm de altura, 48,0 mm de largura e 379,0 mm de comprimento;
- d) foi feita a compactação do solo dentro do molde de forma percussiva com o uso de um soquete de compactação Marshall;
- e) o ensaio de adesão de areia não se aplicou à técnica da imprimação e, portanto não foi utilizada no caso do uso do LWT.

Outro cuidado tomado para a realização da imprimação nas placas foi decidir ou não pela utilização da irrigação prévia, já que em estudos anteriores (Villibor, 1989; Castro, 2003) essa foi vista como uma importante etapa do serviço ao se entender que tal medida auxiliava na penetração do ligante de imprimação atuando como um agente de limpeza dos finos presentes na camada de base após a varrição. Destaca-se que, que não é necessário a espera

de 24 horas após a compactação da base, pois a partir dos estudos desenvolvidos por Castro (2003) ao atestar que a influência da molhagem prévia após a compactação ou com a espera de 24 horas para a imprimação do solo não é muito significativa nos resultados de penetração. O autor chegou a essa conclusão ao testar duas amostras de ligantes, sendo uma a emulsão à base de óleo de xisto e uma outra emulsão convencional do tipo RR 1C, em três amostras de solos, realizando o ensaio de imprimação em pares de CPs onde, um era imprimado 15 minutos após moldagem e o outro recebia irrigação de água prévia 15 minutos após moldagem e 15 minutos após se fazia à imprimação. E ainda, repetiu a mesma operação, só que com 24 horas após moldagem. Com isso, a moldagem das placas se deu com o solo na umidade ótima, que após 15 minutos foram imprimadas e para simular a cura de campo as amostras foram submetidas à secagem em estufas por 48 horas à temperatura de 50°C.

Duque Neto (2004), em sua pesquisa definiu pontuações qualitativas para as medidas de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) (Tabelas 2, 3 e 4) relacionando à atribuição de notas a verificação das amostras feitas por observações visuais quanto aos defeitos, arrancamentos, presença ou não de exsudação e destruição da placa. Para tanto, o autor considerou conceitos de aprovação (muito bom e bom) ou de reprovação (ruim e péssimo) do ensaio após a espera da cura dos ligantes aplicados.

Tabela 2 – Atribuições para a amostra no ensaio LWT – base imprimada.

Notas	Observações Visuais	ATR (mm)
10	Sem defeitos, pouco desgaste, ausência de exsudação	< 2,0
8	Poucos defeitos, arrancamento de até 40% da penetração, pequena exsudação, aparecimento de lombadas sem arrancamento de placas	2,0 a 4,0
5	Arrancamento acima de 40% da penetração, arrancamento nas partidas, exsudação, aparecimento de lombadas com arrancamento de placas	4,0 a 6,0
0	Destruição total pela penetração	> 6,0

Fonte: Duque Neto (2004)

Tabela 3 – Atribuições para a amostra no ensaio LWT – camada antipó

Notas	Observações visuais	ATR (mm)
10	Sem defeitos, pouco desgaste (arrancamento menor que 20%), ausência de exsudação, quantidade material solto menor que 50%	< 4,0
8	Poucos defeitos, arrancamento de até 50% do antipó, pequena exsudação, aparecimento de lombadas sem arrancamento de placas	4,0 a 6,0
5	Arrancamento acima de 50% do antipó, arrancamento nas partidas, exsudação, aparecimento de lombadas com arrancamento de placas	6,0 a 10,0
0	Destruição total do antipó	> 10,0

Fonte: Duque Neto (2004)

Tabela 4 – Conceitos para qualificação do ensaio LWT

Pontuação	Conceitos
18 a 20	Muito Bom
15 a 17	Bom
8 a 14	Ruim
0 a 7	Péssimo

Fonte: Duque Neto (2004)

Esse protocolo desenvolvido por Duque Neto (2004) impulsionou a pesquisa de Almeida (2019) que baseado na metodologia adotada realizou algumas modificações para adequação à realidade encontrada na superfície imprimada. Para o ensaio LWT foram feitas as seguintes modificações: (a) o molde utilizado teve sua altura modificada para 25,0 mm ao invés de 13,0 mm; (b) empregou-se um êmbolo de compactação, com dimensões de 20,0 mm de altura, 48,0 mm de largura e 379,0 mm de comprimento; (c) foi usado um soquete Marshall para a compactação; (d) o ensaio de adesão de areia não se aplicou à técnica de imprimação e, portanto, não foi utilizada no caso do uso do LWT.

#### 2.5.3.2 Adaptação do ensaio WTAT

A abrasão da imprimação é caracterizada pelo desgaste sofrido pela superfície da imprimação quando do tráfego liberado momentaneamente antes da aplicação do revestimento, e que tem suas propriedades de resistência à abrasão ampliada pela porção do solo penetrada pela imprimação. Dessa forma, verifica-se que imprimação funciona como um agente potencializador da resistência à abrasão. Assim, o ensaio WTAT (*Wet Track Abrasion Test*) tem o objetivo de verificar a perda por abrasão da superfície imprimada causada pela peça de desgaste que simula a passagem dos veículos. Quando aplicado à imprimação, o ensaio permite ainda uma avaliação da durabilidade da técnica, da taxa e do ligante empregado.

O equipamento utilizado por Duque Neto (2004) foi o mesmo da norma aplicada ao microrrevestimento (NBR 14746, 2014), com algumas modificações relacionadas ao molde, à compactação, ao ensaio de cone e ao ensaio de abrasão úmida, descritas:

- a) foi utilizado um molde composto de moldes menores de 13,0 mm de altura compondo um cilindro fechado na base nas dimensões internas de 25,0 mm de altura e 300,0 mm de diâmetro;
- b) foi usado um soquete Marshall para a compactação da camada de base;
- c) não foi utilizado o ensaio de cone no caso da avaliação da imprimação;

d) foi realizado o ensaio de abrasão WTAT sem a presença de água na verificação da imprimação.

A moldagem dos corpos de prova se deu com o lançamento de duas camadas interpostas compactadas com o soquete Marshall na energia determinada. Após a compactação foi executada a imprimação na taxa determinada e a amostra foi curada em estufa a 50°C por 48 horas, sendo efetuado o resfriamento da amostra até a temperatura ambiente para o ensaio ser realizado. Após a finalização do ensaio foi atribuída uma pontuação a partir do somatório das 3 notas relacionadas à perda de massa por abrasão, ao deslocamento da superfície e as observações visuais quanto ao comportamento do conjunto solo-imprimação.

As pontuações tem a finalidade de classificar as amostras (Tabelas 5 e 6) relacionando à atribuição de notas a observações visuais quanto ao arrancamento, presença ou não de exsudação e desgaste. Para tanto, Duque Neto (2004) considerou conceitos de aprovação (muito bom e bom) ou de reprovação (ruim e péssimo) a partir do ensaio WTAT para investigar o comportamento de solos imprimados com a emulsão à base de óleo de xisto e a emulsão RR-1C que foram utilizadas para a imprimação.

Tabela 5 – Atribuições para a amostra no ensaio WTAT – base imprimada

Notas	Observações visuais	Perda por Abrasão (%)	Deslocamento (mm)
10	Arrancamento de até 10% e ausência de exsudação	< 30	< 0,5
8	Arrancamento de 10% a 20% e pequena exsudação	5 a 10	0,5 a 1,0
5	Arrancamento de 10% a 50% e/ou exsudação	10 a 20	1,0 a 1,5
0	Arrancamento maior que 50% e/ou exsudação	> 20	> 1,0

Fonte: Duque Neto (2004)

Tabela 6 – Conceitos para qualificação do ensaio WTAT

Pontuação	Conceitos
28 a 30	Muito Bom
23 a 27	Bom
16 a 22	Ruim
0 a 15	Péssimo

Fonte: Duque Neto (2004)

Já para o ensaio WTAT, Almeida (2019) fez as seguintes modificações: (a) foi utilizado um molde composto de moldes menores de 13,0 mm de altura compondo um cilindro fechado na base nas dimensões internas de 25,0 mm de altura e 300,0 mm de diâmetro; (b) foi usado um soquete Marshall para a compactação; (c) o ensaio de cone não foi utilizado no caso da avaliação da imprimação; (d) foi realizado o ensaio de abrasão WTAT sem a presença de

água na verificação da imprimação. Para tanto, as características da peça de abrasão foram mantidas.

#### ***2.5.4 Questões ambientais relacionadas à imprimação betuminosa***

As obras de infraestrutura rodoviária desempenham um papel crucial como impulsionadoras do desenvolvimento econômico, porém, geram modificações ambientais significativas. Por isso, existe uma busca contínua por materiais que possam reduzir os impactos ambientais, visando evitar, ou pelo menos mitigar seus efeitos. É importante ressaltar que a utilização de alguns materiais em infraestrutura pode resultar em danos irreversíveis ao meio ambiente, tanto em nível local quanto regional, no médio e longo prazo (DNIT, 2006).

Por conta disso, é importante destacar a crescente preocupação com o meio ambiente que estão intrinsecamente ligadas as atividades desenvolvidas na pavimentação asfáltica, e que passam pela produção e vão até a sua aplicação. É sabido ainda que o processo mais comum utilizado para manuseio e beneficiamento do ligante asfáltico é o seu aquecimento, sendo esse processo indispensável para a aplicação do cimento asfalto na pavimentação, que por sua vez libera fumos contendo Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e seus derivados, sendo essa uma fonte principal de exposição humana.

Com o objetivo de encontrar alternativas menos poluentes para aplicação em serviços de imprimação, alguns autores exploraram o uso de diferentes tipos de óleos de base vegetal para diluir o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Seguindo essa tendência de empregar Biodiluentes com o CAP, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC) vem investigando, desde 2005, óleos de base vegetal para modificar ligantes, além de desenvolver novos ensaios para uma avaliação mais precisa da imprimação. Os principais estudos desse grupo estão disponíveis em Rabelo (2006), Silva (2009), Vasconcelos (2009), Silva (2012), Almeida (2013 e 2014), Gondim (2015) e Almeida (2017).

Rabêlo (2006) em sua pesquisa testou uma mistura composta por 60% de CAP (cimento asfáltico de petróleo) e 40% de LCC (Líquido da Casca da Castanha de Caju) avaliando a penetração desse ligante na base. Mas, o autor verificou, a partir dos resultados obtidos, que do ponto vista técnico a penetração foi favorável em solo do tipo mais arenoso. Silva (2009) investigou uma mistura de CAP com biodiesel de soja, denominado CAP/BIO, na proporção de 60% de CAP e 40% de biodiesel, como uma tentativa inicial de empregar biocombustíveis como diluentes do asfalto. Aplicou essa mistura em uma base constituída por

solo e Resíduo de Construção e Demolição (RCD), nas proporções de 40, 50 e 60% de RCD na mistura com o solo, chegando à conclusão de que o material testado apresentou melhores resultados de penetração em bases mais secas e com energias de compactação abaixo da modificada, pois só assim, atingiu penetrações maiores que 4 mm, adotada como penetração mínima satisfatória pelo autor.

Vasconcelos (2009), por sua vez, utilizou uma mistura de CAP com biodiesel de soja, denominado CAP/BIO, na proporção de 60% de CAP e 40% de biodiesel, onde procurou fazer uso de biocombustíveis como diluentes do asfalto. Aplicou essa mistura em uma base constituída por solo e Resíduo de Construção e Demolição (RCD). Encontrou viabilidade para aplicação, do ponto de vista da penetração em bases abaixo da umidade ótima de compactação, mas com restrições em taxas mais altas e em bases mais úmidas onde não houve penetração suficiente do ligante na base (< 4mm).

Silva (2012) fez uso de uma Emulsão de Cera de Carnaúba (ECC), por acreditar que esse material possuía um potencial aglutinante e assim fosse aproveitado para fins de aplicação em serviços de imprimação. No entanto, embora os testes iniciais tenham demonstrado uma penetração satisfatória do material na base de solo granular, constatou-se que o mesmo apresentava dificuldades de percepção após a cura na base. Diante disso, concluiu-se que seria necessário pigmentar a emulsão e conduzir outros ensaios de avaliação de imprimação para confirmar sua adequação para aplicações rodoviárias. Vale ressaltar que essas medidas adicionais podem acarretar custos extras, os quais não foram considerados pela autora.

Em sua pesquisa, Almeida (entre 2013 e 2017) inicialmente introduziu um novo método intitulado método da cápsula que serviu para realizar testes mais rápidos em diferentes ligantes com maior rapidez e com menor gasto de materiais, durante os anos que se seguiram propôs a avaliação de outros parâmetros que não somente a penetração como critério de qualidade da imprimação, como medição de coesão para fins de medir a cura da imprimação, desgaste superficial para verificar a influência do tráfego liberado momentaneamente após a cura da imprimação e antes da execução da solução de revestimento. Em seguida, o autor desenvolveu uma metodologia para a aferição da aderência da base imprimada, intuindo que a imprimação possui um importante papel na integridade de um pavimento de múltiplas camadas. Durante sua pesquisa de mestrado modificou um CAP convencional com um solvente de base vegetal de nome D-limoneno (óleo essencial retirado das cascas de frutas cítricas), testando-o juntamente com ligantes comerciais alternativos, menos poluentes, as EAIs foram desenvolvidas após a sua inclusão na Norma DNIT-ES 144 de 2014 que possibilitou seu uso de forma mais difundida. Onde ao longo desses anos de pesquisa evoluiu no conhecimento sobre

ligantes para imprimação e trouxe à pauta outros parâmetros e critérios de aceitação da imprimação.

Contudo, dentre os autores citados, Gondim (2015), ao introduzir um agente modificador em um CAP (10% de seiva de aveloz), depois diluindo-o com D-limoneno na proporção de 52% CAP com 48% de solvente, verificou que o ADP obtido apresentou resultados satisfatórios quanto à penetração da imprimação quando comparado ao ligante de referência CM-30.

Diante do exposto, torna-se necessário o estudo de novas alternativas com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes em serviços de imprimação betuminosa. E de como podem ser avaliadas essas soluções de forma a atestar viabilidade técnica para sua aplicação, como possíveis soluções elencam-se as emulsões e ligantes alternativos que utilizam diluentes vegetais que mostram indícios de redução nas taxas de emissão de agentes nocivos, além do fato de contribuir para uma menor dependência do petróleo, contribuindo para a redução do efeito estufa, o que ainda é um problema que precisa ser muito discutido na atualidade.

### ***2.5.5 Considerações finais***

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliométrica sobre os principais estudos realizados ao longo dos últimos anos, incluindo aspectos importantes sobre o serviço de imprimação, novos materiais, métodos de avaliação e fatores relativos ao desempenho da imprimação. Foi possível verificar a carência de mais estudos sobre imprimação betuminosa. Além da penetração, o autor do presente trabalho considera muito importante que características como adesão, coesão e desgaste também sejam avaliados nos trabalhos. Outra motivação também imprescindível para o avanço do conhecimento é a avaliação de ligantes comerciais e alternativos para melhor eficiência dos serviços de imprimação. No capítulo que se segue será apresentado um artigo, já publicado na Revista Transportes em 2022, que abordou esses parâmetros elencados acima para a seleção de ligantes adequados para serviços de imprimação à luz da melhor técnica e observando variáveis importantes para o melhor desempenho da imprimação.

### **3 HIERARQUIZAÇÃO DE MELHORES LIGANTES A SEREM APLICADOS NA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DE RODOVIAS EM FUNÇÃO DE CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E AMBIENTAIS**

#### **RESUMO**

Na área de pavimentação, verifica-se pouca informação sobre o comportamento dos produtos comerciais e alternativos para emprego em imprimação betuminosa. No Brasil, há necessidade de se desenvolver estudos sobre o desempenho de ligantes alternativos menos poluentes que venham, no futuro, substituir o asfalto diluído de petróleo do tipo Cura Média (CM-30) para tal serviço. Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa foi investigar o comportamento de ligantes comerciais e alternativos para o emprego em serviços de imprimação betuminosa à luz de parâmetros tecnológicos e ambientais. Para tanto, foram avaliadas as características de penetração, coesão, aderência, desgaste superficial e redução de emissões de bases imprimadas com solos diferentes, um arenoso e outro argiloso, usando-se um ligante comercial de referência do tipo CM-30 e seis ligantes alternativos comerciais. Para a base arenosa testada, os resultados foram satisfatórios para os índices avaliados, salvo variações causadas pelo tipo de ligante. Já para a base argilosa, as alterações de umidade tiveram uma maior parcela de influência nas alterações dos índices avaliados. Dessa forma, foi possível ranquear os ligantes que apresentaram comportamento adequado frente aos tipos de base em que foram aplicados. Assim, o ligante identificado como G14 apresentou resultados promissores quando comparado ao ligante de referência para todas as características avaliadas seguido dos ligantes identificados como G8 e G18. Para o caso do ligante G18, foi necessário um aquecimento de 120 °C o que pode inviabilizá-lo pelo gasto de energia para sua aplicação. Quanto à análise ambiental, observou-se que o produto desenvolvido G8 apresentou níveis de emissão atmosférica bem mais baixos que o asfalto diluído (CM-30), sendo uma alternativa técnica e ambientalmente mais autossustentável em substituição ao CM-30. Consta ao final um quadro comparativo entre todos os ligantes testados e as características encontradas para cada ligante onde foi possível elencar o mais adequado.

**Palavras-chave:** Pavimentação, Imprimação, Sustentabilidade.

### 3.1 Considerações iniciais

A imprimação é a aplicação de um material asfáltico sobre a superfície de base concluída, antes da execução de um revestimento asfáltico qualquer, a fim de propiciar a ligação entre essas camadas (DNIT, 2014). Mantilla e Buttom (1994), American Society for Testing and Materials - ASTM (D8-02, 2003), Asphalt Institute (AI) (2001) e Vasconcelos (2009), atribuem à imprimação as seguintes funções: (a) endurecimento e estabilização da parte superior da base ao preencher os vazios capilares dessa camada, impermeabilizando-a; (b) promoção da coesão e adesão da base com a camada asfáltica sobrejacente e (c) proteção da camada de base às intempéries e aos efeitos do tráfego antes da execução do revestimento.

A imprimação auxilia ainda na estabilidade da mistura asfáltica durante sua execução, impedindo sua movimentação lateral. Nas bases de rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT), a imprimação une as partículas de poeira, além de promover a ligação entre a base e a uma nova camada, impedindo o deslizamento de pavimentos esbeltos sobrepostos e ainda apresenta alta flexibilidade a fim de acompanhar as deformações significativas da estrutura provenientes dos esforços horizontais de frenagem e aceleração dos veículos (VILLIBOR *et al.*, 1989; BERNUCCI *et al.*, 2010).

Para que exista essa flexibilidade é necessário que o revestimento e a base estejam bem aderidos, trabalhando de forma solidária. Assim, é necessário que a imprimação penetre na base para que a mesma desempenhe bem as suas funções. Entretanto, verifica-se que somente esse parâmetro não é suficiente para garantir seu bom desempenho, pois Villibor *et al.* (1989) e Castro (2003) apontam uma faixa de resultados satisfatórios para a penetração (entre 4,0 e 13,0 mm), onde, as penetrações menores que 4,0 mm ocasionam a exsudação do ligante na base e maiores que 13,0 mm, o desprendimento da camada de rolamento. Rabelo (2006) cita que essa faixa deve ser apenas de 4,0 a 10,0 mm para que a imprimação tenha um bom desempenho. Essa controvérsia sobre a faixa de penetração é fruto das diferentes condições experimentadas por cada pesquisa, tais como: o tipo de material granular, umidade durante o serviço de imprimação, taxa de irrigação prévia, tipo e taxa de ligante. O que deixa dúvida sobre a verificação da penetração como único indicador da qualidade da imprimação.

Ainda assim, não há no Brasil um ensaio normatizado que avalie a qualidade da imprimação a partir de outros parâmetros como coesão, adesão, desgaste superficial, comportamento mecânico, etc. O que ocorre é a associação da qualidade da imprimação à concentração residual de asfalto no topo da base e que essa varia também de acordo com as

características dos materiais empregados. Dessa forma, se torna importante investigar outros parâmetros, além da penetração, para melhor entendimento do comportamento dessa interface.

Essa interface é ocasionada pela prática da construção de pavimentos em multicamadas, exigindo que entre essas camadas exista uma ligação suficiente que permita uma melhor distribuição das tensões e deformações na estrutura do pavimento, assim, deve funcionar como um sistema único, portanto, devidamente interligado. Assim, a resposta estrutural das camadas do pavimento, baseadas na teoria elástico-linear de Boussinesq (1885) e Burmister (1943 e 1945), preconizam as seguintes hipóteses (HUANG, 2004): (i) todas as camadas são homogêneas, isotrópicas e possuem comportamento elástico linear ao longo de sua espessura; (ii) o carregamento é uniforme e distribuído sobre carga circular e (iii) existe perfeita aderência entre as camadas garantindo que o sistema funcionará monoliticamente.

Entretanto, sabe-se que devido à heterogeneidade dos materiais constituintes das camadas de um pavimento típico fica difícil garantir a total aderência entre elas, mesmo em laboratório. Mohammad *et al.* (2002) e Kulkarni (2005) compararam o cisalhamento entre camadas para CPs monolíticos e amostras de dupla camada de misturas asfálticas unidas com diferentes taxas e tipos de pintura de ligação em laboratório. Esses autores verificaram que as amostras de dupla camada apresentaram 83% da resistência dos CPs monolíticos. Assim, percebe-se que a construção de pavimentos em multicamadas garante melhorias no grau de compactação das misturas, mas, por outro lado, cria zonas de fragilidade na estrutura. Acredita-se que essa zona de fragilidade ocorre também entre a camada imprimada e o revestimento.

Além disso, acredita-se que propriedades intrínsecas ao tipo de solo, como a coesão, possam contribuir para uma melhor aderência interfacial. A coesão do solo é um dos fatores que pode melhorar a resistência do solo ao cisalhamento e é dada pela força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas. Já a coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados que tendem a aproximá-las entre si (MULLINS *et al.*, 1990).

Sabe-se que o excesso de umidade altera as propriedades do solo, deixando-o suscetível à falha. Logo, verifica-se a necessidade de um agente melhorador da coesão e que o proteja da ação deletéria da água, tal atributo pode ser fornecido pela imprimação. Assim, a imprimação tem a função de melhorar a coesão na camada de solo que é atingida pela penetração do ligante, como conferir a superfície da camada imprimada aderência necessária para receber a camada de rolamento, fazendo com que a estrutura suporte melhor as solicitações

do tráfego. Essas argumentações são também fortalecidas por: Rabelo (2006); Senadheera *et al.* (2007); Ouyang *et al.* (2020).

Normalmente, a camada de base é imprimada com ligante asfáltico que impermeabiliza a sua superfície, ligando os vazios capilares e partículas minerais soltas, além de fornecer a aderência entre a base e o revestimento asfáltico (KULKARNI, 2005). A aderência inadequada entre as camadas de um pavimento encurta drasticamente sua vida útil requerendo certos cuidados durante a construção para que essa condição de ligação seja assegurada (VAM DAM *et al.*, 1987).

Outra questão que deve ser observada é a crescente preocupação com o meio ambiente que permeia as atividades ligadas à pavimentação, desde sua produção, transporte e aplicação. Sabe-se que para a aplicação de cimento asfalto na pavimentação se faz necessário o aquecimento, que acaba liberando fumos que contêm Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e seus derivados. Isto consiste na principal fonte de exposição humana, sendo a concentração de HPAs liberada dependente da composição do asfalto e da temperatura desta aplicação (POŚNIAK, 2005; SCHREINER, 2011). Os fumos de asfalto podem ser liberados no ambiente, particionados no ar nas fases gasosa e particulada. Muitos dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) emitidos são removidos durante o processo de industrialização do asfalto. No entanto, alguns compostos residuais permanecem e são emitidos durante o armazenamento, transporte e pavimentação (BOCZKAJ, 2014). Além das questões relacionadas aos ligantes asfálticos, os Asfaltos Diluídos de Petróleo (ADPs) também são importantes em relação às emissões atmosféricas. Mesmo sendo aplicados em temperaturas menores, por conta do diluente, quantidades importantes de VOCs são liberadas pelos ADPs.

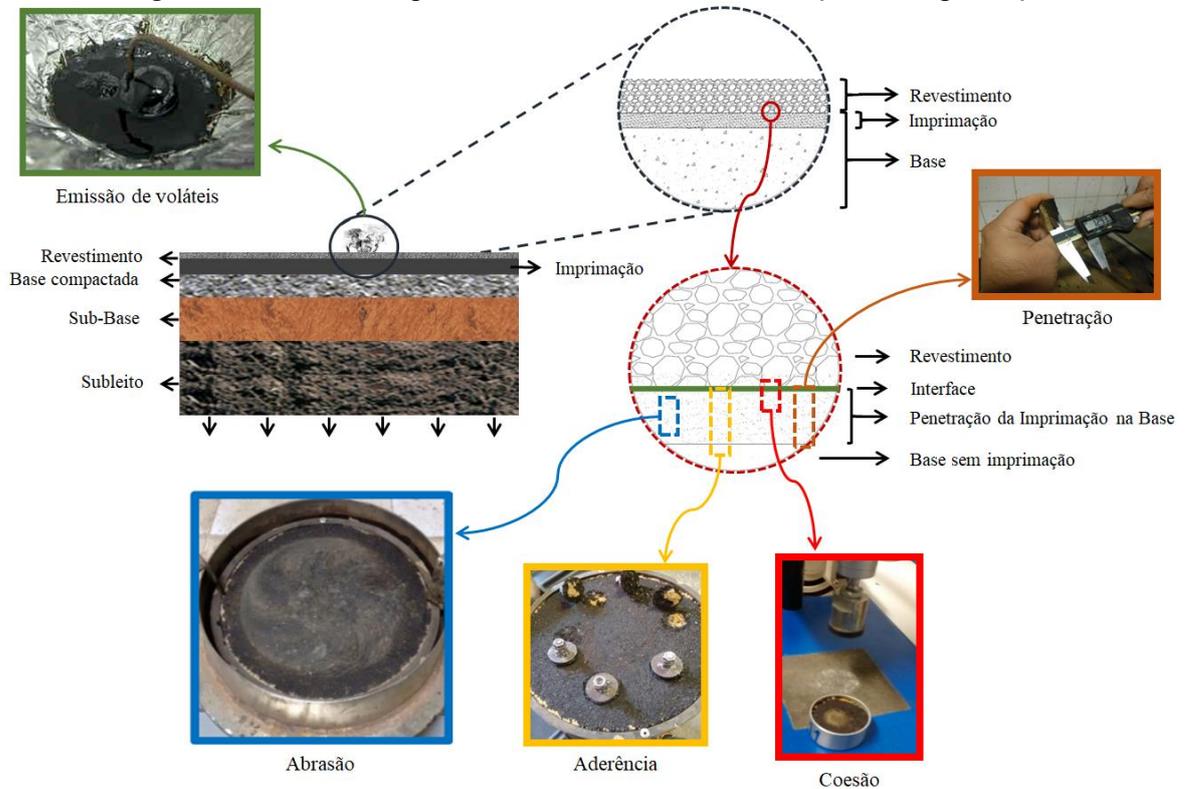
Pelo exposto nos parágrafos anteriores, o objetivo geral deste artigo foi investigar o comportamento de ligantes comerciais e alternativos para o emprego em serviços de imprimação betuminosa à luz de parâmetros tecnológicos e ambientais.

### **3.2 Materiais e métodos**

O programa experimental para compreender melhor a interação solo/ligante asfáltico abordou a caracterização, a classificação, os ensaios mecânicos e as análises das emissões de voláteis de ligantes diferentes. Para se investigar essa interação, foram usados 02 solos (um arenoso e outro argiloso) típicos de RBVTs do estado do Ceará e 07 ligantes para imprimação, sendo: 06 alternativos e 01 comercial (referência do tipo CM-30). Esses materiais

foram avaliados em laboratório (Figura 7) por meio dos ensaios de: (i) penetração da imprimação, (ii) coesão, (iii) aderência, (iv) desgaste superficial e (v) ambientais.

Figura 7 – Resumo esquemático dos ensaios de avaliação da imprimação



Fonte: Próprio Autor (2021)

Neste artigo, 2 produtos diferentes foram analisados comparativamente utilizando-se o Dispositivo de Extração e Coleta (DEC) e determinação por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção por arranjo de diodos (HPLC-DAD). A temperatura de aquecimento do gás de arraste foi fixada em 60 °C durante 60 minutos de ensaio. Os compostos investigados foram CAP + querosene da aviação e CAP + diluente alternativo.

### 3.2.1 Caracterização dos materiais (Solos e Ligantes)

Foram coletados dois solos, um arenoso e um argiloso, provenientes da Região Metropolitana de Fortaleza, onde foram realizados os ensaios de caracterização básica e ensaios mecânicos. Já os materiais betuminosos comerciais (01 comercial de referência e 06 fluidos imprimantes) foram submetidos aos ensaios de caracterização segundo as normas vigentes. O ligante comercial betuminoso foi o asfalto diluído de cura média (CM-30), nomeado com as

letras LR (Ligante de Referência), sendo escolhido por ser o material tradicionalmente mais utilizado para imprimação de bases granulares no estado do Ceará nos últimos anos.

Foram também investigados 05 fluidos para imprimação alternativos com potencial de substituírem o CM-30 por razões ambientais. Os fluidos foram nomeados de G8, G14, G15, G17 e G18, além de uma emulsão especial para imprimação (EAI), nomeada de E1. Ratifica-se que os fluidos imprimantes investigados não estão disponíveis no Ceará a não ser o fluido comercial de referência.

Os ensaios no ADP CM-30 e nos fluidos imprimantes alternativos foram realizados nos laboratórios dos fabricantes. Para o caso do CM-30 foram realizados os ensaios de: viscosidade cinemática, ponto de fulgor, destilação a 225 °C, 260 °C e 316 °C, resíduo a 360 °C, água por destilação, viscosidade, solubilidade no tricloroetileno e ductibilidade no resíduo da destilação. Para os ligantes comerciais foram realizados os ensaios: viscosidade Saybolt-Furol à 25 °C, resíduo por evaporação, peneiramento, sedimentação, destilação - solvente destilado e Ph.

### **3.3 Ensaios de imprimação**

A seguir serão discriminados os ensaios de caracterização realizados nas amostras imprimadas com todos os ligantes testados nos dois solos utilizados.

#### **3.3.1 Ensaios de penetração**

Para avaliação da penetração do ligante betuminoso adotou-se, como satisfatório as penetrações que ficaram entre 4,0 e 13,0 mm (DANTAS, 1959; VILLIBOR *et al.*, 1989; CASTRO, 2003; DUQUE NETO, 2004). Todos os ligantes (comerciais e alternativos) foram avaliados segundo uma taxa única de ligante (1,2 L/m<sup>2</sup>) e na umidade ótima menos 2% (W<sub>ót</sub> – 2%), por meio do método da cápsula (ALMEIDA *et al.*, 2014) para a seleção inicial de ligantes e posteriormente pelo cilindro Marshall modificado (RABELO, 2006) para validar a metodologia simplificada do método da cápsula.

#### **3.3.2 Coesão da base imprimada**

Para a avaliação da coesão superficial da base imprimada foi realizado o ensaio de cisalhamento por torção, utilizando-se um coesímetro (ALMEIDA *et al.*, 2017). Entendeu-se

que por meio desse ensaio foi possível medir o acréscimo da coesão superficial fornecida pela aplicação do ligante betuminoso a partir da verificação da coesão em tempos de cura diferentes (24, 48 e 72 horas).

### 3.3.3 Aderência da base imprimada

Para avaliar a aderência da camada imprimada com o revestimento e a fim de estudar essa interface, foi realizado o ensaio de aderência (ALMEIDA *et al.* 2016). Esse método mensurou a resistência ao cisalhamento da camada de solo imprimada, onde foi possível verificar um ganho de resistência proveniente da aplicação do ligante asfáltico na base, bem como a variação dos valores de resistência para cada tipo de ligante testado. A Figura 8a mostra os discos arrancados após o ensaio, na Figura 8b verifica-se o detalhe da porção da base arrancada e, por fim, a Figura 8c apresenta a placa rompida para medição da penetração.

Figura 8 – Ensaio de aderência por meio da resistência ao arrancamento da base imprimada



(a) discos arrancados  
Fonte: Próprio Autor (2021)

(b) parte da base arrancada

(c) penetração medida

Por falta de valores comparativos para avaliar a aderência da camada imprimada, utilizou-se como referência o valor médio obtido do arrancamento de revestimentos de argamassas à base de cimento e areia. Nesses materiais os valores de aderência aceitáveis são da ordem de 200kPa segundo a NBR 13528-3 (2019).

### 3.3.4 Ensaio de desgaste superficial

Os efeitos da liberação do tráfego antes da execução do revestimento, fase em que o trecho pode ser liberado para o tráfego sob a restrição de carga e velocidade dos veículos (DNIT, 2014), podem afetar a resistência superficial da imprimação. Para avaliar esse desgaste superficial, foi utilizada a metodologia de Almeida (2019) adaptada de Duque Neto (2004).

Para tanto, a metodologia utiliza o ensaio de WTAT (*Wet Track Abrasion Test*), simulando esse tráfego e a consequente perda por abrasão da superfície imprimada. Assim, as condições de carregamento, velocidades do equipamento e tipo de superfície de contato foram mantidas conforme o ensaio padronizado pela NBR 14746 (2014). Assim, considera-se que, se a base imprimada possuir uma boa interação com o ligante, proporcionando boa resistência ao desgaste, a coesão da base estará satisfeita e o desgaste será insignificante.

### **3.3.5 Ensaio de emissões de compostos voláteis**

A investigação na matriz asfáltica sobre espécies voláteis ou passíveis de arraste por um fluxo de gás podem dar informações importantes tanto sobre potenciais problemas ambientais quanto sobre a modificação da composição química do produto original a partir da perda das espécies mais voláteis. Um Dispositivo de Extração e Coleta (DEC) foi desenvolvido para esse fim. Resumidamente, o equipamento é composto por um sistema de aquecimento que envolve uma serpentina por onde circula um gás inerte (argônio) que depois de aquecido à temperatura desejada borbulha diretamente nas amostras de CAP fazendo com que as espécies volatilizáveis àquela temperatura se desprendam da amostra na forma de gás ou vapor. O sistema todo é estanque de modo que não há risco de combustão pela ausência de oxigênio e também não há perdas para o meio externo dos produtos volatilizados. Dessa forma, as temperaturas para o arraste gasoso podem variar na mais ampla faixa. Os produtos arrastados pelo argônio são coletados tanto em “traps” frios quanto em substratos sólidos na forma de colunas contendo adsorventes. Uma vez coletados os produtos voláteis as suas identificações e quantificações podem ser feitas por cromatografia sem a necessidade de etapas de *cleanup* das amostras. Isso é particularmente útil quando o CAP é a matriz de interesse devido à sua alta complexidade do ponto de vista químico. Este sistema já foi utilizado com êxito na análise de HPAs em amostras de CAP (CARGNIN, 2017).

O dispositivo permite a geração e a coleta de vapores a partir de amostras aquecidas em um fluxo de gás argônio (0,12 L/min-1) em sistema fechado em temperatura controlada. Os vapores foram gerados a uma temperatura de 60 °C, sendo coletados em acetonitrila (50 ml) como líquido absorvente. Após a absorção em acetonitrila, os extratos foram injetados no sistema cromatográfico para análise. As análises cromatográficas foram realizadas em um equipamento de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com detector ultravioleta (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). As separações foram realizadas em uma coluna Pursuit 3PAH (4,6 × 100 mm, 3 µm). A detecção foi realizada em 225 nm. As separações

cromatográficas foram realizadas com eluição por gradiente com fase móvel acetonitrila: água ultrapura (40:60 a 100:0) com volume de injeção de 20  $\mu$ L.

### 3.4 Apresentação e discussões dos resultados

Nessa subseção são apresentados os resultados e discussões sobre as prováveis explicações sobre o comportamento das amostras imprimadas e que tendências foram observadas a partir da avaliação feita.

#### 3.4.1 Solos e ligantes

Os resultados dos ensaios de granulometria, índices físicos, densidade e a classificação AASHTO dos solos são apresentados na Tabela 7. Os solos possuem granulometria fina, com 99% das partículas passantes na peneira de abertura nominal igual a 2,0 mm (Nº 10). Os solos apresentaram o índice de grupo (IG) de zero (0) para o solo arenoso e de três (3) para o solo argiloso.

Tabela 7 – Resultados da caracterização dos solos

Características	Resultados		Características	Resultados	
	Solo Arenoso	Solo Argiloso		Solo Arenoso	Solo Argiloso
Granulometria	2'' (%)	100	Densidade Real	2,667	2,589
	1'' (%)	100	IP (%)	NP	10
	3/8'' (%)	100	LL (%)	-	29
	Nº 4 (%)	99	CBR (%) / Expansão (%)	33/0	10/0
	Nº 10 (%)	99	MR médio (MPa)	382	NPC*
	Nº 40 (%)	96	MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	1,681	1,887
	Nº 200 (%)	32	AASHTO	A-2-4	A-6

Fonte: Próprio Autor (2021)

\* NPC (Não passou no condicionamento do ensaio de MR)

Quanto à capacidade de suporte, verificou-se que os solos apresentaram expansão nula, ficando dentro do limite estabelecido pelo SOP/CE (Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará), menor que 0,5%. Os CBRs encontrados para os solos arenoso e argiloso foram de (33%) e (10%), respectivamente, indicando que o solo arenoso pode ser utilizado, à luz de critérios de dimensionamento empírico, como sub-base e o argiloso necessita de uma estabilização antes de ser aplicado, conforme explicitado em Senço (2001). Ressalte-se também que deve se encorajar o uso dos resultados do MR para dimensionamento de pavimentos. Quanto a esse resultado, o solo argiloso não passou na fase de condicionamento. Contudo, como

o intuito no presente trabalho foi de testar o potencial dos ligantes frente à variação do tipo de solo, esse parâmetro não deve influenciar na avaliação da imprimação.

O ligante de referência foi cedido pela empresa e sua caracterização foi garantida pela empresa. Os nomes das empresas que cederam os outros materiais aqui testados foram resguardados por motivo de segurança de informação industrial.

### 3.4.2 Ensaio de penetração da imprimação betuminosa

A Figura 9a apresenta os resultados de penetração pelo método da Cápsula, onde se observa que os ligantes E1, G15, G17 e G18 apresentaram resultados não satisfatórios quanto à penetração em pelo menos um dos solos utilizados, ficando fora da faixa limite de penetração (4,0 e 13,0 mm) (DANTAS, 1959; VILLIBOR *et al.*, 1989; CASTRO, 2003; DUQUE NETO, 2004) admitida como aceitável e mostrada em linha pontilhada nessa figura. Observa-se também que o E1 e G18 apresentaram Coeficiente de Variação (CV) maior do que 20% indicando falta de homogeneidade nos resultados desses dois ligantes. Para efeito desse estudo no que trata a análise estatística realizada seguirá a classificação do coeficiente de variação (CV%) proposta por Pimentel-Gomes (1985) que define os seguintes intervalos:

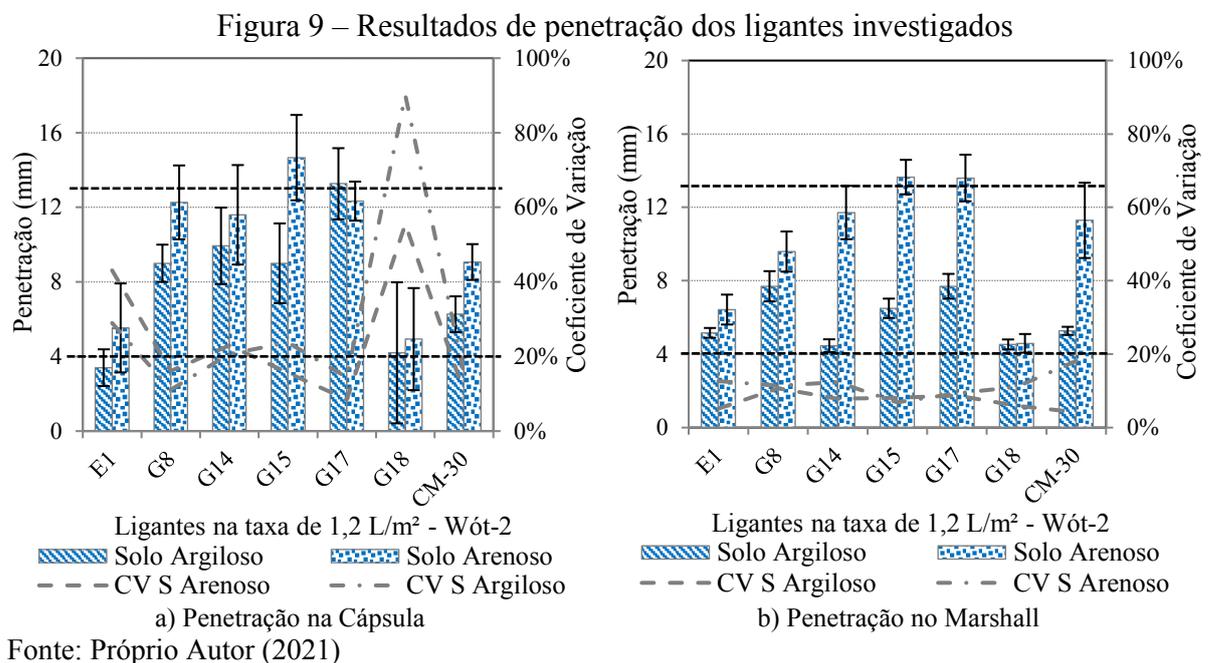
- $CV\% \leq 10\%$  classificado como baixo;
- $10\% < CV\% \leq 20\%$  classificado como médio;
- $20\% < CV\% \leq 30\%$  classificado como alto;
- $CV\% > 30\%$  classificado como muito alto.

O coeficiente de variação pode ser expresso pela Equação 1. Onde,  $\sigma$  é o erro experimental e  $\mu$  é a média geral.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

No entanto, como forma de ratificar os resultados nessa fase preliminar dos testes, não se descartou nenhum dos fluídos, prosseguindo-se para a etapa seguinte. Salienta-se que o ligante G18 necessitou de um aquecimento a 120 °C para sua aplicação. Já os demais foram aplicados a 60 °C, com exceção da E1 que, por ser uma emulsão, pode ser aplicada à temperatura ambiente (25 °C).

A Figura 9b (penetração no Marshall) mostra que os ligantes G15 e G17 apresentaram penetrações excessivas quando aplicados no solo arenoso. Já nos ligantes E1 e G18, a penetração ficou dentro da faixa limite (4,0 a 13,0 mm). Verificou-se ainda que o CV dos resultados obtidos nesse método apresentaram variações menores em relação ao método da Cápsula, ficando abaixo de 20%, para todos os ligantes testados e nos dois tipos de base utilizados (PIMENTEL-GOMES, 1985). Isso mostra que há uma dispersão maior nos resultados obtidos por meio do método da Cápsula quando comparados aos resultados obtidos no método Marshall.

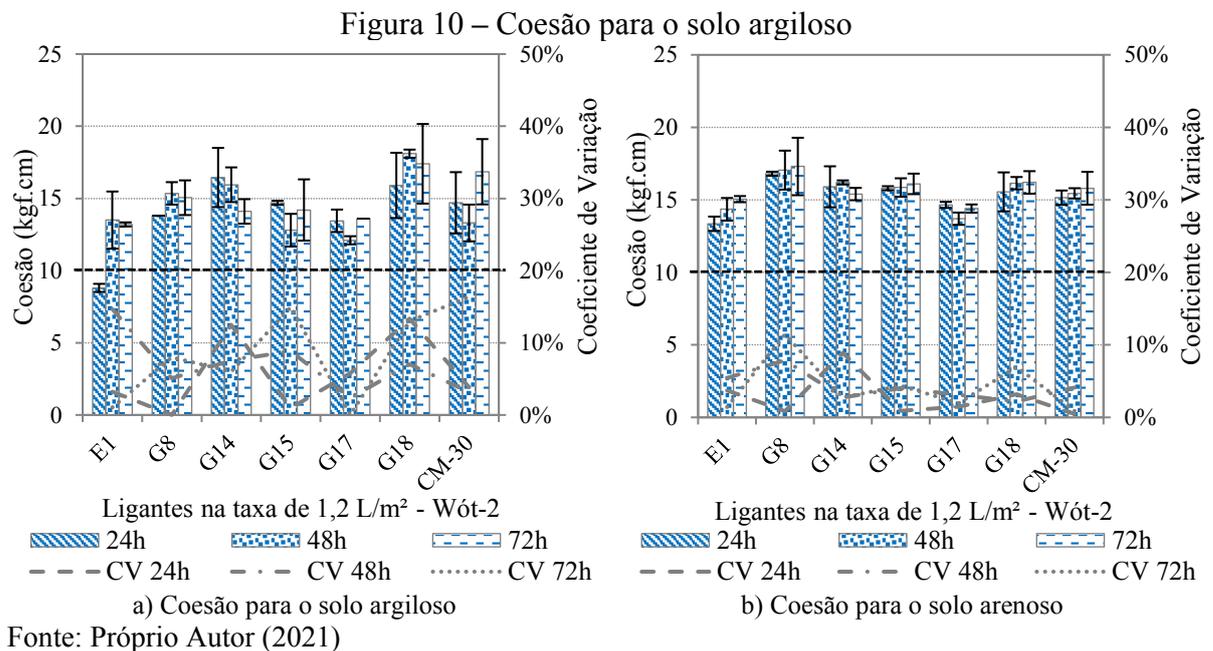


Pode-se enfatizar o resultado promissor apresentado pelos ligantes G8 e G14, com uniformidade nos resultados tanto no método preliminar (Cápsula) quanto no método Marshall, assemelhando-se ao resultado obtido com o ligante de referência (CM-30).

Em face dos resultados apresentados neste item, com bases compactadas em umidades abaixo da ótima, tendo em vista as altas taxas de evaporação oriundas de um clima mais quente como o do estado do Ceará, observa-se, de uma forma geral, que os ligantes obtiveram resultados de penetração adequados, de no mínimo 4,0 mm, em quase todas as taxas de ligantes testadas.

### 3.4.3 Coesão dos solos imprimados

Quanto à coesão, Almeida (2017) sugeriu, a partir de resultados de imprimação e coesão e da experiência laboratorial, adotar 10,0 kgf.cm para aceitação quanto à coesão de solos imprimados. Esse valor é a metade do mínimo preconizado pela norma ISSA (International Slurry Surfacing Association) TB-139 (20,0 kgf.cm) para microrrevestimento, tendo em vista que essa não é a camada final de rolamento e que o tráfego será apenas provisório e leve. Nas Figura 10a e Figura 10b, observou-se que os valores de coesão para todos os ligantes testados nos dois solos atenderam ao limite de 10 kgf.cm sugerido por Almeida (2017).



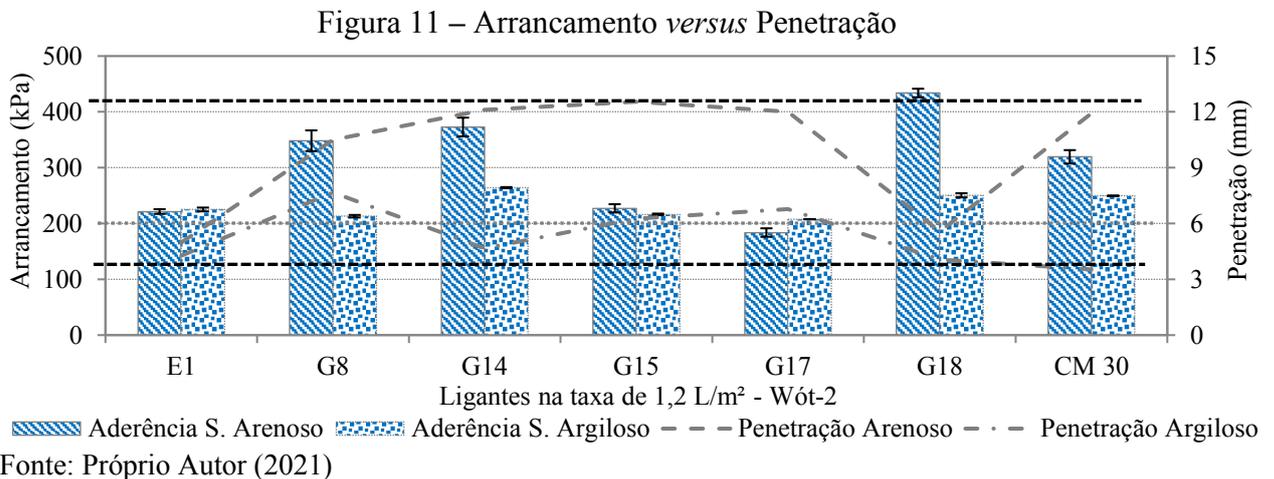
Nas Figuras 10a e 10b nota-se, também, que os CVs dos valores de coesão ao longo do tempo de cura foram bem reduzidos, ficando abaixo de 10% para o solo arenoso, indicando uniformidade maior para esse material, já que se pode considerar baixo um CV menor que 10% (PIMENTEL-GOMES, 1985). Ainda segundo o autor, o solo argiloso com CVs levemente maiores, mas todos abaixo de 20%, podem ser considerados de variação média. Acredita-se que em função da suscetibilidade à umidade em solos argilosos os resultados nesse tipo de base podem sofrer maiores variações. Percebeu-se que o tempo de cura influenciou na linearidade dos resultados, mostrando que variações de coesão se devem ao efeito de uma cura insuficiente e ainda mostrando o quanto esse parâmetro é importante e dependente do tipo de solo.

Observou-se ainda que o ligante E1 aplicado no solo argiloso só apresentou coesão aceitável após 48 horas de aplicação, indicando que para esta EAI o tempo de cura do ligante é um pouco maior do que para ADPs, e que só a aparência não garante que a cura do ligante foi completa. Outro fato constatado é de que alguns ligantes apresentaram uma leve redução da

coesão quando expostos a mais de 24 horas de cura, mas ratifica-se que mesmo assim os valores dessa redução não foram significativos a ponto de comprometer o resultado da coesão.

#### 3.4.4 Aderência dos solos imprimados

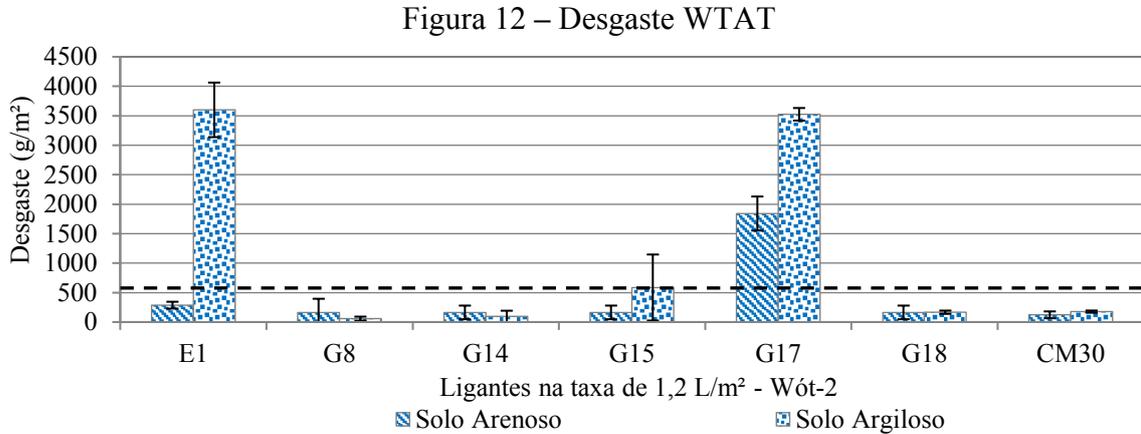
Quanto à aderência, a Figura 11 apresenta para o solo arenoso resultados superiores aos vistos no solo argiloso. De maneira geral, a porção penetrada pelo ligante no solo argiloso influenciou no resultado de aderência, sendo quanto menor a penetração menor a aderência, obtida por meio do ensaio de arrancamento. Pontualmente, os ligantes G15, G17 e E1 exibiram comportamento não esperado quanto à aderência no solo arenoso, pois proporcionaram baixos valores de arrancamento (cerca de 200kPa). Isso pode ser explicado pela elevada penetração dos ligantes G15 e G17 (cerca de 13,0 mm). Já para o ligante E1, a baixa penetração desse ligante na base em ambos os solos (cerca de 4,0 mm) pode ter causado menor arrancamento (cerca de 200kPa) devido ao acúmulo do ligante, mesmo sem apresentar exsudação. Na Figura 11 observa-se reduzida penetração do ligante G18, sobretudo no solo do tipo argiloso. Isso pode ter sido preponderante para o reduzido valor de arrancamento (250kPa) dessa base em relação ao resultado obtido com o mesmo ligante na base arenosa.



#### 3.4.5 Ensaios de desgaste WTAT (*Wet Track Abrasion Test*)

Segundo a Figura 12, observa-se que o desgaste obtido no ligante G17 chama a atenção por ter altos valores de desgaste, chegando a ser quase 7 vezes maior do que o aceitável pela norma ISSA TB-100/90 (534 g/m<sup>2</sup>). Já a E1 apresentou um alto desgaste, mas que se limitou a sua aplicação no solo argiloso, seguido pelo G15, quando aplicado nesse mesmo solo.

Os demais ligantes apresentaram um bom comportamento quanto ao desgaste (abaixo de 534 g/m<sup>2</sup>).



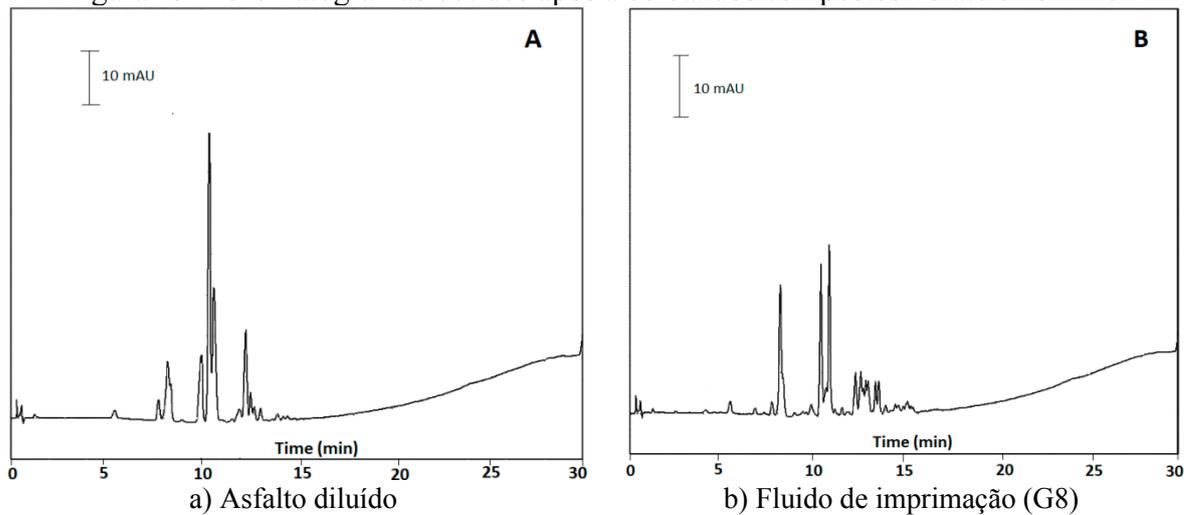
Fonte: Próprio Autor (2021)

### 3.4.6 Ensaios ambientais

Os ensaios de emissões realizados no fluido de imprimação G8 (que contém diluente alternativo do refino de petróleo, menos poluente) mostraram um nível de emissão mais baixo comparativamente ao asfalto diluído (ADP CM-30). Este fato pode ser observado no perfil cromatográfico obtido após a coleta dos compostos voláteis no DEC (Figura 13).

Os cromatogramas mostram perfis na separação cromatográfica dos compostos detectados em 225 nm em tempos de retenção entre 5 e 15 minutos. Nos sinais obtidos no tempo de retenção em torno de 10 minutos observa-se uma forte redução do sinal de absorção UV no fluido de imprimação (G8) em relação ao asfalto diluído (ADP CM-30). Este resultado mostra que o fluido de imprimação possui nível de emissão global de compostos voláteis bem inferior ao asfalto diluído, uma vez que as emissões foram geradas na mesma temperatura (60 °C).

Figura 13 – Cromatogramas obtidos após a coleta dos compostos voláteis no DEC



Fonte: Próprio Autor (2021)

### 3.5 Principais constatações do programa experimental

Nessa seção serão apresentadas as principais constatações do programa experimental desenvolvido e os detalhes de cada resultado obtido, bem como a indicação de produtos mais adequados para aplicação em serviços de imprimação betuminosa frente a avaliação técnica e ambiental realizada.

#### 3.5.1 Quanto aos resultados de penetração

Os ligantes E1, G15, G17 e G18 mostraram resultados não satisfatórios quanto à penetração em pelo menos um dos solos utilizados, ficando fora da faixa aceitável de penetração estabelecida na literatura (entre 4,0 e 13,0 mm). Os ligantes G15 e G17 apresentaram penetrações excessivas quando aplicados no solo arenoso. Já nos ligantes E1 e G18, se considerados os desvios, as penetrações também atenderam ao limite inferior dessa faixa. Os ligantes G8 e G14 apresentaram tendências promissoras tanto no método preliminar de seleção de ligantes (Cápsula) quanto no método Marshall, assemelhando-se ainda aos resultados obtidos pelo ligante de referência (CM-30) quanto à uniformidade dos resultados.

#### 3.5.2 Quanto aos resultados de coesão

Todos os ligantes testados nos dois solos apresentaram coesão satisfatória (superior a 10 kgf.cm). No entanto, indica-se atenção em relação à EAI, pois a mesma necessitou de um

tempo de cura superior a 24 horas, evidenciado pelo tempo (48 horas) que esse ligante levou para atingir a coesão mínima, mostrando que apenas a verificação visual para atestar a cura pode não ser um bom indicativo.

### ***3.5.3 Quanto aos resultados da aderência***

Foi possível verificar para o solo arenoso que os resultados foram maiores do que os vistos no solo argiloso, inferindo que nos solos argilosos, devido à baixa penetração registrada, a penetração tem grande impacto no resultado de aderência. Cabe destacar que os resultados apresentados se devem ao somatório de resistência ao cisalhamento que é intrínseco do solo e do acréscimo fornecido pela imprimação. Contudo, percebeu-se diferenças significativas (de mais de 100%) nos valores de aderência para um mesmo solo, inferindo assim que o acréscimo de resistência decorreu da contribuição atribuída pelo ligante. Com isso, os ligantes G15, G17, G18 e E1 apresentaram baixos valores de arrancamento devido às penetrações reduzidas. Isso pode ter influenciado para a redução da aderência da base imprimada.

### ***3.5.4 Quanto aos resultados de desgaste***

O ligante G17 chama a atenção por ter sido verificado em ambos os solos (arenoso e argiloso) valores elevados de desgaste, sendo quase 7 vezes maior que o aceitável pela norma ISSA TB-100/90. Já a emulsão E1 apresentou alto desgaste, mas apenas quando aplicado ao solo argiloso, seguido pelo G15, quando aplicado também nesse tipo de solo. Os demais ligantes apresentaram-se promissores quanto ao desgaste, obtido pelo ensaio de WTAT.

### ***3.5.5 Quanto aos resultados dos ensaios ambientais***

Os ensaios de emissões mostraram que o ligante G8 deve ser escolhido em detrimento do G14, uma vez que sua composição é mais sustentável e tem mais resíduo asfáltico. Isso torna o produto mais adequado quando se considera desempenho e ganhos na redução da poluição ambiental. Além disso, mesmo o G8 sendo um produto preparado com correntes do refino contendo CAP + diluente alternativo e com bom desempenho em serviço, apresentou reduções de emissões muito significativas em relação ao produto comercial de mesma natureza (ADP CM-30), sendo promissor para uso na pavimentação.

### 3.6 Considerações finais e recomendações

Elaborou-se o Quadro 1 que resume a hierarquização dos ligantes testados neste trabalho mostrando as limitações de cada um frente aos parâmetros avaliados. Em face dos resultados experimentais, pode-se concluir a partir do universo desta pesquisa, que o fluído G14 apresentou um comportamento semelhante ao CM-30 seguido do G18, que também se mostrou viável para aplicação inicialmente. Todavia, ressalva-se o uso G18 por conta do comportamento inadequado em bases argilosas e ainda por causa de sua aplicação estar condicionada ao aquecimento a 120 °C, o que pode inviabilizá-lo, tendo em vista o custo envolvido e o perigo inerente ao serviço. O fluído G8 mostrou um comportamento próximo do CM-30, porém requer atenção quando do uso em bases argilosas, haja vista a aderência perto do limite inferior para este tipo de base (200kPa). Os ligantes G15, G17 e E1 mostraram-se suscetíveis às variações do tipo de solo, apresentando um comportamento irregular quanto ao desgaste e à aderência, sendo indicadas prévias verificações quanto à melhor taxa de aplicação e para atestar a compatibilidade dos materiais nas diversas condições de umidade aos quais serão empregados.

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, recomenda-se que o ligante G8 seja testado na construção de trecho experimental, uma vez que o mesmo mostrou um comportamento promissor à luz dos testes realizados em laboratório, e assim validar se os parâmetros ora medidos em um ambiente controlado podem inferir o comportamento de campo, e se balizam a escolha dos produtos a serem aplicados em serviços de imprimação betuminosa de rodovias. Os demais ligantes (E1, G15, G17 e G18) não passaram pela avaliação ambiental, pois foram inviabilizados ainda nos parâmetros técnicos e o G14 não apresentou redução de emissões significativas, sendo equiparável ao G8 a luz dos parâmetros técnicos, porém mais poluente.

Quadro 1 – Resumo da avaliação tecnológica e ambiental dos ligantes testados

Parâmetros	Ligantes						
	E1	G8	G14	G15	G17	G18	CM-30
Penetração	☺	☑	☑	☑	☑	☺	☑
Coesão	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
WTAT	✗	☑	☑	☺	✗	☑	☑
Aderência	☺	☑	☑	☺	✗	☑	☑
Ambiental	—	☑	—	—	—	—	☺

Comportamento:

Bom ☑ Médio ☺ Ruim ✗ Não ensaiado —

Fonte: Próprio Autor (2021)

## **4 PROPOSIÇÃO DE NORMAS, ESPECIFICAÇÕES E MANUAL DE BOAS PRÁTICAS PARA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DOS PAVIMENTOS**

### **RESUMO**

O objetivo deste artigo foi elaborar um manual de boas práticas para serviços de imprimação betuminosa e um conjunto de normas de modo a possibilitar e facilitar a aplicação da imprimação betuminosa dos pavimentos por parte do meio técnico. Sua finalidade é definir os critérios que orientam a execução, aceitação e controle tecnológico dos materiais e serviços de imprimação betuminosa de rodovias em obras rodoviárias sob a jurisdição da Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará (SOP-CE).

**Palavras-chave:** Pavimentação, Imprimação, Sustentabilidade.

#### **4.1 Considerações iniciais**

Com o objetivo de definir os critérios que orientam a execução, aceitação e controle tecnológico dos materiais e serviços de imprimação betuminosa de rodovias em obras rodoviárias sob a jurisdição da Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará (SOP-CE) foi elaborado um manual de boas práticas para esse serviço, além de indicação de parâmetros de aceitação para atestar um comportamento satisfatório da base imprimada durante a sua execução. Esse manual pode ser acessado através do QR code da Figura 14 e está também apresentado no Apêndice A da presente tese. E ainda, adicionalmente ao manual são apresentadas proposições de normas que estabelecem as metodologias para seleção adequada de ligantes através do método da Capsula (ALMEIDA, 2013) e Marshall modificado (RABELO, 2006) ao que se refere à definição de taxa (Apêndice B), à coesão (Apêndice C), à aderência (Apêndice D) e ao desgaste abrasivo (Apêndice E), bem como ao afundamento em trilha de roda.

Localmente, observou-se que a especificação técnica SOP-ES-P 09/19 da SOP (Superintendência de Obras Públicas) não aborda a definição da taxa em laboratório da imprimação e não avalia o comportamento da base imprimada quanto aos desgastes que esse serviço pode ser submetido em campo, além de não mencionar a importância da determinação da coesão superficial e das condições de aderência entre essa e o revestimento. Nacionalmente, tem-se a especificação do DNIT 144/2014 - ES que trata da sistemática de aplicação do ligante

asfáltico sobre a camada de base concluída sem indicar procedimentos nem limites aceitáveis para os parâmetros citados (definição de taxa, coesão, aderência, desgaste abrasivo, bem como ao afundamento em trilha de roda). Isso indica a pouca preocupação dessa etapa na execução de um pavimento, podendo acarretar na adoção de improvisações em campo que resultem em redução da vida de serviço desses pavimentos.

Figura 14 – QR code do manual elaborado de boas práticas de imprimação betuminosa de rodovias.

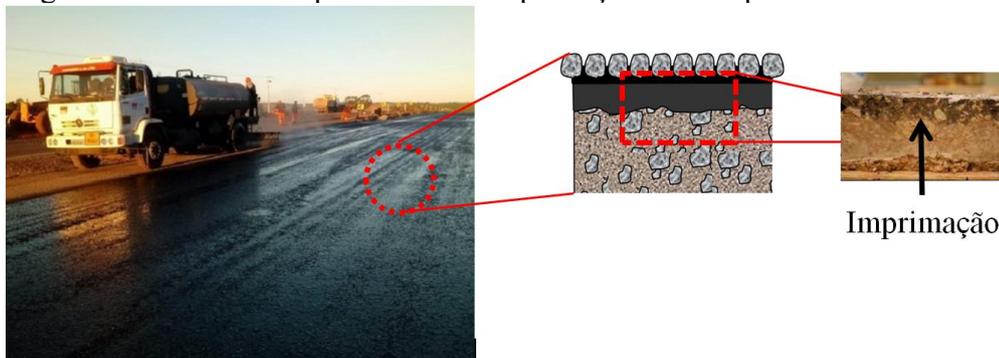


Fonte: Próprio Autor (2024)

#### 4.2 Fatores que influenciam a qualidade da imprimação

A imprimação betuminosa (*prime coat*, em inglês) consiste na aplicação de um material betuminoso sobre a superfície de uma base concluída, antes da execução de uma solução de revestimento qualquer, objetivando conferir coesão superficial, impermeabilização e permitir condições de aderência entre esta e o revestimento a ser executado (adaptado de DNIT 144/2014-ES). Observa-se na Figura 15 a interface, gerada pela imprimação, entre a base e o revestimento.

Figura 15 – Modelo esquemático da imprimação em um pavimento existente



Fonte: adaptado de Senadheera e Vignarajah (2007)

A imprimação pode ser utilizada para outras aplicações como, por exemplo, em reparos profundos que atinjam a camada de base (adaptado de DER/SP, 2006). Larsen (1992), Mantilla e Button (1994), Asphalt Institute (AI) (2001), Rabelo (2006), Villibor (2006), DNIT (2014), Almeida (2017), DER/PR (2017), DER/PR (2017) e AGETOP (2019), atribuem à imprimação outras funções, como:

- aumentar a coesão da superfície da base, pela penetração do material betuminoso empregado;
- impermeabilizar a camada de base;
- promover condições de aderência entre a base e o revestimento;
- endurecer a parte superior da base para aumentar sua resistência;
- proteger a camada de base contra as intempéries e dos efeitos do tráfego controlado, que é liberado antes da aplicação do revestimento.

É importante ressaltar que a mútua ligação criada pela imprimação contribui para a adesão interfacial, para maior eficiência no entrosamento do sistema constituído pelas duas camadas e para a melhoria da capacidade estrutural do pavimento (ISHAI E LIVNEH, 1984 E GODOI, 2011). Sendo assim, a imprimação contribui significativamente para a adesão interfacial entre a camada de base e a de revestimento asfáltico e essa boa adesão interfacial é determinante para garantir a integridade estrutural do pavimento, por conta que ajuda a evitar a separação prematura das camadas reduzindo a formação de trincas e fissuras.

Ao conceituar a imprimação betuminosa, a ASTM D8-02 (2003) observa que existe a necessidade do ligante de penetrar na base para que essa desempenhe bem as suas funções. Contudo, estudos mostram que existem faixas de penetração, conforme comentado nos capítulos anteriores, que são recomendadas, dependendo do material de base, para que a imprimação tenha um bom desempenho.

Para alguns autores (Dantas, 1959; Villibor, 1981; Villibor *et al.*, 1989; ASTM D8-02, 2003; Castro, 2003; Duque Neto, 2004; Rabelo, 2006) existem vários fatores que interferem na penetração da imprimação betuminosa: (a) tipo e taxa de ligante; (b) umidade de compactação; (c) massa específica aparente seca máxima; (d) tipo de solo; (e) umidade do solo no momento da imprimação e )f) irrigação prévia da superfície. Contudo, apesar dos vários fatores listados e que interferem na medida da penetração da imprimação betuminosa os principais estudos que demonstram essa influência, no Brasil, estão limitados aos solos tropicais, tais como pode ser consultado em Corrêa (1975); Nogami, Villibor e Fabbri (1989); Castro (2003) e Ramalho (2011).

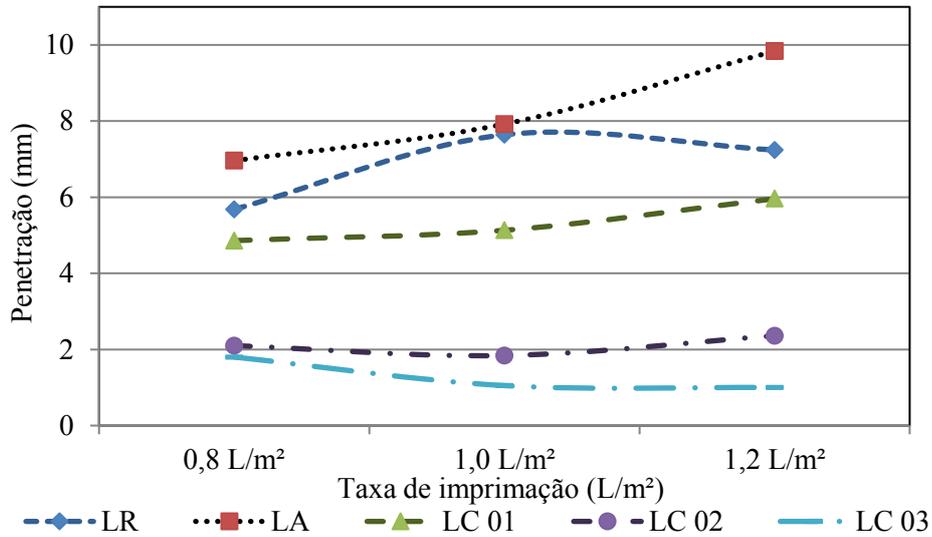
Entretanto, fontes literárias externas, em estudos mais abrangentes, corroboram com os autores citados sobre os fatores que interferem na penetração da imprimação betuminosa, Ishai e Livneh (1984) e Buttom e Mantilla (1994); Tashman *et al.* (2006) e Freeman *et al.* (2010). Assim, para o melhor entendimento dos seus efeitos sobre a penetração da imprimação esses fatores serão apresentados e discutidos separadamente.

#### **4.2.1 Tipo e taxa de ligante**

O efeito causado pelo tipo de ligante sobre a penetração da imprimação betuminosa foi investigado por diversos pesquisadores, entre eles: Nogami, Villibor e Fabbri (1989); Buttom e Mantilla (1994); Rabelo (2006) e Almeida (2017). Nos ensaios de imprimação realizados por esses pesquisadores foi possível verificar que as interações entre diferentes solos e a imprimação muitas vezes causam um comportamento diferenciado. Algumas observações podem ser aqui explicitadas, tais como: (i) base com materiais mais permeáveis preferem ligantes a base de solvente enquanto que em base mais fechada é mais adequado o uso de emulsões especiais para imprimação, o que anteriormente era suprido pelo CM-70 que foi descontinuado há vários anos por questões ambientais e (ii) ligantes com menor viscosidade, se aplicados no mesmo solo e na mesma taxa, têm maior poder de penetração que os de maior viscosidade. Almeida (2017) constatou ainda que o uso das emulsões asfálticas especiais para imprimação necessitam de uma atenção à parte, pois alguns fatores são mais prejudiciais para o seu uso adequado, foi observado que variações de taxa de aplicação e umidade da base no momento da imprimação interferem diretamente no comportamento do ligante na base fazendo com que seu tempo de cura mínimo seja superior àqueles encontrados quando do uso do ADP (CM-30).

Na Figura 16 é possível observar o efeito que a variação de taxa (0,8, 1,0 e 1,2 L/m<sup>2</sup>) e o tipo de ligante, quais sejam: CM-30 como ligante de referência (LR); mistura de CAP/D-limoneno como ligante alternativo (LA); emulsão especial para imprimação desenvolvido pela empresa 1 (LC-01); emulsão especial para imprimação desenvolvido pela empresa 2 (LC-02); emulsão especial para imprimação desenvolvido pela empresa 3 (LC-03) aplicados em um mesmo solo influenciam na penetração (ALMEIDA, 2017) pelo método Marshall modificado.

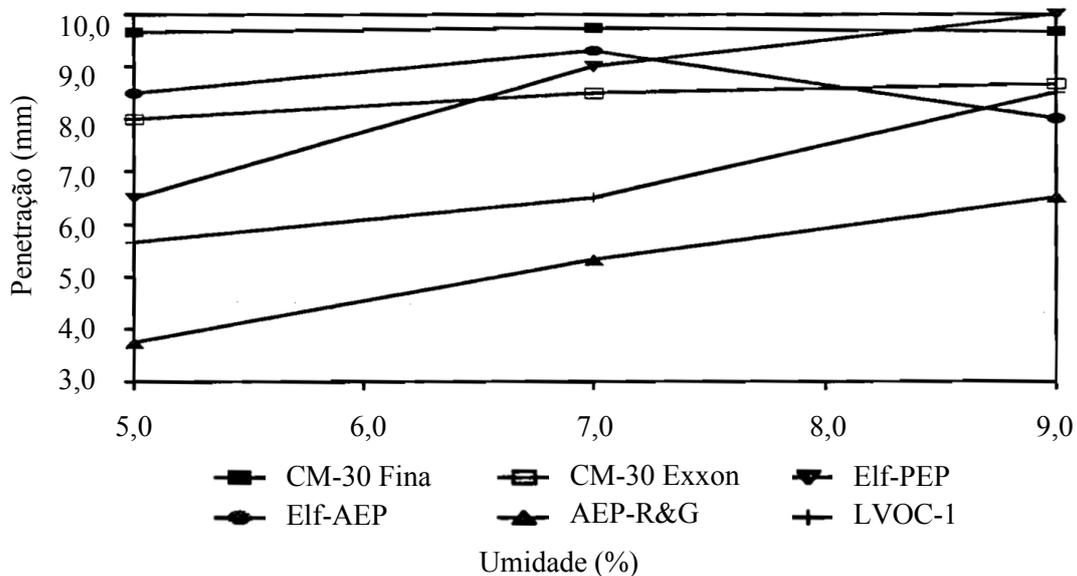
Figura 16 – Penetração da imprimação, pelo método da Marshall, em função da variação de taxa e do tipo de ligante betuminoso utilizado



Fonte: Almeida (2017)

Buttom e Mantilla (1994), quando realizaram ensaios de imprimação com um único tipo de solo, conduziram aos mais diversos valores de penetração ao se variar o tipo de ligante. Esses ensaios revelaram que os asfaltos diluídos têm maior poder de penetração que as emulsões testadas e que alguns dos ligantes ensaiados somente apresentaram penetração satisfatória para determinados intervalos de umidade (Figura 17). Esses autores associaram tal fato à quebra da tensão superficial entre as superfícies das partículas do solo, que só ocorreu a partir de certos teores de umidade.

Figura 17 - Penetração de diferentes ligantes a partir da variação da umidade

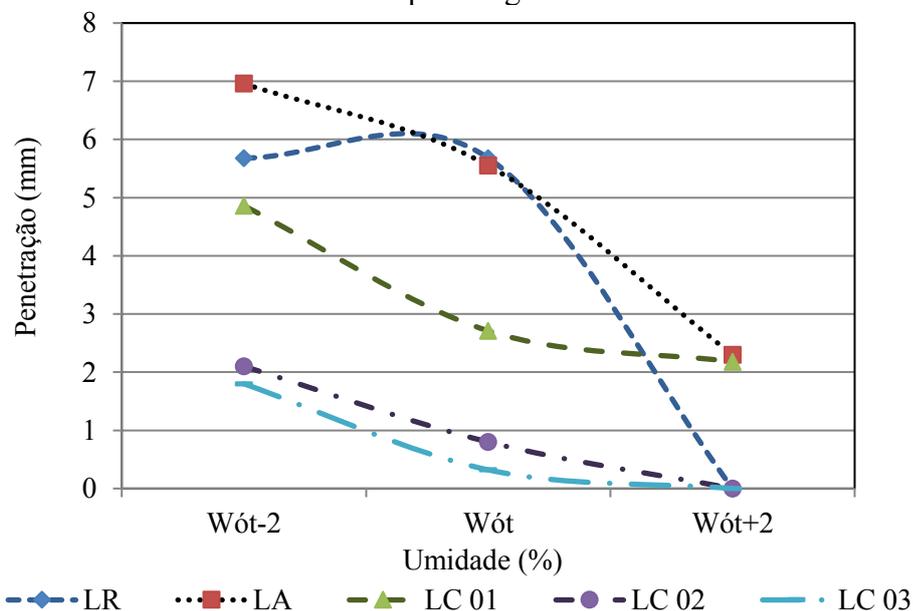


Fonte: Adaptado de Buttom e Mantilla (1994)

#### 4.2.2 Teor de umidade de compactação e seu efeito no solo no momento da imprimação

A umidade de compactação da base também é um fator que interfere na penetração da imprimação. O decréscimo das medidas das penetrações com o acréscimo do teor de umidade está associado à ocupação dos vazios do solo pela crescente quantidade de água presente no corpo de prova (Nogami *et al.*, 1989). Almeida (2017) ao testar 5 ligantes diferentes em uma base arenosa verificou que quando a base foi compactada na umidade ótima menos 2%, condição comum de ocorrer em campo em dias mais quentes, é possível perceber um aumento na penetração, conforme foi observado por Rabelo (2006) (Figura 18). No entanto, quando a base apresenta excesso de umidade, ocorre uma redução na capacidade de penetração do ligante durante o processo de imprimação. Isso prejudica a cura adequada do ligante, resultando no acúmulo de ligante não penetrado que forma um filme excessivo na superfície da base. Se esse excesso não for removido, pode levar ao surgimento de defeitos na superfície do revestimento, como escorregamentos e exsudação.

Figura 18 – Penetração da imprimação, pelo método da Marshall, em função do teor de umidade e do tipo de ligante utilizado



Fonte: Almeida (2017)

De acordo com Villibor *et al.* (1989), a penetração da imprimação betuminosa é bastante influenciada pela umidade da base no momento da imprimação. Tal constatação foi percebida por Rabelo (2006) e Almeida (2017). Segundo esses autores existe uma tendência da penetração da imprimação ser máxima quando a umidade do solo, no momento da imprimação,

situa-se em torno de 50 a 70% da umidade inicial de moldagem, independentemente da energia empregada na sua compactação.

Os autores citados no parágrafo anterior afirmaram ainda que se o solo é moldado acima da umidade ótima, apesar da secagem favorecer o aumento da penetração, esse tenderá a apresentar níveis reduzidos de penetração. Villibor (2006) argumenta que após compactada, a base deve secar livremente por um período variável de 48 a 60 horas, visando proporcionar um aumento considerável nas condições de recebimento da imprimação betuminosa, além de permitir examinar o padrão de trincamento da base que se desenvolve após a sua compactação.

Castro (2003), ao imprimir corpos de provas moldados com materiais saibrosos com o emprego da emulsão óleo de xisto e emulsão RM-1C, concluiu que ambos os ligantes apresentaram melhor penetração quando os corpos de provas foram imprimados 15 minutos após o término da sua compactação, em umidade abaixo da ótima, e quando os corpos de provas foram imprimados depois de 24 horas da compactação no teor ótimo de umidade.

#### ***4.2.3 Irrigação prévia da superfície***

Como exposto no capítulo 2, os efeitos da irrigação prévia da base são benéficos para a melhoria das condições desta antes de receber o ligante de imprimação favorecendo a penetração do ligante asfáltico em bases abertas. A recomendação é de que a irrigação prévia seja feita 12 horas antes do início da imprimação, devendo esta ser complementada pela raspagem da base com motoniveladora antes da execução da imprimação. Esse autor cita que essa raspagem, comumente chamada de “arrepisar a base”, tem como finalidade retirar as crostas de material fino existentes sobre a superfície a imprimir. Entretanto, o tempo de espera após a irrigação prévia pode ser reduzido para 15 minutos após sua aplicação, sem prejuízos ao serviço, o que impede ainda o retorno de pó a base já limpa.

Villibor *et al.* (1997), de forma mais precisa, ressaltam que, as bases executadas com solos lateríticos, sejam levemente irrigadas à taxa de 0,8 L/m<sup>2</sup> antes da sua imprimação, cuidando-se, porém, para que não haja a saturação da superfície da mesma. Esses autores, com base em ensaios de laboratório, concluíram que a irrigação prévia da base a uma taxa controlada (após a sua secagem), proporciona um aumento substancial da penetração da imprimação betuminosa.

Sabe-se ainda que outros fatores como o tempo de aplicação do ligante (ou tempo de cura), da preparação da superfície e das condições do tempo durante a aplicação do ligante podem influenciar na penetração da imprimação betuminosa.

### 4.3 Pequeno histórico de pesquisas sobre imprimação no estado do Ceará

As pesquisas com foco em imprimação iniciaram no Ceará com o trabalho de Rabelo (2006) que propôs uma metodologia de laboratório que reduziu a quantidade de materiais granulares e introduziu o uso de ligantes alternativos (CAP/LCC e Emulsão Asfáltica do tipo RM-1C) ao CM-30, avaliando a penetração desses ligantes na base.

Sabe-se que os solventes utilizados na produção dos ADPs são provenientes da destilação do petróleo e tem alto potencial contaminante, pela emissão de voláteis à atmosfera ou pela contaminação de solos e água por permeabilidade. Assim, a busca por materiais alternativos para emprego em serviços de imprimação é necessária e incentivada, quer seja pela substituição dos solventes orgânicos por biodegradáveis, quer seja pelo desenvolvimento de materiais emulsificados, tentar dispensar o uso de materiais ricos em compostos voláteis.

O uso de óleos vegetais e reciclados têm mostrado potencial nesse tipo de aplicação. Vários tipos de óleos de base vegetal vêm sendo investigados para diluição do cimento asfáltico de petróleo (CAP) por meio de pesquisas nacionais como as de Dantas Neto (2001), Castro (2003) e Ramalho (2011).

Seguindo essa tendência de uso de biodiluentes ao CAP, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC (Universidade Federal do Ceará) vem estudando, desde o ano de 2005, óleos de base vegetal para modificação de ligantes, bem como novos ensaios que possam ser aplicados para melhor avaliar o comportamento da imprimação. Os principais estudos desse grupo e os materiais testados estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Pesquisas desenvolvidas com uso de ligantes alternativos para imprimação

<b>Publicação</b>	<b>Material utilizado</b>
Rabelo (2006)	RM-1C e CAP/LCC
Vasconcelos (2009)	CAP/Biodiesel de soja
Silva (2010)	Emulsão de ECC
Silva <i>et al.</i> (2012)	CAP/Biodiesel de soja
Almeida et al (2014)	CAP/D-Limoneno
Almeida <i>et al.</i> (2015)	EAI comerciais
Gondim (2017)	CAP/ <i>Euphorbia Tirucalli</i>
Almeida <i>et al.</i> (2019)	EAI comerciais

Fonte: Próprio Autor (2024)

Vale lembrar que dentre os materiais testados, podem-se citar: mistura de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo)/LCC (Líquido da Castanha de Caju), mistura de

CAP/Biodiesel de soja, Emulsão de Cera de Carnaúba (ECC), mistura de CAP/ECC, mistura CAP/Emulsão de LCC e mistura de CAP/D-limoneno.

Essa busca por novas alternativas que visem à redução de poluentes nos serviços de imprimação betuminosa é uma tendência mundial. Onde, surgem como soluções as emulsões e ligantes alternativos que utilizam diluentes vegetais. Ações como essa favorecem a redução das taxas de emissão de agentes nocivos, além do fato de contribuir para uma menor dependência do petróleo, reduzindo assim o efeito estufa, problema muito discutido na atualidade

Essas pesquisas motivaram Almeida e Barroso (2015) a proporem o método da cápsula, uma metodologia expedita para a seleção de novos ligantes aplicáveis em serviços de imprimação. Esse método foi organizado também nesta tese em formato de norma (ver item 4.5.1) para contribuir com a área rodoviária. Além do foco na questão metodológica, outra contribuição foi a ambiental, com a proposta de utilização de ligantes alternativos ao CM-30 que apresentaram resultados de penetração satisfatórios ( $> 4,0$  mm). Assim, quando comparadas à metodologia de Rabelo (2006), as penetrações ficaram muito próximas, além de ter reduzido 25 vezes a quantidade de solo utilizado para a produção de 1 Corpo de Prova (CP).

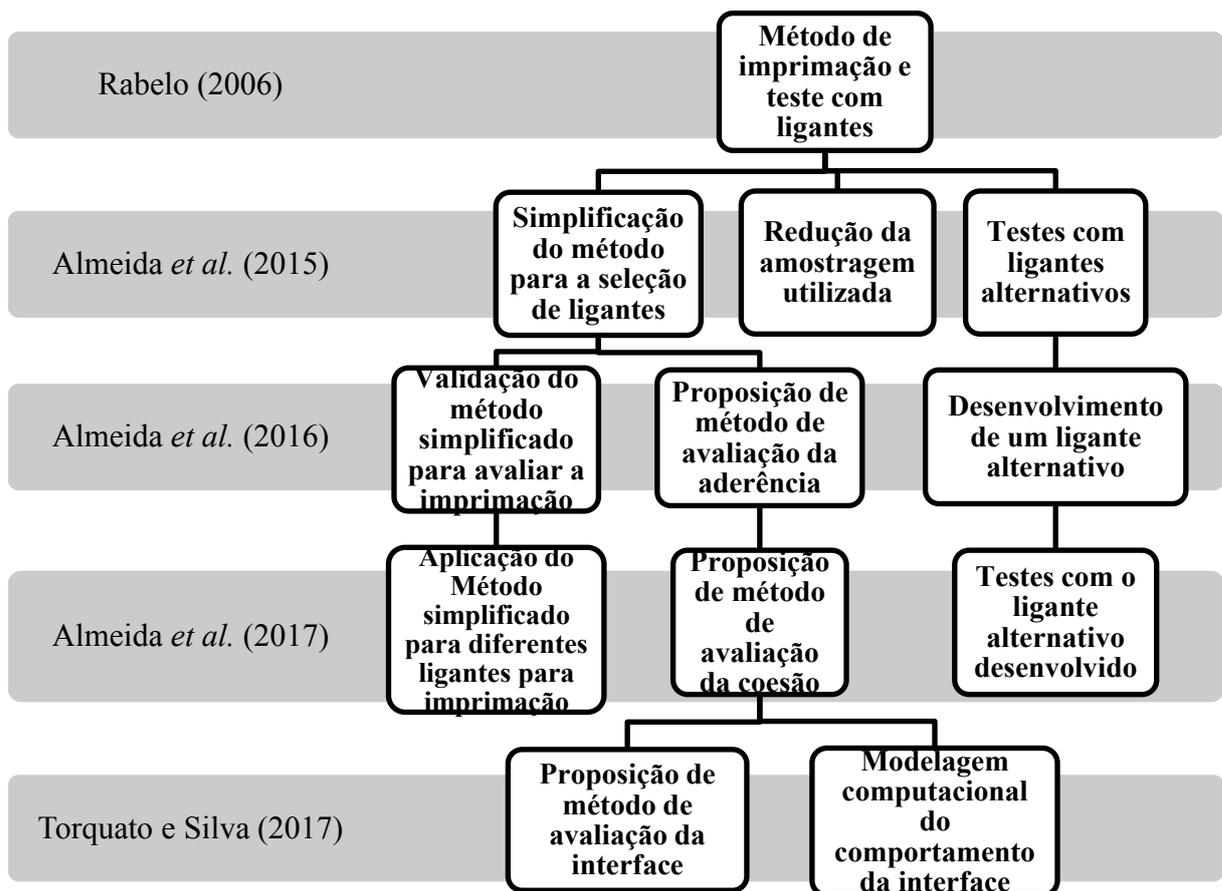
Almeida *et al.* (2016) apresentaram uma metodologia complementar à avaliação por penetração da imprimação betuminosa, a fim de investigar parâmetros inovadores para a comunidade científica. Esses autores propuseram um ensaio para avaliação da aderência da película betuminosa formada pela imprimação após sua cura, onde se verificou que mesmo quando a penetração do ligante na base não for satisfatória, ou seja, valores menores que 4,0 mm, pode existir aderência adequada entre as camadas. Isso mostrou indícios que somente a penetração do ligante não é parâmetro suficiente para atestar a qualidade da imprimação. Apesar da avaliação da penetração auxiliar na seleção de materiais para imprimação, ela não fornece parâmetros mecânicos que possibilite a modelagem. Observar que nesta tese verificou-se a necessidade de se dar uma contribuição técnica ao meio, sendo assim elaborou-se uma proposta de norma para avaliação da aderência que será descrita com maiores detalhes no item 4.5.3.

Almeida *et al.* (2017) por sua vez, investigaram a coesão da base imprimada com diferentes ligantes por meio de uma metodologia de laboratório, que também foi adaptada nesta tese como proposto de norma (ver item 4.5.2), que utiliza um coesímetro de lamas asfálticas e microrrevestimentos. Com essa metodologia foi possível verificar o momento de ruptura da película do ligante e relacionar os valores de coesão com a penetração (parâmetro de referência), bem como ranquear os ligantes e subsidiar a seleção deles para emprego em serviços de imprimação. Essa pesquisa mostrou também a importância de se avaliar outros parâmetros para

atestar a qualidade da imprimação. Dessa forma, a Figura 19 mostra um resumo dos avanços feitos por esse autor após a pesquisa de Rabelo.

Por fim, Torquato e Silva (2017) propôs uma metodologia que buscou extrair parâmetros mecânicos com a finalidade de modelar a interface base-revestimento computacionalmente. Esse autor concluiu que a imprimação possui uma importância significativa em caso em que o revestimento é mais esbelto o que acaba por exigir mais da imprimação. Entretanto, como a matriz experimental desenvolvida pelo autor não comportou mais configurações de ligante e materiais de base e revestimento, propôs mais estudos para confirmar as percepções obtidas na pesquisa.

Figura 19 – Resumo do histórico de pesquisas sobre os métodos propostos para avaliação da imprimação



Fonte: Próprio Autor (2021)

#### 4.4 Análise dos procedimentos atuais

Verifica-se que as normas vigentes, regionais e nacionais, não estabelecem um procedimento de definição de taxa ou mesmo algum protocolo para determinação do tempo de cura. Por exemplo, a DNIT 144/2014-ES indica que a variação da taxa de aplicação para o caso do asfalto diluído de petróleo (ADP) seja aplicada entre 0,9 a 1,5 L/m<sup>2</sup>, com tolerância de  $\pm 0,2$  L/m<sup>2</sup>. Já para o caso da emulsão asfáltica especial para imprimação (EAI), essa variação é de 0,9 a 1,7 L/m<sup>2</sup> com tolerância de  $\pm 0,2$  L/m<sup>2</sup>. Sabe-se que o intervalo de variação da taxa se deve ao tipo e textura da camada a ser imprimada.

Para tanto, a norma citada não estabelece como definir essa taxa, e as normas que definem o serviço de imprimação dos departamentos estaduais consultados, quais sejam: SOP-CE; DER/BA; AGETOP; DER/PR e DER/SP, seguem as indicações da norma do departamento rodoviário federal, outros departamentos ainda, não dispõem de instruções de serviço para fins de imprimação, e sequer levam em consideração as variáveis: umidade da base; tipo de material e taxa, para definição da taxa de imprimação.

Como foi observado nas pesquisas desenvolvidas, esse tema merece uma atenção especial dado que a imprimação precisa estar curada para que possa cumprir com seu propósito. Entretanto, sabe-se também que a qualidade do serviço de imprimação depende de vários outros fatores. Assim sendo, nota-se uma carência de procedimentos normatizados que indiquem os ensaios, os parâmetros, valores limites e boas práticas a serem adotadas nos serviços de imprimação.

Nesse sentido, em laboratório, existe um parâmetro avaliado para inferir a qualidade da imprimação quanto ao seu desempenho que é a espessura da penetração do ligante betuminoso na base, parâmetro esse que já foi estudado por Villibor *et al.* (1989). Esses autores concluíram que os pavimentos executados com bases de solos lateríticos e imprimados com Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) do tipo CM-30 (Cura Média), só funcionam adequadamente quando o ligante utilizado na imprimação alcança penetrações da ordem de 4 a 13 mm. Segundo esses pesquisadores, se a penetração da imprimação for reduzida, o ligante utilizado se deposita sobre a superfície imprimada, podendo ocasionar exsudação do revestimento. O autor desta tese estabelece o seguinte intervalo de 4 a 13 mm como parâmetro inicial satisfatório, mas indica ainda a realização de outros testes, como de coesão para atestar a cura da imprimação e de aderência para confirmar a adesão entre as camadas ligadas pela imprimação.

A penetração insuficiente, além de poder resultar no escorregamento entre o revestimento e a base, pode causar exsudação do ligante no revestimento, o que diminui a

aderência entre os pneus dos veículos e a pista de rolamento, podendo ocasionar também o desprendimento do revestimento devido ao cravamento do agregado da capa de rolamento nessa camada. Por outro lado, se a penetração do ligante for excessiva pode ocorrer o desprendimento do revestimento devido à falta de aderência entre este e a base, demonstrando assim que é necessário que exista uma quantidade de ligante na base suficiente para criar uma interface aderente e coesa que una a base ao revestimento.

Em muitos estudos, já citados anteriormente, há um consenso de que a penetração do ligante na base é uma condição essencial para que haja a melhoria na qualidade da base imprimada. Para tanto, conforme visto anteriormente, a penetração depende de algumas condições, como: tipo de solo, tipo de ligante, temperatura de aplicação do ligante, clima, umidade da base no momento da aplicação, condições da superfície da base, condições dos equipamentos. Sendo assim, há necessidade da definição de uma taxa de aplicação adequada imprescindível para evitar vários defeitos (Figura 20) como o desprendimento do revestimento pela falta de ligante ou a ocorrência de exsudação, causada pelo seu excesso.

Figura 20 – Defeitos ocorrentes em função de uma imprimação mal executada



Fonte: Bernucci *et al.* (2010) e Ramalho (2011)

Entretanto, como já observado anteriormente, entende-se que a penetração do ligante na base por si só não garante que esta terá um comportamento satisfatório, haja visto que a literatura citada no capítulo 2 (Nogami *et al.*, 1989; Castro, 2003; Duque Neto, 2004; Rabelo, 2006 e Almeida, 2017), que mesmo sendo estimado um intervalo para essa penetração (entre 4 e 13 mm) e apesar do uso de diferentes solos e ligantes asfálticos nos experimentos

realizados por esses diversos autores eles, percebe-se que há controvérsias quanto ao intervalo de penetração aceito para qualificação da imprimação.

Dessa forma, ratifica-se que o parâmetro “penetração” parece ser apenas um dos critérios a serem levados em consideração para qualificar um serviço de imprimação, devendo também, serem observados o tipo de solo, a taxa, o tipo de ligante e o teor residual de asfalto presente no mesmo. Diante das controvérsias levantadas sobre a medição da penetração da imprimação, acredita-se que para uma qualificação segura desse serviço, é imprescindível realizar uma investigação abrangente em laboratório e campo. Isso inclui, principalmente, a realização de ensaios de permeabilidade, coesão e cisalhamento na superfície imprimada.

Observa-se ainda que a adoção de procedimentos normativos alinhados com a técnica adequada, diante de inúmeras pesquisas já realizadas no País podem auxiliar para uma melhor análise da imprimação. Elencam-se como parâmetros principais: definição de taxa de imprimação; aferição da coesão superficial; aderência da superfície imprimada; desgaste causado pelo tráfego liberado antes da aplicação do revestimento. É entendido que esses parâmetros devem ser avaliados conjuntamente. Almeida (2017) em sua pesquisa observou que uma taxa de ligante adequada não é indicada somente se ela se enquadrar em uma faixa considerada como satisfatória (4 a 13 mm, por exemplo), mas seria àquela que atende aos outros critérios dos parâmetros já citados, como coesão, aderência e desgaste.

Vale lembrar que a concentração residual do material betuminoso na porção superior da base devidamente curada e entendida como responsável pela qualidade da imprimação, e que os limites máximos e mínimos da medida da penetração, variam conforme as características de cada solo estudado. Entretanto, sabe-se que essa concentração residual de asfalto não é levada em consideração pelas especificações vigentes para serviços de imprimação, em virtude da disponibilidade comercial de poucos materiais utilizáveis para imprimação.

Observa-se ainda que a imprimação não deve ser utilizada em pavimentos que apresentem danos estruturais (fadiga e deformação permanente) e com excesso de afundamentos, panelas e trincas interligadas no revestimento asfáltico. Também não pode ser empregada em pavimento com excesso de umidade nas camadas subjacentes.

#### **4.5 Importância da existência de normas e especificações técnicas**

Percebe-se em algumas especificações, procedimentos pouco detalhados geram incertezas que podem comprometer a eficiência dos serviços. No caso da imprimação betuminosa, por exemplo, foco deste trabalho, ao simular uma escolha de taxa inadequada (da ordem de 0,2 L/m<sup>2</sup> a mais do que o necessário, por exemplo), para 30 km de pista com 7 metros de largura, resultaria em um acréscimo desnecessário de 42 mil litros de fluído imprimante. Isso responderia por um acréscimo de, aproximadamente, 20% no custo do material utilizado no serviço. Além do aumento de custos, provavelmente a técnica resultaria em excesso do ligante e assim poderia causar problemas de escorregamento, exsudação e deformações no revestimento, muitas vezes comprometendo a segurança dos usuários.

Dessa forma, indica-se que as normas e especificações de serviço sejam seguidas criteriosamente, para garantir um serviço adequado e duradouro, otimizando os custos e reduzindo a possibilidade de deterioração precoce dos pavimentos. Assim, com normas bem definidas é possível ampliar os testes com outros fluídos imprimantes já que hoje em dia não se consegue estabelecer parâmetros mínimos aceitáveis por falta de protocolos experimentais indicados nas especificações.

#### **4.6 Proposições de normas**

A partir das constatações feitas na seção anterior e sabendo quais as atribuições são conferidas pela imprimação à base, constata-se que não existem normas que indiquem os parâmetros de definição de taxa, coesão, aderência e desgaste, para que a imprimação possa cumprir o objetivo de proporcionar um comportamento adequado da base frente às solicitações de tráfego levando em consideração, o tipo de base, umidade de compactação, taxa de ligante e tipo de ligante, como variáveis à serem investigadas.

Desse modo, na tentativa de suprir essa lacuna técnica uma série de proposições de normas para avaliar a imprimação betuminosa em laboratório foram propostas, com procedimentos bem definidos e parâmetros de aceitação mínimo indicados, conforme resume a Tabela 9.

Tabela 9 – Ensaio para avaliação da Imprimação em laboratório

Ensaio	Unidades	Limites	Proposta
Determinação de taxa de ligante para imprimação (Marshall) modificado	mm	4 e 13	XX-ME-P 01/24
Coesão (cura da imprimação)	kgf.cm	10	XX-ME-P 02/24
Aderência (arrancamento por torção)	kgf.cm	40	XX-ME-P 03/24
Teste de abrasão superficial da base imprimada (WTAT) modificado	g/m <sup>2</sup>	538	XX-ME-P 04/24
Teste de desgaste por afundamento da base imprimada (LWT) modificado	ciclos	1000	XX-ME-P 05/24

Fonte: Próprio Autor (2024)

#### 4.6.1 Determinação da taxa de imprimação

A primeira proposição de norma (ver apêndice B) estabelece um protocolo para definir a taxa de imprimação em laboratório levando em consideração as variáveis: tipo de base, unidade de compactação, taxa de ligante e tipo de ligante. Considera-se que a taxa ideal é o ponto de partida para uma base imprimada com incremento das propriedades de resistência causado pelo endurecimento da superfície da base associado à porção do solo penetrada pela imprimação. Pelo código QR (Figura 21) é possível acessar a proposição nomeada como XX-ME-P 01/24 e intitulada de determinação de taxa de imprimação pelo método Marshall.

Figura 21 – QR code relativo a proposição de norma XX-ME-P 01/24



Fonte: Próprio Autor (2024)

Nessa norma são abordadas práticas para realização do serviço de imprimação, tais como: adoção de limpeza da superfície da base, irrigação prévia, cuidados no controle de umidade da base antes do serviço de imprimação, temperatura de aplicação do ligante, tipo de material de base, faixa de penetração do ligante, etc.

Além da determinação da taxa ideal para aplicação da imprimação, seja com ADP, EAI ou outro ligante alternativo certificado que deve ser obtida experimentalmente em laboratório por meio da determinação de taxa (XX-ME-P 01/24), outros parâmetros são

indicados, como: coesão (cura do ligante), de aderência (interface entre a base e o revestimento), bem como desgastes (efeito do tráfego antes do recebimento do revestimento) também precisam ser avaliados.

#### ***4.6.2 Determinação da coesão da imprimação***

Um fator preponderante para que o serviço de imprimação funcione adequadamente é a cura do ligante. Em ADPs, a cura é determinada pela evaporação do solvente utilizado em sua mistura. Já nas EAIs a cura é o processo de rompimento da emulsão que vai comandar o início da cura do ligante. Para tanto, a coesão da imprimação é caracterizada pela resistência ao cisalhamento do solo, dada pela força de atração entre as superfícies de suas partículas, e que tem suas propriedades ampliadas quando penetrada pela imprimação. Dessa forma, verifica-se que imprimação funciona como um agente melhorador da coesão e protege a base da ação deletéria da água.

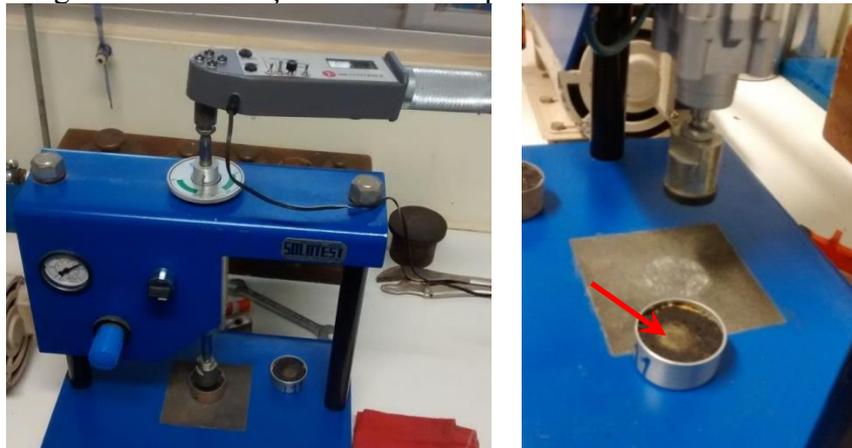
A proposição da norma aqui desenvolvida (ver apêndice C) tem a finalidade de medir a coesão superficial da base imprimada para atestar a cura da mesma, indicada pela realização do ensaio de cisalhamento por torção, conforme a especificação XX-ME-P 02/24 que pode ser acessada através do código QR da Figura 22. Nesse ensaio é utilizado o coesímetro (Figura 23), usualmente empregado para verificação da cura de lamas asfálticas.

Figura 22 – QR code relativo a proposição de norma XX-ME-P 02/24



Fonte: Próprio Autor (2024)

Figura 23 – Avaliação da coesão superficial com o coesímetro



(a) Torquímetro acoplado ao coesímetro  
Fonte: Almeida (2017)

(b) Base rompida

Indica-se que antes da realização desse ensaio seja determinada a taxa de imprimação segundo a norma proposta XX-ME-P 01/21, com o intuito de reduzir a margem das taxas possíveis. A especificação DNIT 144/2014-ES indica que a variação da taxa de aplicação para o caso do asfalto diluído de petróleo (ADP) deve ser compreendida entre 0,9 a 1,5 L/m<sup>2</sup>, com tolerância de  $\pm 0,2$  L/m<sup>2</sup>. Já para o caso da emulsão asfáltica especial para imprimação (EAI), essa variação é de 0,9 a 1,7 L/m<sup>2</sup> com tolerância de  $\pm 0,2$  L/m<sup>2</sup>.

Como resultado, o valor final da coesão deve ser àquele obtido a partir de três cápsulas testadas para uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante, a serem realizados no mesmo dia. É sugerido ainda o valor mínimo de 10,0 kgf.cm para aceitação quanto à coesão da imprimação, ou seja, tendo em vista que essa não é a camada final de rolamento e que o tráfego será apenas provisório e leve, esse valor indica que a base atingiu um nível de cura mínimo para se prosseguir com o serviço de pavimentação.

#### ***4.6.3 Determinação da aderência da imprimação***

A aderência da imprimação é caracterizada pela resistência da interface entre a camada subjacente imprimada e o revestimento ao cisalhamento, resultante da movimentação dos veículos. Dessa forma, verifica-se que a imprimação funciona como um agente potencializador da aderência além de proteger da ação deletéria da água.

O efeito da consideração da interface entre camadas sobre a resposta estrutural do pavimento vem sendo estudado por diversos autores (UZAN, 1978; MANTILLA E BUTTON, 1994; RABELO, 2006; ZIARIE E KHABIRI, 2007; HU E WALUBITA, 2011; GUIMARÃES,

2013). É consenso que a aderência exerce forte influência sobre a resposta estrutural do sistema. Embora não se saiba exatamente quão bem aderidas estão as camadas do pavimento, sabe-se que uma boa aderência é desejável para que os materiais da estrutura trabalhem de forma solidária na distribuição dos esforços. Uma baixa aderência entre as camadas pode comprometer a vida útil de um pavimento. Sendo assim, utiliza-se a imprimação betuminosa como forma de mitigar a movimentação lateral na interface do revestimento com as camadas granulares.

Como proposição para medir esse parâmetro em laboratório indica-se a realização de um ensaio de arrancamento por torção (Figura 24), segundo a proposição de norma XX-ME-P 03/24 (ver detalhes no apêndice D) ou pode ser acessada através do código QR da Figura 25.

Figura 24 – Ensaio de aderência por arrancamento da base imprimada



Figura 25 – QR code relativo a proposição de norma XX-ME-P 03/24



Fonte: Autor (2024)

O valor final da aderência deve ser àquele obtido a partir de seis discos arrancados em pelo menos 3 CPs avaliados para uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante, a serem realizados no mesmo dia.

Quanto aos resultados, é sugerido o valor mínimo de 200kPa para aceitação quanto à aderência da imprimação, ou seja, tendo em vista a falta de valores comparativos para avaliar

a aderência da camada imprimada de pavimentos asfálticos. Esse valor citado faz referência o valor médio obtido do arrancamento de revestimentos de argamassas à base de cimento e areia (NBR 1352, 2010). Nesses materiais os valores de aderência são da ordem de 200kPa (equivalendo ao torque de 34,0 kgf.cm). Embora o valor de referência adotado seja de um ensaio de tração, esse valor foi adotado por ser coerente com a magnitude de valores encontrados nos ensaios de arrancamento por torção desenvolvidos pelo autor dessa tese.

#### 4.6.4 Determinação do desgaste superficial da imprimação

Para verificação da durabilidade da camada imprimada, simulando o tráfego, quando liberado antes da aplicação do revestimento asfáltico, é necessário conhecer o comportamento da camada imprimada submetida a esse desgaste superficial. Os ensaios utilizados para essa análise foram baseados em metodologias adotadas em avaliações de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), como é o caso do ensaio WTAT (*Wet Track Abrasion Test*) (Figura 26a) que tem o objetivo de verificar a perda por abrasão da superfície imprimada causada pela peça de desgaste que simula a passagem dos veículos e o LWT (*Loaded Wheel Test*) (Figura 26b) que tem o objetivo de aferir, a partir do número de passadas de roda e de um carregamento padrão, o afundamento em trilha de roda (ATR) da camada de base. Contudo, foram necessárias algumas modificações para adequação à realidade encontrada na superfície imprimada, conforme as especificações das metodologias dos ensaios XX- ME-P 04/24 (ver todos os detalhes no apêndice E) e XX- ME-P 05/24 (ver todos os detalhes no apêndice F) que podem ser acessadas através dos códigos QR das Figura 27a e Figura 27b, respectivamente.

Figura 26 – Equipamentos para avaliação do desgaste superficial



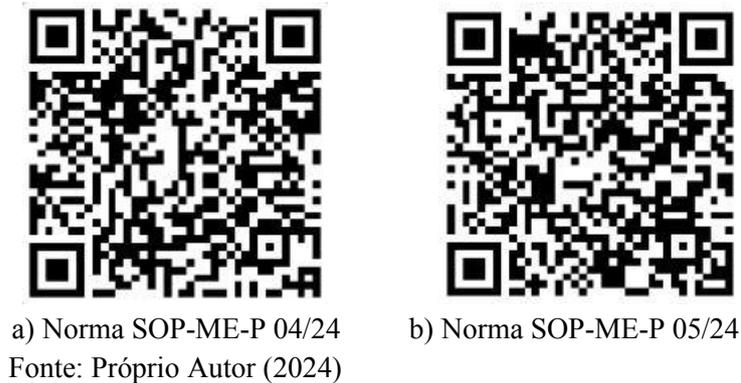
(a) WTAT

Fonte: Almeida (2019)



(b) LWT

Figura 27 – QRs codes relativos as proposições de normas SOP-ME-P 04/24 e SOP-ME-P 05/24



O valor final da abrasão WTAT deve ser àquele obtido a partir da média dos resultados de pelo menos 3 CPs avaliados para uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante, a serem realizados no mesmo dia. Para os resultados da abrasão é sugerido o valor máximo de desgaste segundo a norma ISSA TB-100/90, que estabelece, para o microrrevestimento, o limite máximo de perda por abrasão da amostra de 538,0 g/m<sup>2</sup>.

Para o LWT o valor final do afundamento deve ser àquele obtido a partir da diferença entre os resultados das medidas realizadas antes e depois do ensaio em todos os moldes ensaiados. O resultado final do ATR é a média dos resultados dos CPs avaliados (pelo menos 3 CPs) em um mesmo dia, em uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante. Quanto aos resultados, são indicadas notas que vão de 0 a 3 e levam em consideração: (a) afundamento; (b) exsudação; (c) afundamentos e arrancamentos e (d) destruição total da peça. Para avaliar a qualidade desse ensaio, são atribuídos os conceitos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Atribuições de conceitos para a amostra no ensaio LWT – base imprimada.

Notas	Conceitos	Observações visuais	ATR (mm)
3	Conforme	Sem defeitos, pouco desgaste, ausência de exsudação	< 2,0
2	Conforme com necessidade de correções	Poucos defeitos, arrancamento de até 40% da penetração, pequena exsudação, aparecimento de lombadas sem arrancamento de placas	2,0 a 4,0
1	Não conforme com necessidade de correções	Arrancamento acima de 40% da penetração, arrancamento nas partidas, exsudação, aparecimento de lombadas com arrancamento de placas	4,0 a 6,0
0	Não conforme	Destruição total pela penetração	> 6,0

Fonte: Adaptado de Duque Neto, 2004

#### **4.7 Considerações Finais**

Neste capítulo foram apresentadas as proposições de normas de ensaios para verificação da qualidade da imprimação em laboratório, bem como uma norma de melhores práticas, para dar uma contribuição técnica para os serviços de imprimação na área rodoviária. Recomenda-se que além da penetração, deve-se considerar importante que a coesão, adesão e desgaste da superfície também sejam avaliados na seleção de materiais. Outra motivação também imprescindível para o avanço do conhecimento é a avaliação de ligantes comerciais e alternativos para melhor eficiência dos serviços de imprimação que só poderão ser ranqueados, caso exista metodologias de análises como aquelas aqui propostas.

Definir os critérios que orientam a execução, aceitação e controle tecnológico dos materiais e serviços de imprimação betuminosa de rodovias em obras rodoviária é uma tarefa difícil, mas a busca por técnicas adequadas para avaliar a imprimação motivou esta pesquisa e os avanços até então atingidos reduzem cada vez mais a distância provocada por essa lacuna do conhecimento. No próximo capítulo serão apresentadas considerações sobre a interface entre as camadas de pavimentos como forma de refinar o entendimento do comportamento dessa interface, pois essa é uma outra lacuna que precisa ser melhor investigada.

## 5 AVALIAÇÃO MECÂNICA DA INTERFACE BASE-REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS PROMOVIDA PELA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA

### RESUMO

Sabe-se que além de sua importância funcional, a imprimação também é responsável pela aderência entre camadas, sendo um componente da interface entre a base e o revestimento. A ligação entre essas camadas é comumente considerada como: (i) perfeitamente aderida ou (ii) totalmente descolada, ainda que essas duas abordagens não sejam coerentes com o real comportamento mecânico da interface. No entanto, observa-se uma condição de ligação intermediária em campo. Para melhor entender esse fenômeno e estimar valores de rigidez (módulo de reação transversal) e resistência (cisalhamento máximo) para a imprimação, são propostas análises mecânicas da interface base-revestimento através da realização de ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova com amostras de concreto asfáltico/base granular e tratamento superficial/base granular. Os resultados evidenciaram uma influência positiva da imprimação na resposta estrutural do pavimento asfáltico. No entanto, essa influência é mais perceptível em pavimentos com revestimentos mais espessos. Acredita-se que isso se deva ao fato de que, em revestimentos mais delgados, torna-se mais complexo determinar com precisão a contribuição específica da imprimação para a resistência estrutural do pavimento.

Palavras-chave: Interface, aderência, cisalhamento direto, módulo de reação

### 5.1 Considerações iniciais

Investigações quanto à influência da imprimação e a importância dessa sobre a distribuição de tensões e deformações no pavimento ainda são escassas. Embora existam alguns estudos com viés mecanicista sobre a interface entre camadas asfálticas (Mantilla e Button, 1994; Canastrari *et al.*, 2005; Ziarie Khabiri, 2007; Moraes, 2011; Hu e Walubita, 2011; Guimarães, 2013), poucos se destinam a estudar a interface base-revestimento.

Em função da necessidade de ampliar esses estudos, foram pesquisados ensaios de caracterização de interface em geral, seja pintura de ligação (entre camadas com baixa porosidade, como base cimentícias-revestimentos asfálticos) e imprimação (solos granulares-revestimentos asfálticos) e por fim, caso necessário, adaptar tais métodos, buscando explicar melhor o comportamento da interface.

Isso se dá pelo fato de que o pavimento asfáltico é composto por um sistema de multicamadas onde o desempenho estrutural do pavimento depende diretamente da ligação entre as suas camadas, sendo necessária que essa suporte a ação direta do cisalhamento e tensões oriundas do tráfego sob condições ambientais diversas, promovendo resistência à rupturas na interface (BAE *et al.*, 2010). Observa-se que a qualidade da aderência entre as camadas de um pavimento contribui para a ligação mútua entre as camadas aumentando sua integridade estrutural, criando uma conexão capaz de proporcionar a mesma condição de deformação nas camadas dos pavimentos de uma estrutura monolítica. Essa integração é importante para garantir que as camadas do pavimento deformem de maneira uniforme e permaneçam unidas quando sujeitas a forças externas (WANG *et al.*, 2017).

Sabe-se que, durante sua vida útil de serviço, o pavimento asfáltico é solicitado sob condições de tensão de cisalhamento e tensões repetidas causadas pela ação do tráfego, o que pode resultar em danos por fadiga dos materiais das camadas intermediárias pelo efeito cumulativo provocado pelas cargas de menor magnitude imprimidas pelo tráfego (LI *et al.*, 2014; XU *et al.*, 2012). Na maioria das vezes isso faz com que a falha de desempenho da ligação entre camadas, resulte na redução da vida útil da estrutura do pavimento, onde a ruptura por cisalhamento pode ocorrer por conta da falha do material da camada de aderência ou da condição da interface. Se a falha ocorrer na pintura de ligação, pode indicar um problema com a aderência do pavimento, enquanto uma falha na interface sugere que não há atrito adequado entre as camadas. Os autores também afirmam que o modelo Mohr-Coulomb representa como a adesão e o atrito contribuem para a resistência ao cisalhamento da interface, com base em testes realizados em uma variedade de níveis de tensões normais ou confinantes.

Alguns autores propõem que a distribuição de tensões de tração ao longo das camadas do pavimento, com diferentes condições de interface entre as três camadas, considerem 1 (um) para aderência total e 0 (zero) para total escorregamento (ZIARI E KHABIRI, 2007). Nos casos da falta de aderência entre as duas camadas asfálticas (fator 0), as tensões horizontais de tração aumentaram significativamente e surgiram como máximas na fibra inferior da camada de rolamento.

Hu e Walubita (2011) modelaram o contato real entre pneu-pavimento, considerando os efeitos da aceleração e desaceleração, simulando estruturas com: (i) as camadas totalmente ligadas e (ii) as camadas totalmente separadas (sob efeito do atrito). Esses autores utilizaram elementos finitos tridimensionais e carregamento transiente, concluindo que a condição de ligação interfacial entre as camadas dificilmente influencia as respostas mecânicas na superfície do pavimento quando não existe aceleração e desaceleração. Os

pesquisadores verificaram ainda que a consideração das camadas totalmente separadas influencia consideravelmente as deformações máximas de tração e de cisalhamento na parte inferior da camada de revestimento e de ligação. Essas deformações foram ainda mais agravadas pelo efeito da desaceleração. Em termos de comparação de desempenho, os resultados indicaram que a condição de ligação interfacial das camadas tem uma influência mais significativa na vida de fadiga do que nas características de serventia dos pavimentos.

Guimarães (2013), ao estudar a variabilidade na aderência entre camadas asfálticas, sendo a camada superior um CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) e a inferior, ora uma SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), ora um CBUQ, avaliou a taxa de aplicação da pintura de ligação, o tipo de emulsão e a presença ou não de sistemas antireflexão de trincas na interface. Essa autora verificou que as amostras com geogrelha não apresentaram diferenças significativas comparadas ao uso de interface somente com pintura de ligação, enquanto as amostras com geotêxtil na interface resultaram em valores bem inferiores de tensão de cisalhamento máximo. A aderência foi avaliada por meio do ensaio de cisalhamento direto *Leutner*, em amostras produzidas em laboratório e também extraídas de pista. Para ensaios com diferentes tipos de pintura de ligação, as amostras com emulsão modificada nem sempre apresentaram melhores resultados quanto à aderência em relação às amostras com emulsão convencional.

Por sua vez, Torquato e Silva (2017) propôs uma modelagem acerca do comportamento da imprimação sob o aspecto estrutural, contudo verificou-se que no universo da pesquisa realizada pelo autor que mais testes seriam necessários para validar a modelagem proposta, pois segundo esse autor, uma interface composta por outros materiais pode vir a influenciar significativamente na resposta estrutural do pavimento. Além disso, não foram considerados na análise carregamentos horizontais, condição na qual a interface possivelmente exerceria maior influência, uma vez que ela, como esse carregamento, trabalha na direção horizontal.

Contudo, esse trabalho tem por objetivo principal ampliar o entendimento sobre o comportamento de interface entre o revestimento asfáltico-base granular do pavimento asfáltico avaliando seu desempenho à luz do parâmetro de aderência em diferentes materiais de base, ligantes e tipo de revestimento.

## 5.2 Modelagem da interface

A partir do novo método de dimensionamento de pavimentos (MeDiNa) o conhecimento sobre a condição de ligação da interface das camadas tem se mostrado essencial e de difícil compreensão, pois nesse método a consideração é de que as camadas são completamente aderidas, ou seja, não há deslizamento entre elas, ou que são completamente descoladas (Fritzen, 2016), ao passo que, o que se sabe sobre o comportamento da interface entre base e revestimento é que a condição real se encontra entre esses dois extremos (HU & WALABITA, 2011). Tendo em vista a importância da determinação de um modelo representativo de aderência, alguns pesquisadores como, Raposeiras *et al.*, (2013), Das *et al.*, (2017) e Destrée e Visscher (2017) concentraram seus estudos na capacidade da interface de resistir às tensões de cisalhamento induzidas pelo tráfego sob efeito do clima e que são transmitidas para a camada inferior da estrutura.

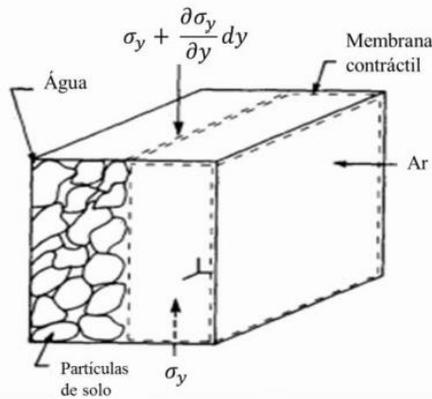
Outra questão bem discutida é de como avaliar a condição de aderência entre as camadas considerando de maneira mecanicista os diversos componentes do pavimento, por exemplo: os carregamentos, as camadas e a interface entre elas. Torquato e Silva *et al.* (2015) cita que as deformações no revestimento e o efeito das condições de aderência entre esta camada e a subjacente preponderam sobre o efeito das condições de aderência entre as demais camadas, mostrando que essas condições influenciam fortemente nas deformações de tração do revestimento asfáltico e, conseqüentemente, na formação de trincas por fadiga do material.

Uma delas baseia-se na teoria da camada elástica, Burmister (1945) que propôs a existência de duas condições para a interface, uma que possui ligação perfeita entre elas em virtude do atrito das mesmas e outra que não considera a condição da aderência, essa última por sua vez se torna muito difícil de ocorrer, pois o atrito entre as camadas ainda pode existir. O que reforça a premissa de que a aderência entre as camadas mais próxima da condição real se encontra entre os extremos propostos.

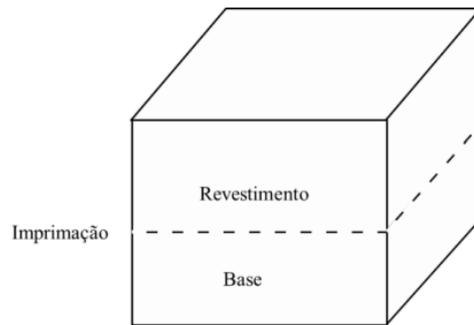
Uma consideração fundamental e mais próxima do que ocorre na realidade sobre o comportamento do pavimento asfáltico é a de que a imprimação seja considerada como um material, possuidor de propriedades mecânicas, função estrutural e sujeito a um estado de tensões. Analogamente à Fredlund e Mostergen (1977) que consideraram a interface ar-água, denominada membrana contráctil (Figura 28), na estrutura de solos não saturados, o autor desta tese entende que há de se considerar a imprimação também como uma membrana da interface base-revestimento. Dessa forma, a imprimação será tratada como uma membrana e assim poder

se diferenciar dos diversos componentes da interface base-revestimento, quais sejam, ligante de imprimação e agregados de ambas as camadas.

Figura 28 – Analogia do modelo de Fredlund e Mostergen



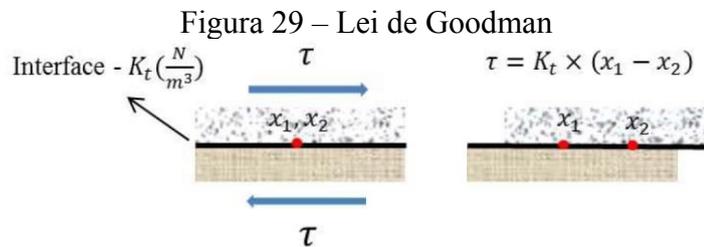
a) Modelo de Fredlund e Mostergen  
Fonte: Fredlund e Mostergen (1977)



b) Analogia à membrana de imprimação

Por sua vez, o modelo de Goodman (1968), desenvolvido para o estudo de Mecânica das Rochas, define o módulo de reação horizontal como uma constante que relaciona a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) na interface e o deslocamento relativo ( $\Delta U$ ) entre as duas faces adjacentes (Equação 2). A Figura 29 ilustra o significado físico do modelo de Goodman. Os pontos de coordenadas  $x_1$  e  $x_2$ , antes coincidentes, após a aplicação de uma tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) afastam-se a uma certa distância ( $\Delta U$ ), inversamente proporcional ao módulo de reação transversal ( $K_t$ ).

$$\tau = K_t \times \Delta U \tag{2}$$



Fonte: Goodman (1968)

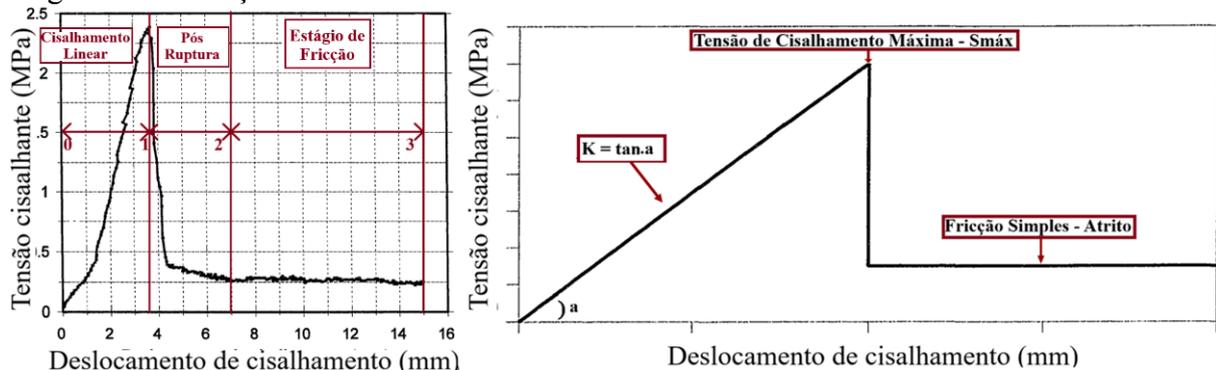
Vale ressaltar que o módulo de reação cisalhante pode ser determinado por meio de ensaios de cisalhamento direto na interface, sendo seu resultado igual a inclinação da curva tensão cisalhante  $\times$  deslocamento. Romanoschi (1999), estudou a interface dos pavimentos e ao

analisar os resultados da interface entre camadas asfálticas avaliando a curva de tensão cisalhante  $\times$  deslocamento, a dividiu em três seguimentos composto pelos pontos 0, 1, 2 e 3, quais sejam:

- i. Cisalhamento Linear (0-1): fase caracterizada pelo comportamento linear da relação tensão  $\times$  deslocamento de cisalhamento. Onde, observa-se que a ruptura ocorre quando a resistência ao cisalhamento da interface máxima é atingida.
- ii. Pós - Ruptura (1-2): caracterizada pela condição de ruptura da interface, entretanto sem que as camadas adjacentes sejam completamente separadas, pois observa-se a presença de resistência ao cisalhamento residual.
- iii. Estado de Fricção (2-3): aqui, as camadas se encontram completamente separadas e o deslocamento cisalhante é definido pelo atrito entre elas, que diminui consideravelmente.

Esse autor cita ainda que devido à natureza cíclica do carregamento na interface da estrutura do pavimento, apenas a fase elástica e a fase de atrito são úteis para descrever a condição da interface. O momento pós-falha indica por sua vez que a interface se rompeu sob a carga de cisalhamento. Portanto, nenhum parâmetro foi calculado para caracterizar o painel pós-falha. Apenas, após detectada a falha, entende-se que as camadas estão completamente separadas, como exemplificado na Figura 30.

Figura 30 – Relação entre a tensão de cisalhamento e o deslocamento relativo entre camadas



Fonte: Adaptado de Guerra, 2023

É possível verificar que a tensão de cisalhamento não cai abruptamente quando seu valor máximo é atingido, pois na fase pós-ruptura ainda há uma tensão residual que é mantida pela resistência entre as camadas promovida pelo atrito residual entre elas. Por esse motivo,

compreende-se que há nesse sistema com um grau de ligação entre as camadas que perdura até sua ruptura, essa variação é entendida como sendo o módulo de reação cisalhante da interface ( $K_t$ ) que varia até à ruptura total da aderência da interface, assumindo qualquer valor entre zero e o infinito positivo.

Segundo Uzan *et al.* (1978), em estudos sobre a interface entre camadas asfálticas, os valores de  $K_t$  variam entre  $10^2$  e  $10^5$  MN/m<sup>3</sup>. Para o limite inferior do intervalo, a interface não propiciaria mais resistência ao deslizamento, podendo as camadas acima e abaixo da interface serem consideradas, para fins práticos, como totalmente descoladas. O limite superior, por sua vez, diz respeito a camadas perfeitamente coladas, pois a elevada resistência ao deslizamento faz com que os deslocamentos relativos entre camadas tendam a zero para os níveis de tensão aos quais a interface está submetida nas estruturas de pavimentos.

Kruncheva *et al.* (2005), avaliaram a influência das condições de aderência entre revestimento asfáltico e camada de binder sobre o desempenho quanto à fadiga e deformação permanente de pavimentos asfálticos. Aplicando carregamentos verticais e horizontais (frenagem e aceleração), chegaram à conclusão de que com  $10^3$  MN/m<sup>3</sup> a redução na vida útil em relação às condições de aderência perfeita ( $10^5$  MN/m<sup>3</sup>) é da ordem de 20 a 35 %. Para valores de  $K_t$  abaixo de  $100$  MN/m<sup>3</sup> a diminuição da vida útil do pavimento manteve-se constante, confirmando o limite sugerido por Uzan *et al.* (1978), que fica entre  $10^2$  e  $10^5$  MN/m<sup>3</sup>.

Por outro lado, foi demonstrado que apenas para  $K_t$  maiores que  $10^6$  MN/m<sup>3</sup> a vida útil do pavimento se estabilizou, estabelecendo um limite superior mais elevado que o de Uzan *et al.* (1978) ( $10^5$  MN/m<sup>3</sup>) para a condição de aderência total. Isso demonstra que esses limites são relativos às condições de análise realizada, variando com carregamento, geometria e materiais utilizados na estrutura.

Em um estudo mais detalhado, Scherer (2018) indica que o módulo de reação transversal  $K_t$ , que quantificaria a aderência entre camadas, pode ser estabelecido através de uma função da adesão entre elas, no qual chamou de  $K_p$ , da tensão normal à interface ( $\sigma_n$ ) e da temperatura na interface ( $T$ ) (3).

$$K_t(x, y) = K_p + \alpha \times \sigma_n(x, y) + \beta \cdot T \quad (3)$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes determinados a partir do ensaio de cisalhamento da interface e as coordenadas  $x$  e  $y$  referem-se ao plano que define a interface. Os parâmetros  $K_p$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são aferidos a partir do ensaio de cisalhamento direto. Esse autor aplicou um carregamento

monotônico cisalhante (50,8 mm/min) na interface submetidos a 3 níveis de tensão axial (50, 570 e 860kPa) e 3 temperaturas (0, 25 e 40°C). A temperatura na interface foi obtida através de funções empíricas diversas. Onde, foram utilizadas as funções apresentadas por Baker *et al.* (1977) (Equação 4) e Motta (1991) (Equação 5) para determinar a temperatura.

$$T_{sup} = 1,2T_{ar} + 3,2 \quad (4)$$

$$T(y) = T_{ar} + (T_{sup} - T_{ar}) \cdot (1 - e^{(0,06855 - 0,002633x)x}) \quad (5)$$

Onde  $T(y)$  é a temperatura do revestimento a uma profundidade  $y$ ,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar e  $T_{sup}$  é a temperatura da superfície do revestimento. Entretanto o autor observou que para realizar uma análise da resposta estrutural por meio da Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) seria preciso assumir a linearidade geométrica e física, por esse motivo se tornaria inviável a implementação do modelo da Equação 3, e por tanto não teria como ser incorporado ao MeDiNa. Isso ocorre por conta da dependente da tensão, tornando o problema estrutural não linear, pelo fato da tensão variar ao longo da interface o que impediria o uso da solução de superposição para a solução do problema.

Apesar disso, o autor propôs uma simplificação no método realizando uma regressão linear múltipla para definir um valor médio e constante para a tensão normal na interface  $\bar{\sigma}_n$  a fim de obter um valor de  $K_t$  constante e assim conseguir simular a estrutura no AEMC. Assim, foi possível através da análise simplificada de dados facilitar o desenvolvimento de funções de transferência com base no modelo de interface, potencialmente melhorando a correlação entre os dados previstos e observados sobre o desempenho do pavimento, especialmente em relação à adesão da camada.

### 5.2.1 Considerações sobre a verificação de interface

Comumente, o interesse da caracterização da interface advém do estudo de comportamento entre duas camadas asfálticas. As pesquisas mais avançadas sobre esse assunto são geralmente conduzidas em países que possuem o hábito de construir pavimentos espessos, de mais de uma camada asfáltica, explicando assim o porquê da interface entre elas ser mais importante estruturalmente do que a interface entre a camada asfáltica inferior e a base granular (TORQUATO E SILVA *et al.*, 2015).

Contudo é preciso lembrar que vários fatores podem influenciar no comportamento da interface da estrutura de um pavimento. Alguns estudos demonstraram que eventos

combinados, como a umidade excessiva unida à elevadas cargas de tráfego podem ocasionar falhas na ligação entre camadas ao longo do tempo, fazendo com que haja descolagem entre as camadas por falha de aderência. Da mesma forma, a taxa de aplicação, temperatura, tempo e manuseio do material asfáltico pode afetar o resultado de aderência entre as camadas do pavimento. Assim, ratifica-se a importância do uso correto dos materiais asfálticos e observância das normativas sobre o assunto que são de extrema importância para garantir uma ligação adequada entre as camadas betuminosas propiciando assim o comportamento satisfatório da estrutura. Pois, entende-se que para assegurar uma ligação adequada e homogênea, é essencial que todos parâmetros citados sejam igualmente bem controlados durante o processo de execução da rodovia e dos corpos de prova em laboratório (DESTREE E VISSCHER, 2017).

### ***5.2.2 Fatores que podem influenciar o comportamento da interface entre camadas***

Nessa seção são apresentados alguns fatores preponderantes para que a imprimação proporcione à base as características mínimas de aceitação.

#### ***5.2.2.1 Taxa de aplicação***

Para Wang *et al.* (2017), a definição de uma taxa de aplicação do ligante adequada é um dos fatores essenciais para alcançar uma elevada resistência de aderência da interface e melhor estimativa de qualidade do pavimento. Assim, se acredita que há uma taxa ótima de aplicação que resulte na resistência máxima de ligação, promovendo uma resistência ao cisalhamento superior às tensões de cisalhamento esperadas pelo tráfego e efeitos de intempéries.

Essa taxa pode variar naturalmente pelo fato da mudança de material que constitui a base, ora mais absorvivo ora menos poroso, fazendo com que em uma obra de pavimentação necessite de testes prévios para garantir que a taxa aplicada seja a adequada para o atendimento da necessidade de ligação entre as camadas. Isso, trás outras preocupações, uma delas é saber se o uso de apenas um único ligante para imprimação é capaz de atender aos variados materiais de base que ocorrem nas obras de pavimentação, ou ainda como proceder para ajustar a taxa de aplicação do ligante em campo. Essas são algumas dúvidas recorrentes que surgem ao passo que novos ligantes estão sendo introduzidos no mercado buscando substituir o ligante

usualmente utilizado (CM-30), em princípio por questões ambientais já discutidas anteriormente.

Das *et al.* (2017) citam que a utilização de uma quantidade excessiva de ligante pode ocasionar a migração da mesma para a camada de revestimento durante a sua execução, e, contribuir para o seu deslizamento, já que nesse caso ela deixaria de atuar como agente de aderência e passaria a ser um agente lubrificante. Caso a quantidade aplicada seja insuficiente, surgirão tensões de tração elevadas na fibra inferior da camada do revestimento em virtude da fraca ligação entre elas.

Na maior parte dos casos é observado que há um aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da taxa de aplicação até que a mesma seja ótima. Por exemplo, verifica-se uma redução gradual da resistência da camada de aderência do tipo pintura de ligação quando a taxa aplicada é superior a ótima (HUANG *et al.*, 2015; SHAFABAKHSH E AHMADI, 2019). Dessa forma, o desafio está em como atingir uma taxa ótima sem testar os materiais envolvidos no serviço previamente, sem dúvida se torna difícil, então a questão aqui é de que os materiais de base são em geral heterogêneos e precisam ser estudados de forma que se possa fazer o uso deles adequadamente compatibilizando o ligante disponível e assim garantir o atendimento mínimo de desempenho esperado.

#### 5.2.2.2 *Tempo de cura*

Devido o cronograma de algumas obras serem ajustados para o menor tempo possível, ocorre que por vezes o aguardo da cura do ligante se torna impraticável dentro da rotina operacional, seja por necessidade de liberação do tráfego ou ainda pela geração de ociosidade da equipe, essa se torna um dos mais difíceis parâmetros a serem controlados. Essa situação, cria precedentes para práticas não recomendadas como o salgamento, que é o lançamento de um material granular solto sobre a imprimação, ainda não curada, ou sobre o excesso de ligante presente devido erro na definição da taxa de aplicação. Fato este que acaba por gerar uma zona de fragilidade entre a base e o revestimento incorrendo em defeitos precoces no pavimento, como deslocamento e/ou escorregamentos do revestimento. Observa-se que, por norma deve-se manter o tráfego fechado e o aguardo de 24h para a liberação do serviço de revestimento.

Por esse motivo, acredita-se ser imprescindível atestar a cura do ligante antes de prosseguir com o serviço de pavimentação. Alguns autores observaram que a resistência de aderência na interface aumenta com o tempo de serviço (ALMEIDA *et al.* 2019; DAS *et al.*,

2017). Em seus estudos, Das *et al.* (2017), atribuíram esse fenômeno à cura de uma emulsão utilizada em um serviço de pintura de ligação, sendo mais evidenciada nas emulsões de ruptura lenta. Já Almeida *et al.* (2019) utilizou cinco diferentes emulsões especiais para imprimação e observou tempos de espera para a cura de até 72 horas após a sua aplicação, deixando claro a cura é suscetível às mudanças do tipo de material de base. Raab e Partl (2015) compararam as propriedades de resistência nas camadas de aderência logo após a construção e com dois meses de uso. Através de seus resultados esses autores concluíram que a influência da cura a curto prazo e do tráfego elevado nem sempre é observada, mas que as propriedades de aderência melhoraram claramente durante um período de tempo mais longo.

### 5.2.2.3 Temperatura do ensaio

A variação de temperatura ao qual o ensaio é realizado interfere nos valores obtidos de resistência ao cisalhamento, dado o fato de que as propriedades dos ligantes asfálticos são suscetíveis à variação de temperatura. De toda forma, vários estudos mostraram que os valores de resistência ao cisalhamento sofre uma redução em temperaturas maiores e que os melhores valores de resistência são encontrados para temperaturas mais baixas (MOHAMMAD *et al.*, 2002; RAPOSEIRAS *et al.*, 2012; BAE *et al.*, 2013; WHANG *et al.*, 2017; SUFIAN *et al.*, 2020 e FAN *et al.*, 2021).

Alguns desses estudos realizados por esses autores envolveram a utilização de dois tipos distintos de cimento asfáltico e quatro tipos de emulsão. Esses estudos abrangeram também a aplicação de cinco taxas diferentes de aplicação de imprimação, sendo conduzidos ensaios em duas temperaturas distintas, 25°C e 55°C. Os resultados obtidos revelaram que a resistência ao cisalhamento à temperatura mais baixa foi cinco vezes maior do que aquela medida à temperatura mais elevada. Isso foi observado especialmente ao se analisar a variação de temperatura como único fator de influência nos resultados. (MOHAMMAD *et al.*, 2002).

Por sua vez, Bae *et al.* (2013) realizaram ensaios de cisalhamento variando a temperatura de -10°C a 60°C e observaram que, a resistência ao cisalhamento da interface aumentou com a redução da temperatura. O estudo conduzido por Sufian *et al.* (2020) investigou a influência da temperatura na resistência ao cisalhamento. Eles realizaram ensaios utilizando quatro tipos diferentes de emulsões asfálticas, aplicadas em uma taxa única, em duas temperaturas (25°C e 46°C). Os resultados indicaram uma redução de aproximadamente 70% na resistência ao cisalhamento com o aumento da temperatura para as amostras de mistura asfáltica densa. Já para as amostras de mistura asfáltica com agregados pétreos (SMA), essa

redução foi, em média, de 62%. Esses resultados destacam a variação significativa da resistência ao cisalhamento em diferentes condições de temperatura e tipos de mistura asfáltica.

#### 5.2.2.4 Tensão normal aplicada

Observou-se que a maioria dos estudos laboratoriais que variam a tensão normal aplicada à amostra concluiu-se que, à medida que a tensão normal aumenta, a resistência da aderência da camada aumenta, especialmente em temperaturas mais altas. Em temperaturas mais altas, a influência do atrito interno na resistência da aderência é maior do que a influência do material de ligação e da taxa de aplicação, e o atrito interno depende da carga normal e da textura da superfície.

Romanoschi e Metcalf (2001) ao analisar os resultados da interface entre camadas asfálticas variando a temperatura em três valores e a tensão normal aplicada sobre a amostra em quatro valores, 140, 280, 410 e 520kPa, encontrou os seguintes resultados a uma temperatura de 25°C valores próximos, de 1500, 1400, 1600 e 1700kPa, respectivamente, em valores aproximados. Esses autores indicam ainda que para uma melhor determinação da influência da temperatura na resposta da tensão normal nos resultados de resistência ao cisalhamento seja feita em várias temperaturas.

West *et al.*(2005) ao desenvolver um teste para medir a resistência de aderência entre camadas de pavimento, utilizou 3 ligantes para pintura de ligação em três taxas de aplicação (0,09, 0,23, e 0,36 L/m<sup>2</sup>) e variou a tensão normal aplicada em três valores (0, 690 e 1380kPa), encontrando resultados de resistência ao cisalhamento, com o ligante CRS-2 (emulsão utilizada) à temperatura de 25°C na taxa de 0,23 L/m<sup>2</sup>, da ordem de 2130 e 2220kPa, respectivamente, para cada valor de tensão normal aplicada, demonstrando para o horizonte da pesquisa que não houve grande variação nos valores de resistência ao cisalhamento.

No estudo conduzido por Scherer *et al.* (2020), que avaliou a resistência ao cisalhamento da interface de uma camada granular sobreposta por uma camada de revestimento asfáltico, foi observado que para uma mesma tensão normal aplicada ( $\sigma$ ) os resultados foram similares entre si, com uma resistência ao cisalhamento média de  $\tau = 1120\text{kPa}$  e desvio padrão de 60kPa para os ensaios que usaram a tensão normal de 570kPa, já nas amostras em foi aplicada uma tensão normal de  $\sigma = 860\text{kPa}$  a resistência ao cisalhamento média foi de  $\tau = 1660\text{kPa}$ , com desvio padrão de 120kPa.

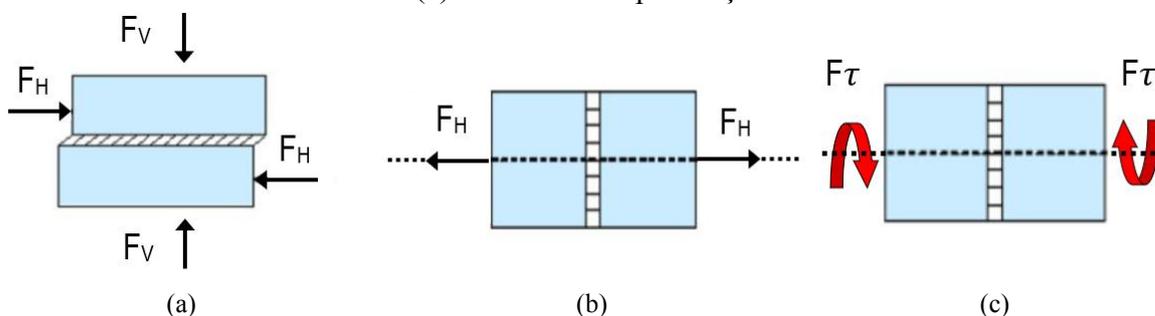
Apesar de se tratarem de interfaces diferentes (asfalto-asfalto e asfalto-base), propriedades relativas à envoltória de ruptura e também o módulo de reação transversal podem

ser utilizadas para descrever o comportamento de ambas (TORQUATO E SILVA, 2017). Dessa forma, além dos ensaios de imprimação, serão apresentados a seguir ensaios de resistência e módulo de reação da interface entre camadas asfálticas.

### 5.3 Considerações sobre a resistência ao cisalhamento entre camadas

A resistência ao cisalhamento entre camadas dos pavimentos rodoviários são um problema crítico para a durabilidade e bom comportamento dos pavimentos rodoviários. Estudos recentes, Lherus (2020) e Smith *et al.* (2021), apontam que a aderência insuficiente entre as camadas do pavimento pode levar a uma variedade de problemas estruturais, incluindo delaminação e deformações excessivas, que comprometem a funcionalidade e a vida útil da via. Pesquisas no assunto tem demonstrado um interesse crescente em métodos inovadores de medição e melhoria dessa resistência nos últimos anos, refletindo a importância estratégica desse parâmetro para a engenharia de pavimentos (GOMES *et al.*, 2022). O descolamento da interface de pavimento ocorre normalmente na forma de cisalhamento ou na forma de tensão resultante da ação da carga de tráfego, por isso, a maioria dos métodos de avaliação do desempenho da ligação utiliza ensaios que medem cisalhamento, tração, e/ou torção. Al-Qadi *et al.* (2008) ao verificarem métodos de medição da resistência ao cisalhamento na interface de revestimentos asfáltico sobre revestimentos de Concreto de Cimento Portland (CCP) indicou que o mecanismo que enfraquece a ligação pode ser medido de três formas, conforme a Figura 31.

Figura 31 – Formas de avaliar as interfaces entre camadas: (a) cisalhamento direto, (b) tração, e (c) cisalhamento por torção.



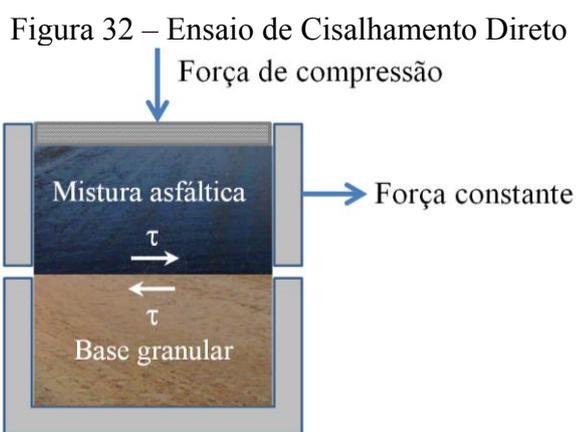
Fonte: Adaptado de Al-Qadi *et al.* (2008)

Mantilla e Button (1994), realizaram ensaios de torção para fins de cálculo da resistência ao cisalhamento da interface entre base e o revestimento. A modelagem da ruptura

adotada foi o critério de Morh-Coulomb, onde, os pesquisadores encontraram valores de ângulo de atrito entre 20 e 27°, e coesão entre 31 e 62kPa para as interfaces imprimadas, enquanto para as não imprimadas obteve-se ângulo de atrito equivalente a 33° e coesão nula. Os autores concluíram ainda a partir dos resultados que em elevados níveis de tensão normal (por volta de 300kPa) as tensões de cisalhamento máximas para as amostras imprimadas e não imprimadas se aproximam.

Dessa forma, para essa situação, a qualidade da imprimação seria irrelevante em termos de resistência ao cisalhamento da interface. Por outro lado, ao simular um pavimento submetido a carregamento variando entre 200 e 800kPa, espessura de revestimento variando de 7,5 a 20 cm e 5000MPa de rigidez, sobre base granular variando de 15 cm a 38 cm de espessura e 100MPa de rigidez, os autores verificaram que a tensão normal máxima na interface variou de 20 a 130kPa. Para esses níveis de tensões mais reduzidos, a coesão fornecida pela imprimação é preponderante para a resistência ao cisalhamento da interface, uma vez que a resistência fornecida pelo atrito é dependente da tensão normal aplicada.

Para a obtenção dos resultados relatados nos dois parágrafos anteriores, Mantilla e Button (1994) realizaram ensaio de cisalhamento direto a deformação controlada, tal qual utiliza-se para ruptura de solos, a fim de estudar a resistência ao cisalhamento da interface base-revestimento sob diferentes condições, conforme mostrado na Figura 32.



Fonte: Adaptado de Mantilla e Button (1994)

Assim, os autores encontraram coesões variando entre aproximadamente 100 e 300kPa, a depender do material utilizado, para as imprimadas realizadas com varredura anterior, sem poeira na superfície da base granular. Nesse caso (com varredura), a interface sem imprimação apresentou uma coesão de 160kPa. Sem a realização da varredura, as coesões variaram entre 0 e 160kPa. Para essa situação, a interface não imprimada apresentou coesão de

aproximadamente 30kPa, indicando a necessidade de remover a poeira da superfície antes de aplicar o ligante de imprimação ou a camada asfáltica sobre a base granular.

No que diz respeito ao ângulo de atrito, os resultados variaram entre 52° e 73°. Para a amostra sem imprimação, o valor encontrado foi de 67°. Percebe-se, dos resultados obtidos por Mantilla e Button (1994) que a imprimação contribui sobretudo na parcela de coesão da envoltória de ruptura.

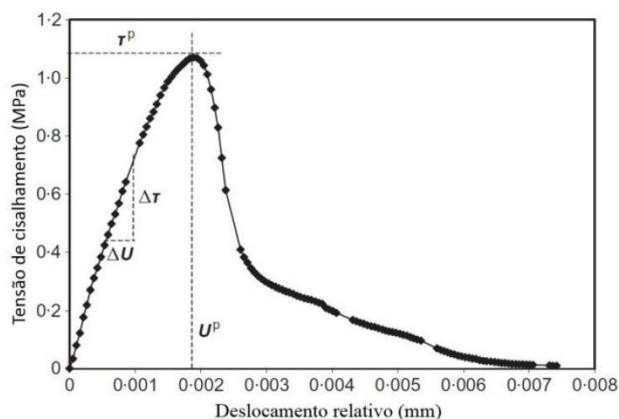
### 5.3.1 Ensaio de cisalhamento leutner

O ensaio de cisalhamento Leutner foi desenvolvido na Alemanha no fim da década dos anos 70 e tem como objetivo observar a resposta mecânica da interface entre duas camadas asfálticas quando submetidas ao cisalhamento direto (LEUTNER, 1979). Os corpos de prova com 150 mm de diâmetro podendo ser fabricados em laboratório ou retirados de campo. O cisalhamento era provocado por meio de uma taxa de deslocamento de 50 mm/min de um CP em relação ao outro, sendo monitorada a força de cisalhamento necessária para a manutenção dessa taxa ao longo do ensaio. Não havia tensão normal ao plano de cisalhamento. O ensaio possuía a vantagem da simplicidade em relação ao tradicional cisalhamento direto de duas placas em forma de paralelepípedo. Por outro lado, havia a inconveniência da distribuição não uniforme de tensões (COLLOP *et al.*, 2009). Através da curva de tensão por deslocamento (Figura 33b), o ensaio permite que se extraíam parâmetros de cisalhamento máximo e também o módulo de reação de cisalhamento (rigidez) da interface.

Figura 33 – Ensaio de Cisalhamento Leutner



a) Equipamento do ensaio de Leutner  
Fonte: Collop *et al.*, 2003



b) Gráfico de resposta típica do ensaio Leutner

Collop *et al.* (2003) concluíram que os resultados do ensaio em termos de módulo de reação de cisalhamento e cisalhamento máximo tendem a apresentar alta variabilidade. Isso é atribuído aos diversos fatores de mecanismos existentes na interface dos corpos de prova, como a força de atrito entre os agregados e a adesão entre esses e a pintura de ligação. Outras conclusões do trabalho citado e que são relevantes para a presente pesquisa são:

- a) a não utilização de pintura de ligação diminui o cisalhamento máximo suportado pela interface;
- b) a interface de macadame betuminoso com bases cimentadas apresentou resistência bastante reduzida, o que foi atribuído à penetração nula do ligante na base, resultado que corrobora com experiências de campo.

Ao avaliar a influência do tipo e da taxa de aplicação com pintura de ligação Guimarães (2013) realizou os ensaios de Leutner onde verificou ainda quanto o tamanho da amostra e da textura superficial, interferem nos resultados de aderência entre camadas asfálticas. Esse autor utilizou emulsões do tipo RR-1C e RR-1C-E e verificou que há existência de uma taxa ótima que possa ser associada ao tipo de emulsão. Em relação ao diâmetro da amostra foi observada que essa também influencia nos resultados, visto que, os corpos de prova com 100 mm de diâmetro apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento do que aqueles com 150mm.

### **5.3.2 Critério de falha segundo Mohr-Coulomb**

Em alguns casos, assume-se que o comportamento dos materiais quando submetidos à tração e à compressão são similares, percebe-se que as superfícies de fluência são funções antissimétricas em relação à origem. Apesar disso, sabe-se que materiais como rochas, ferro fundido, solos e concreto apresentam comportamentos completamente diferentes a depender do sentido da tensão à qual estão sujeitos (POPOV, 1913).

Griffith (1920) explicou o fenômeno através do conceito de energia de superfície nas falhas microscópicas, onde as tensões de tração são mais severas que as tensões de compressão de magnitude equivalente. Na prática, isso se reflete na menor resistência à tração de alguns materiais que possuem considerável índices de vazios, como é o caso das misturas asfálticas. Enquanto as tensões de compressão tendem a colmatar os vazios, as tensões de tração tendem a transformá-los em trincas de maior dimensão.

Nessa mesma linha, o engenheiro alemão Otto Mohr (1835-1918) propôs a abordagem de múltiplos estados de tensões para um mesmo material, de modo que pudessem ser construídos círculos de Mohr no mesmo espaço

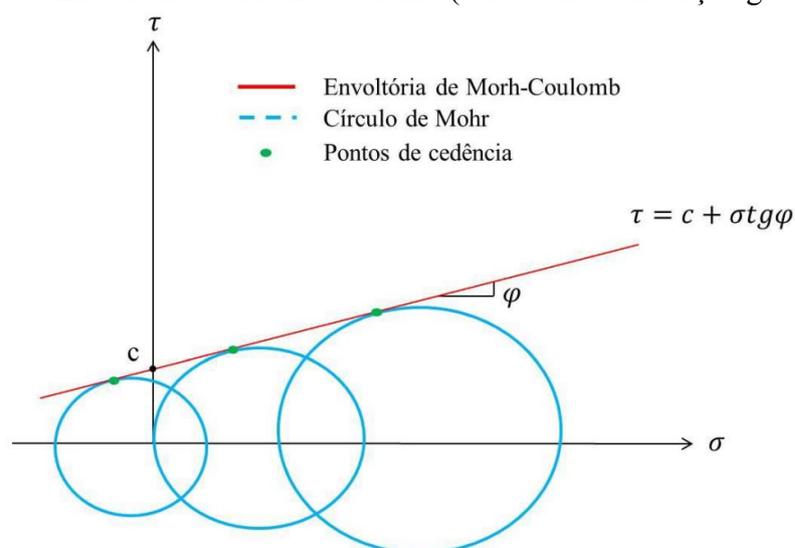
Figura 34), tornando possível a verificação do comportamento do material quanto à tração, cisalhamento e compressão (POPOV, 1913). A equação da reta apresentada pela Equação 3 é uma forma simplificada de apresentar a envoltória de Mohr-Coulomb que, na prática, possui formato curvilíneo. Por outro lado, pode-se utilizá-la com precisão razoável desde que através da interpolação dos pontos de fluência, sendo a extrapolação desses sujeita a maiores imprecisões.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

Onde  $\varphi$  representa o ângulo de atrito (radianos) e  $c$  a coesão (unidades de tensão).

Apesar disso, é importante observar que o parâmetro de Mohr-Coulomb é influenciado pela tensão axial que atua sobre o material. Essa influência se manifesta através da tangente do ângulo de atrito  $\varphi$ . Por outro lado, a coesão  $c$  está relacionada à resistência ao cisalhamento do material quando esse se encontra em situações de cisalhamento puro, desprovido de tensão axial e sem confinamento.

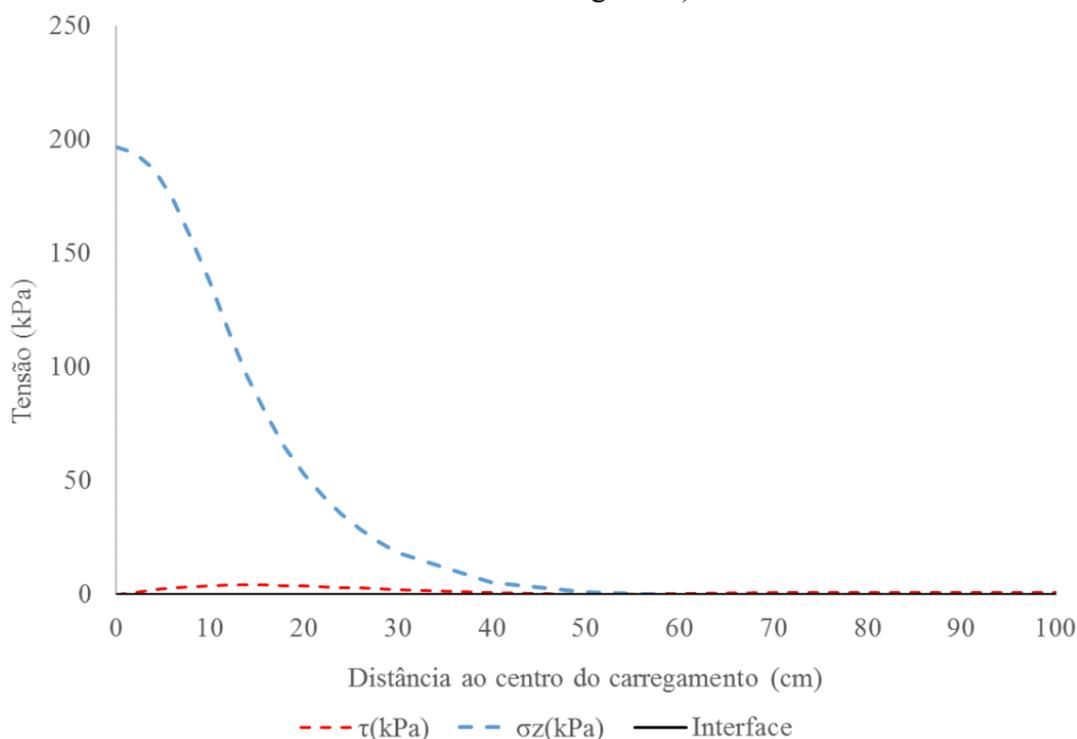
Figura 34 – Envoltória de Mohr-Coulomb (tensões na convenção geotécnica)



Fonte: Torquato e Silva (2017)

Chen e Huang (2010), ao estudarem o comportamento de interfaces entre revestimentos asfálticos verificaram que ele sofre influência direta da tensão normal aplicada. Pelo preceito básico da mecânica dos solos, sabe-se que com o aumento de uma força aplicada transversalmente ao plano de cisalhamento há o aumento do atrito interno da massa de solo, fruto da maior aproximação das partículas do solo, fazendo com que a resistência à ruptura por cisalhamento aumente. Tal consideração é essencial, uma vez que as tensões de compressão sobre a interface não se distribuem de maneira uniforme em estruturas de pavimentos. Em seus estudos, Torquato e Silva (2017), ilustrou como se dá a distribuição de tensões obtida por meio da simulação de uma estrutura formada por uma base única de material granular estabilizado com 15 cm sobreposto por revestimento tipo CA com 5 cm de espessura, usualmente utilizada no Estado do Ceará (Figura 35).

Figura 35 – Distribuição de tensões sobre a interface (eixo central do carregamento na origem do gráfico)



Fonte: Torquato e Silva (2017)

Assim, foi possível representar a aderência entre camadas fornecida pela membrana de imprimação por uma mola  $K_{imp}$ , da qual a tensão normal não tem influência. A parcela que sofre influência da tensão normal é representada pela mola  $K_{fat}$ , que indica o atrito entre os agregados, conforme descrito por Lambe e Whitman (1995). Desse modo, quando há o rompimento da interface, indicando a tensão de ruptura máxima  $\tau_{max}$ , onde não há mais

influência das molas. Assim, pode-se entender o módulo de reação transversal  $K_t$ , que representa a parcela referente à membrana de imprimação, é descrita pela Lei de Goodman, sendo resultante da soma das suas molas (7).

$$K_t = K_{imp} + K_{fat} \quad (7)$$

Assim, o modelo mecânico pode ser representado pelos seguintes elementos descritos nas seguintes Equações 8, 9 e 10, mostradas abaixo:

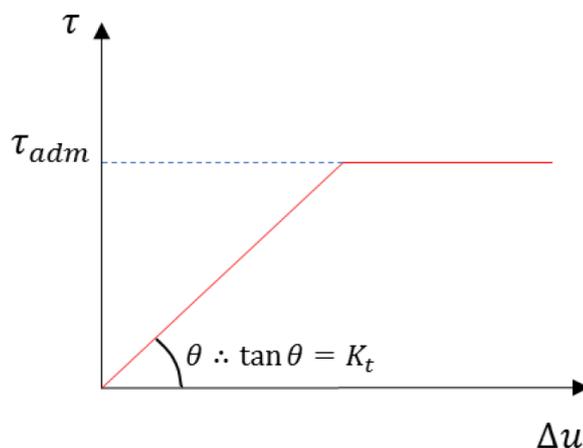
$$K_{fat} = \alpha\sigma \quad (8)$$

$$\tau_{max} = c + \tan\varphi \quad (9)$$

$$K_t = \begin{cases} K_t, \tau < \tau_{max} \\ 0, \tau \geq \tau_{max} \end{cases} \quad (10)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão normal aplicada,  $\alpha$  uma constante experimental,  $c$  a coesão da envoltória de Mohr-Coulomb e  $\varphi$  o ângulo de atrito. Sob uma tensão de cisalhamento  $\tau$  aplicada monotonicamente e uma tensão normal  $\sigma$ , o arranjo da interface permite a curva mostrada na Figura 36.

Figura 36 – Curva tensão e deslocamento da interface revestimento asfáltico – base granular



Fonte: Torquato e Siva (2017)

## 5.4 Materiais e métodos

Esta seção apresenta a caracterização dos materiais que compõem a interface base-revestimento e suas condições de contorno, ou seja, a mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico

(CA) e o Tratamento Superficial Simples (TSS), fluido de imprimação (G8) e o solo utilizado como camada de base. Os materiais, granular e asfálticos, são os comumente empregados na construção de obras rodoviárias da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e o fluido de imprimação foi apresentado e validado no Capítulo 2 através das metodologias de avaliação de ligantes para imprimação e que constam nas proposições de normas do Capítulo 3. Por fim, as metodologias de avaliação têm por finalidade o emprego de práticas mais detalhadas em serviços de imprimação e de refinamento das considerações sobre a interface de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.

#### ***5.4.1 Caracterização do solo e fluido imprimante***

O solo utilizado foi do tipo arenoso (A-2-4), com CBR de 33%, expansão nula e MR médio de 382MPa, proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza. Já o fluido imprimante foi escolhido após ser submetido aos ensaios de caracterização e verificação de comportamento descritos no capítulo anterior e segundo as normas vigentes. Aqui intitulado apenas como G8, esse fluido foi escolhido por ter apresentado o melhor comportamento frente a outros 6 fluidos testados e com resultados até melhores do que os do ligante de referência (CM-30). Esse fluido de imprimação foi produzido pela empresa que cedeu todos os fluidos para imprimação com o intuito de testá-los a fim de verificar sua viabilidade técnica e ambiental para que ele viesse a integrar o portfólio de materiais disponíveis para imprimação da empresa. Diante dos resultados, confirmou-se que dos fluidos testados, o G8 foi o que mostrou o melhor comportamento frente a todos os parâmetros avaliados e que segundo a empresa o G8 passa a ser um possível substituto do CM-30 em um futuro próximo, mas que no momento não é uma prioridade por conta de outros projetos em andamento.

#### ***5.4.2 Moldagem dos corpos de prova***

Para a moldagem do solo no cilindro foi utilizado um disco intermediário entre o compactador e o solo, foi utilizada uma energia intermediária (12,9 kg/cm/cm<sup>3</sup>), totalizando 15 golpes com o soquete de 4,5 kg, para atingir o densidade máxima teórica definida no ensaio de compactação. Na Figura 37 é possível ver os detalhes da compactação.

Figura 37 – Detalhes da compactação do solo



a) Filtro de papel

b) Solo solto

c) Anteparo auxiliar

d) Solo compactado

Fonte: Próprio autor (2023)

#### 5.4.3 Imprimação dos corpos de prova

As amostras foram imprimadas seguindo o protocolo estabelecido por Rabelo (2006), inicialmente com a varrição da superfície compactada após a perda de 50% da umidade de moldagem, irrigação prévia com água à taxa de 0,5 L/m<sup>2</sup> e por fim, o fluido imprimante aquecido a 60 °C à taxa de 1,2 L/m<sup>2</sup>, conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Detalhes do protocolo de imprimação



a) Corpos de Prova varridos

b) Corpo de Prova irrigado

c) Ligante sendo aquecido

d) CPs imprimados

Fonte: Próprio autor (2023)

#### 5.4.4 Moldagem dos revestimentos asfálticos

O revestimento utilizado foi uma mistura do tipo CA que foi utilizada em um trecho da BR-020 sob jurisdição do DNIT-CE, trata-se de uma mistura aplicada como capa de rolamento que atendeu a Faixa C do DNIT e caracterizada pelo Centro de Tecnologia em Asfalto da UFC, conforme a Tabela 11. A compactação foi realizada em camada única de 4 cm de altura sobre o solo imprimado, resultando em 115 golpes e um volume de vazios de 3,62%, conforme detalhes na Figura 39. A escolha por essa espessura de revestimento para moldagem

dos corpos de prova se deu por conta da limitação do molde utilizado e para que a amostra atingisse o volume de vazios adequado.

Tabela 11 – Caracterização da mistura asfáltica utilizada

Parâmetros	Valores	Unidade
Teor de ligante	5,2	%
Densidade da mistura (Gmm)	2,396	-
Volume de Vazios	4,0	%
MR	4650	MPa
Resistência à tração	1,24	MPa
Flow Number	69	-

Fonte: Próprio Autor (2024)

Figura 39 – Detalhes de compactação da mistura



Fonte: Próprio autor (2023)

Para revestimento do tipo Tratamento Superficial Simples foi utilizada uma brita coletada na cidade de Maracanaú, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), na pedra BritaCet. A análise petrográfica realizada, indicou que as rochas dessa pedra possuem em sua composição principalmente gnaiss e granito. Foi utilizada a fração intermediária entre as peneiras de abertura 3/4'' e 5/8'' e a emulsão asfáltica do tipo RR-2C, classificada segundo a SOP-CE (Superintendência de Obras Públicas do Ceará), como Classe II. A dosagem foi determinada segundo a pesquisa de Brito (2022), sendo utilizado 0,8 L/m<sup>2</sup> de emulsão e a taxa de 19,8 kg/m<sup>2</sup> de agregado e sua compactação foi realizada com golpes de soquete Marshall em energia compatível calculada.

Para estabilizar o tratamento superficial foi utilizado ainda uma sobreposição de microrrevestimento asfáltico cedido pela Asfaltos Nordeste Ltda, caracterizada e dosada, conforme a Tabela 12. Na Figura 40 é possível ver os detalhes da moldagem com o TSS e o microrrevestimento usados.

Tabela 12 – Composição da mistura – Faixa III da SOP-ES-P 19/19

Materiais	%
Brita 3/8"	33
Pó de Pedra	66
Cal Hidratada (CH-1)	1
*Emulsão Polimerizada RC1C-E	9
*Água (bruta)	12

Obs: \* Em relação ao peso de agregados

Fonte: Asfaltos Nordeste (2023)

Figura 40 – Detalhes do revestimento do tipo TSS



Fonte: Próprio Autor (2024)

#### 5.4.5 Interface da base-revestimento

Com o intuito de determinar a resistência da ligação entre as camadas de base e revestimento foi realizado o ensaio de cisalhamento da interface proposto por Torquato e Silva (2017) com algumas modificações, a fim de extrair dados de módulo de reação transversal e parâmetros de ruptura do modelo Morh-Coulomb, para posterior análise da interface através do programa AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) versão 2.4.6. A caracterização da interface em termos de módulo de rigidez transversal, a partir da modelagem dos resultados dos ensaios de laboratório, foi utilizada como parâmetro de entrada na análise estrutural já incorporado no AEMC incorporado ao MEDINA para a realização da análise da influência da imprimação na resposta da interface do pavimento.

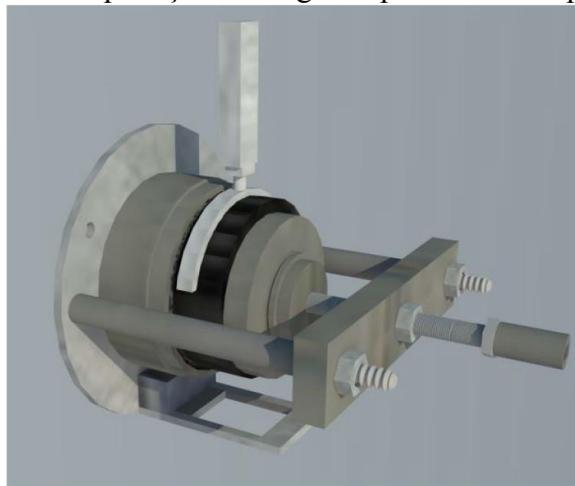
Para atender ao propósito do ensaio, o protótipo desenvolvido por Torquato e Silva (2017) foi aprimorado, visando maior controle da aplicação da carga axial (tensão normal), que antes era aplicada com um sistema de pórtico com haste parafusada pressionando uma mola de constante elástica conhecida (Figura 41a). No entanto, foi mantida a forma como era aplicada a carga transversal (tensão de cisalhamento) no equipamento do tipo *Universal Test Machine*

(UTM), que era com o auxílio de uma “garra” de formato curvo para posicionar o ponto e a forma de aplicação do carregamento no corpo de prova, conforme a Figura 41b.

Figura 41 – Molde de compactação com sistema de aplicação de carga acoplado - Protótipo



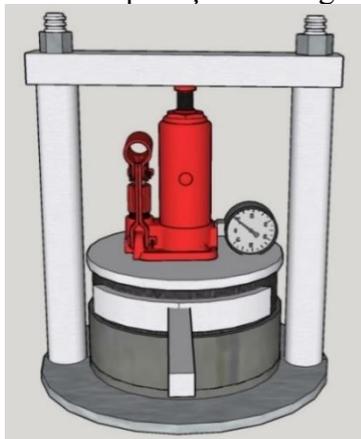
a) Detalhe da mola de aplicação da força axial  
Fonte: Torquato e Silva (2017)



b) Garra de aplicação da força transversal

O conceito físico de máquina simples do tipo parafuso para aplicar uma força axial no sentido do avanço do parafuso em função da compressão da mola foi substituído por um macaco hidráulico acoplado no dispositivo dotado de um manômetro capaz de medir com maior precisão e maior amplitude a força axial (Figura 42a). Dessa forma, é possível aplicar uma força axial de maneira mais uniforme e compatível com o que é medido pela passagem de um eixo padrão de 8,2 tf (cerca de 525kPa). A premissa é que essa força se distribua uniformemente, causando uma tensão axial constante ao longo da superfície da interface.

Figura 42 – Aplicação da carga axial (a) e Ensaio de interface sem tensões axiais (b)



a) dispositivo de aplicação da carga axial  
Fonte: Próprio Autor (2024)



b) Aplicação da carga em interface sem tensões axiais

Para tanto, o dispositivo foi calibrado em uma prensa dotada de um anel dinamométrico, onde foi verificada a correspondência das pressões medidas no manômetro do macaco com as pressões que de fato eram aplicadas a cada marcação, conforme mostrado na Figura 43.

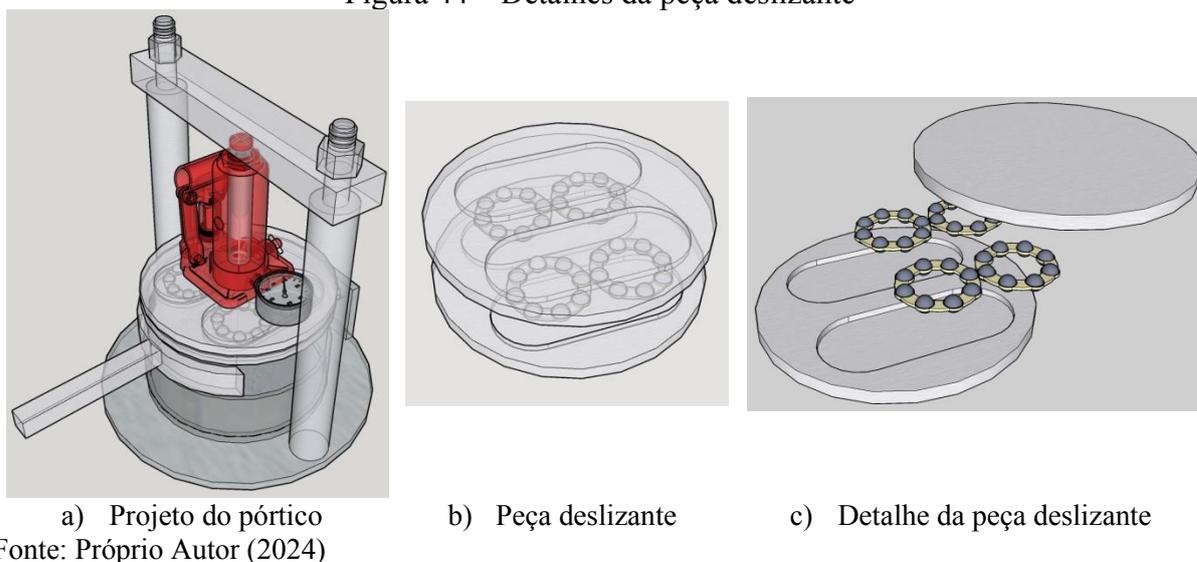
Figura 43 – Prensa utilizada para a calibração do macaco hidráulico



Fonte: Próprio Autor (2024)

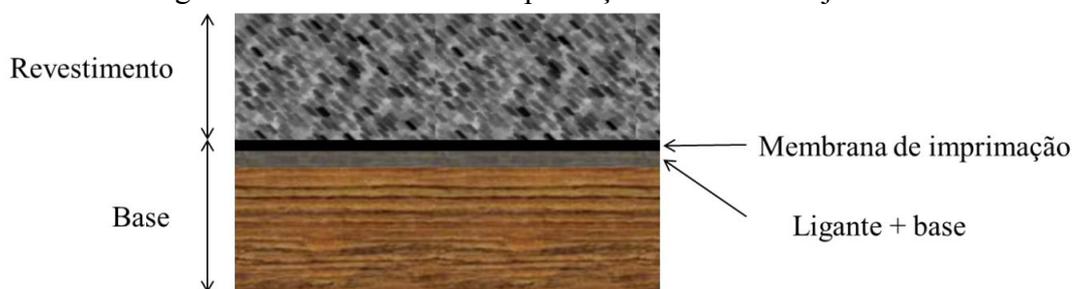
A tensão de cisalhamento, que tem a função de romper a interface, se dá pela razão entre a força transversal à seção do corpo de prova aplicada pela garra acoplada à UTM e a área da superfície de imprimação (Figura 42b) onde, supõe-se que essa força provoque apenas tensões de cisalhamento distribuídas uniformemente sobre a interface. Isso será possível a partir da segunda modificação que minimiza as tensões de cisalhamento geradas pelo atrito entre a placa de aço e a camada asfáltica com a adoção de uma acoplagem deslizante feita por meio de uma peça deslizante com rolamentos guiados (Figura 44b) lubrificado com graxa e colocado entre a base do macaco hidráulico e a placa de aço que entra em contato com a superfície do CP (Figura 44a). Para tal, aferiu-se o coeficiente de atrito dinâmico entre as duas placas. A aferição se deu colocando as placas de aço sobre o asfalto em um plano inclinado, medindo-se o ângulo a partir do qual a placa desliza, a distância percorrida no deslizamento e o tempo decorrido.

Figura 44 – Detalhes da peça deslizante



Observa-se que, em um serviço de imprimação, uma porção do ligante penetra nos vazios da base de solo e se mistura com ela, e outra porção permanece na superfície da camada de base (Figura 45), ao fim do processo se tem 4 materiais distintos: (i) o revestimento, (ii) o material que irá se designar daqui em diante como membrana de imprimação (excesso da imprimação que não penetrou no material de base); (iii) uma composição do ligante mais o material de base que corresponde ao que penetrou na camada de base e (iv) a base propriamente dita. Lambe e Whitman (1995), também entendem que a membrana de imprimação influencia na variação das propriedades mecânicas da interface base-revestimento em conjunto com o atrito fornecido pelos agregados.

Figura 45 – Membrana de imprimação e camadas adjacentes



Fonte: Torquato e Silva (2017)

Após a realização dos ensaios, de posse dos parâmetros de rigidez (módulo de reação transversal) e ruptura (coesão e ângulo de atrito), foi realizada a análise estrutural. A partir dessa análise para verificar os efeitos desses parâmetros sobre a resposta estrutural do

pavimento. Resumidamente, o fluxograma proposto para a caracterização e análise estrutural da imprimação é representado na Figura 46.

Figura 46 – Fluxograma de caracterização e análise estrutural da imprimação



Fonte: Próprio Autor (2024)

## 5.5 Resultados

Nesse seção são apresentados os resultados obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, bem como as análises do módulo de reação transversal e critérios de Mohr-Coulomb para verificação da influência da imprimação na resposta estrutural do pavimento.

### 5.5.1 Cisalhamento entre a base granular/revestimento asfáltico

Na Figura 47 é mostrado o corpo de prova após o ensaio de cisalhamento, especificamente como ficaram a porção inferior e superior da interface após o rompimento, representados respectivamente pela face superior da camada de base granular e a inferior da camada de revestimento asfáltico. Nota-se os agregados de diferentes tamanhos, regiões com diferentes tonalidades, isto é, com mais ou menos concentração de ligante, bem como a irregularidade geométrica da superfície rompida.

Portanto, percebe-se que o fenômeno de ruptura da interface é complexo. A aparência das superfícies sugere que ao mesmo tempo que a membrana de imprimação rompe, parte das camadas também se rompe e agregados deslizam uns sobre os outros.

Figura 47 – Corpo de prova após o ensaio de cisalhamento



a) Corpo de prova rompido

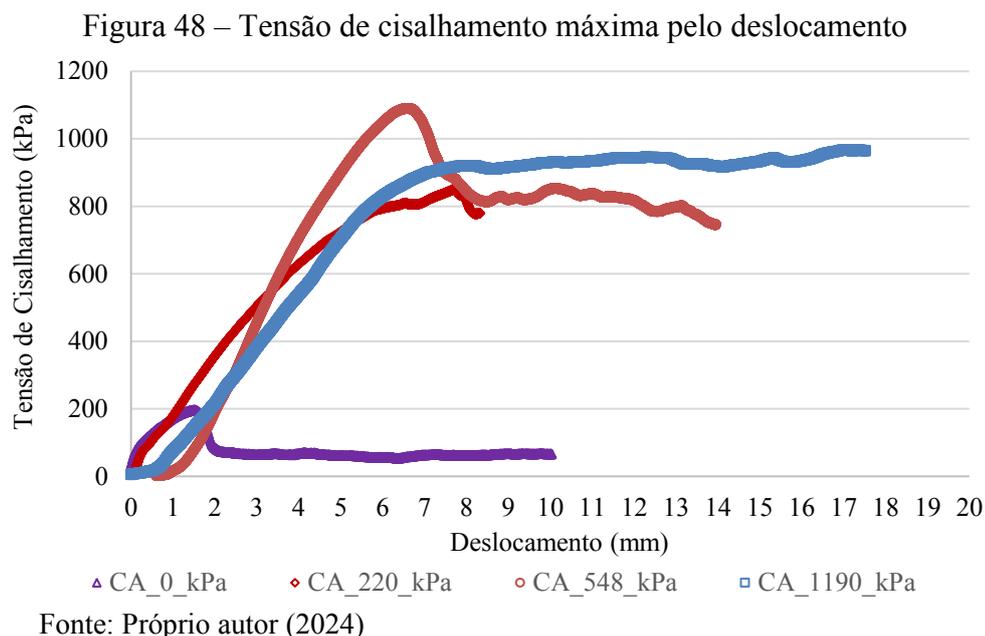
b) Detalhe da parte inferior da mistura asfáltica

c) Detalhe da parte superior da base granular

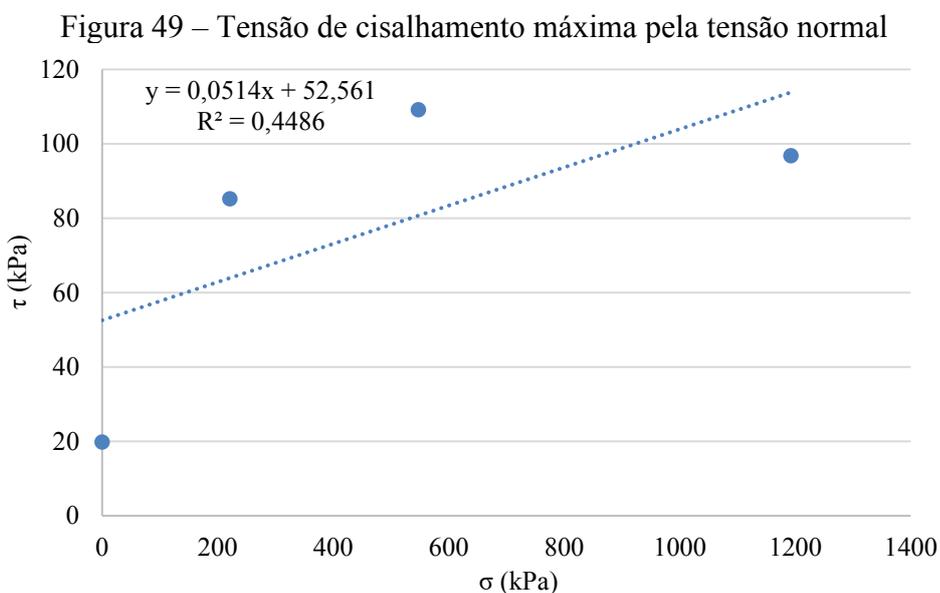
Fonte: Próprio Autor (2024)

Na Figura 48 são apresentadas as curvas em que foram aplicadas tensões axiais correspondentes a 0, 220, 548 e 1190kPa. Isso foi possível devido a modificação do dispositivo de controle de aplicação da tensão axial. A forma das curvas dá indícios em alguns momentos: que há uma região linear relativamente extensa seguida de uma queda na tangente da curva e posterior pico de tensão, onde ocorre a ruptura. É importante observar que na curva roxa submetida à tensão axial de 0kPa, foi a que obteve menor valor de tensão máxima de cisalhamento, indicando que a variação da tensão axial influencia também na resistência à ruptura. Contudo, ainda é possível notar que mesmo quando a tensão axial é zero, ocorre uma tensão residual de cisalhamento.

Pode-se observar ainda que houve um crescimento dos valores de resistência ao cisalhamento à medida que a tensão axial aplicada aos corpos de prova aumentou, esse tendência foi constatada até a tensão normal aplicada de 548kPa. No entanto, na amostra em que foi aplicada a tensão normal de 1190kPa percebeu-se uma reversão da tendência de crescimento da resistência ao cisalhamento observada anteriormente, com uma redução de 11% nessa resistência, indicando que as tensões normais contribuem para o aumento de resistência ao cisalhamento, mas que em um determinado ponto poderá sofrer uma redução dessa resistência devido ao aumento da tensão normal aplicada.



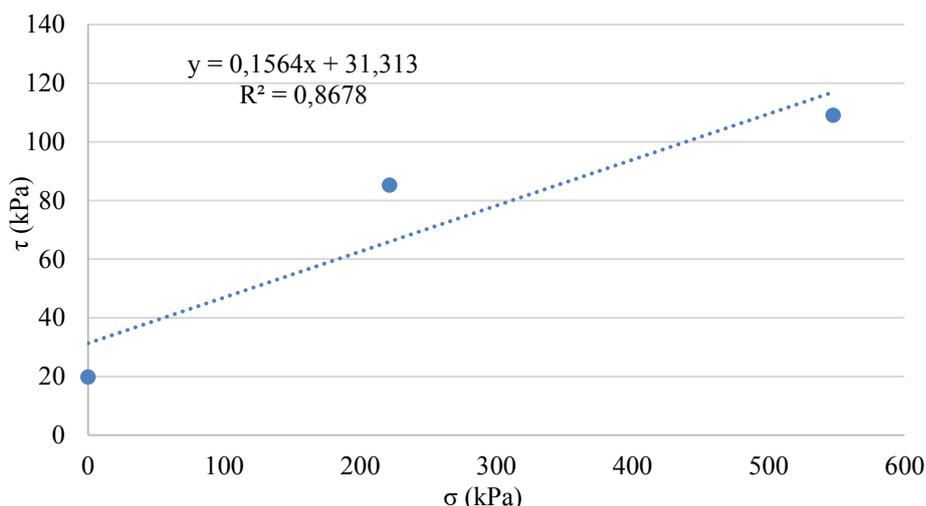
Conforme observa-se na Figura 49, o formato nas curvas de ruptura e a tensão admissível máxima de cisalhamento deixam perceptíveis a adequada utilização do uso do critério de Mohr-Coulomb. Onde, a tangente da reta encontrada, que corresponde ao ângulo de atrito, que foi de  $2,94^\circ$ . Tal ângulo de atrito está abaixo e fora do intervalo encontrado por Mantilla & Button (1994) para interface entre revestimento asfáltico e base granular, que obtiveram um intervalo entre  $20$  e  $27^\circ$ . Entretanto, a coesão de  $50\text{kPa}$  da interface aqui ensaiada ficou dentro do intervalo encontrado por esses mesmos autores, entre  $30$  e  $60\text{kPa}$ .



Percebe-se que a divergência entre os valores da coesão e o ângulo de atrito por ser explicado pela dispersão dos resultados encontrados à medida em que o valor da tensão normal aplicada aumenta, confirmado pelo coeficiente de variação do gráfico (Figura 49), que foi de  $R^2 = 0,45$ . Assim, a fim de melhorar a análise do ponto de vista da representatividade dos dados, foi feita a retirada do resultado obtido quando a tensão normal aplicada foi de 1190kPa, tratando-o como um *outlier*. O gráfico da Figura 50 mostra um aumento do  $R^2$  para 0,87 com o aumento do ângulo de atrito que foi para  $8,89^\circ$ , levemente maior se comparado com o gráfico sem ajuste, e houve ainda redução da coesão que foi de 30kPa, considerada por Mantilla & Button (1994) como limite inferior para os dados gerados por esses autores.

Diante disso, é possível dizer que na interface dos corpos de prova ensaiados não se pode afirmar que existe uma ligação plena, conforme visto na literatura, por Uzan *et al.* (1978) e Kruntcheva *et al.* (2005), que indicam a condição de estabilidade se atinge para valores de tensão máxima de ruptura acima de  $10^5$  MN/m<sup>3</sup>. Entretanto verifica-se que existe um aumento da resistência à ruptura conforme a tensão axial aumenta, mas também que essa foi reduzida quando a tensão axial aplicada foi a máxima, que para o horizonte dessa pesquisa foi de 1190kPa.

Figura 50 – Tensão de cisalhamento máxima pela tensão normal ajustada



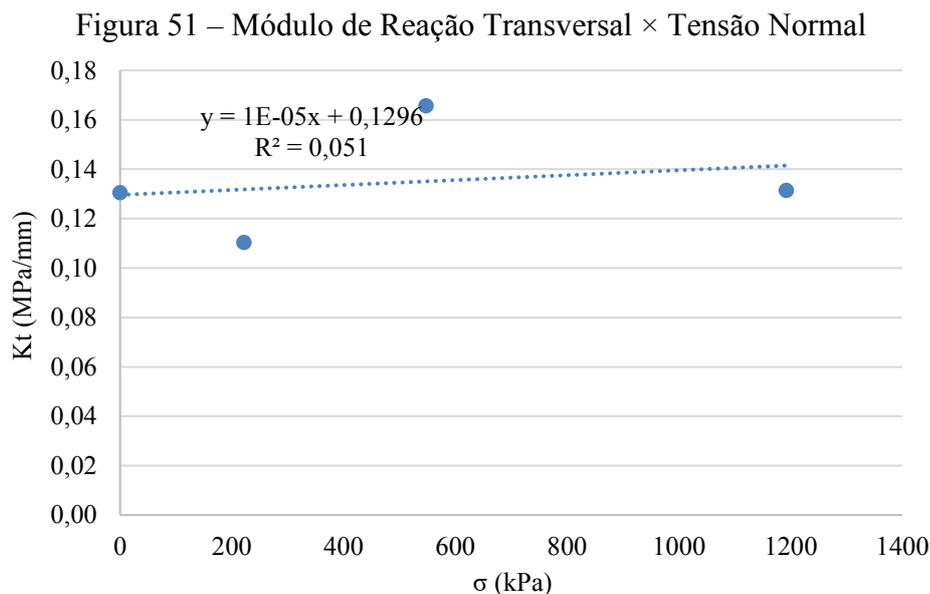
Fonte: Próprio autor (2024)

Scherer (2018), ao avaliar a interface Revestimento-Base Granular, obteve resultados de  $c = 0,8076$  e  $\varphi = 40,62^\circ$  nas condições de carregamento normal de 570kPa na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . O autor indicou que o valor encontrado pode ter variado devido as

considerações sobre o cálculo da área efetiva da interface e do aparato utilizado no ensaio. Já Torquato e Silva *et al.* (2017) obtiveram os resultados de  $c = 0,4577$  e  $\varphi = 69,96^\circ$  nas condições de carregamento normal de 100kPa na temperatura de 25°C. Embora os dois autores tenham utilizados o mesmo material tipo de base, os resultados mostram que houve redução da coesão quando a tensão axial foi menor, o que corrobora com a hipótese de que a resistência da interface ao cisalhamento é afetada pela variação de aplicação da tensão axial.

Verifica-se ainda que para os resultados encontrados nas amostras em que foi empregada a tensão normal de 550kPa, escolhida por ser àquela verificada pela aplicação de carregamento do eixo padrão, um eixo simples de rodas duplas com 80 kN de carga e pressão de inflação dos pneus que é de 550kPa, retornou valores de resistência ao cisalhamento maiores (1060kPa) do que os demais. Ao mesmo tempo, na amostra em que foi aplicada uma tensão normal mais elevada (1190kPa), ao analisar apenas os dados de cisalhamento, torna-se possível indicar a presença do aumento de fragilidade na estrutura do pavimento à ruptura quando da aplicação de tensões axiais maiores. Isso ressalta a importância da interface formada pela aplicação de um material ligante que aumenta a aderência entre a base e o revestimento.

Diante do exposto, foi possível inferir que também parece haver um limite de aplicação de carregamentos axiais considerado "ótimo". Onde, até esse limite consegue-se uma aderência maior entre as camadas, favorecendo a integridade da estrutura e proporcionando a resposta desejada. No entanto, quando essa tensão aplicada ultrapassa determinado valor, a estrutura torna-se mais susceptível à ruptura, exibindo um comportamento de menor resistência. Contudo, levando em consideração os valores de módulo de reação para a amostra que foi submetida a uma tensão normal de 1190kPa foi possível ver que o deslocamento provocado foi maior. Assim, evidencia-se que, embora ocorra uma diminuição na resistência à ruptura, esta não alcança o mesmo patamar das amostras submetidas a tensões normais menores (220kPa). Essa disparidade pode ser visualizada nos valores obtidos nos ensaios das amostras, conforme ilustrado na Figura 51.

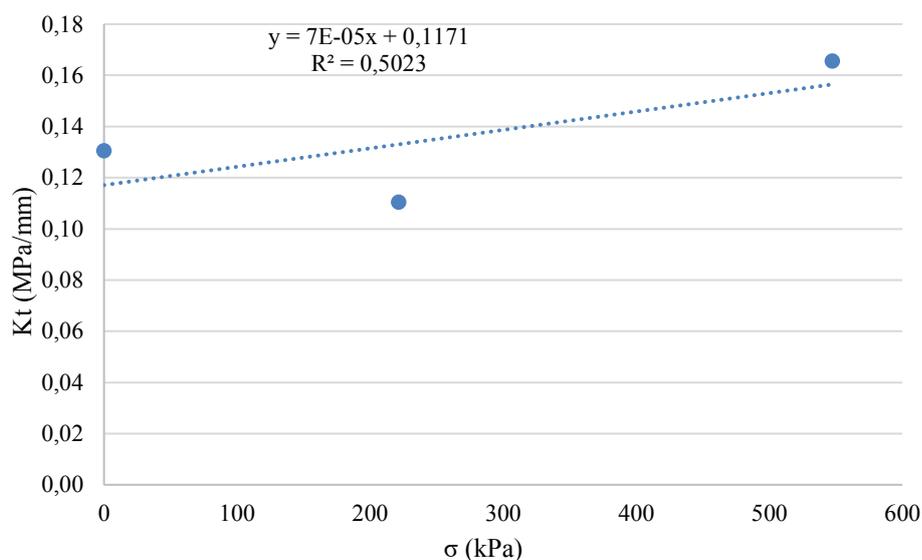


Fonte: Próprio autor (2024)

Pode-se observar também que a variação de  $K_t$ , em todas as amostras ensaiadas e independentemente da tensão normal aplicada, ficou dentro a zona de influência proposta por Uzan *et al.* (1978), onde esse autor demonstrou que a maior influência do valor de  $K_t$  ocorre entre os valores de 0,1MPa/mm a 100MPa/mm. Entretanto, todas as amostras ensaiadas mostraram valores de  $K_t$  próximas do limite mínimo dessa zona de influência (0,1MPa/mm), o que indica que existe alguma influência da imprimação no melhoramento das condições de aderência, porém ainda distante de atingir a condição de plena aderência ( $> 100$ MPa/mm).

Ao se olhar para os resultados do módulo de reação transversal pela tensão normal (Figura 52), apresentando os valores excluindo o *outlier*, observou-se que os resultados do módulo de reação foram maiores à medida em que as amostras foram submetidas à tensões normais maiores. E que por conta da eliminação do *outlier* o  $R^2$  saiu de 0,05 para um  $R^2$  para 0,50, aumento que dá maior confiabilidade aos dados obtidos.

Figura 52 – Módulo de Reação Transversal × Tensão Normal – gráfico ajustado



Fonte: Próprio autor (2024)

De todo modo, a afirmação feita pelo autor deixa dúvidas quanto esse comportamento de aderência plena, pois como mencionado anteriormente, a resistência caiu para as amostras em que foram aplicadas a tensão normal de 1190kPa, o que reforça a hipótese de que o aumento do carregamento axial influencia na resistência da interface entre a base e o revestimento.

### 5.5.2 Cisalhamento entre a base granular/tratamento superficial

Da mesma forma, em complemento a pesquisa da influência da imprimação na resposta estrutura do pavimento, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras preparadas com o mesmo material de base e ligante de imprimação aplicados, e como solução de revestimento foi utilizado um revestimento do tipo TSS seguido por uma camada de microrrevestimento asfáltico, formando assim uma solução do tipo *Cape Seal*. A decisão pelo uso dessa solução foi motivada pela necessidade de se conferir maior estabilidade da amostra durante o ensaio de ruptura por cisalhamento, haja visto que o objetivo aqui foi o de mostrar a resistência ao cisalhamento da interface da estrutura composta pelo revestimento sobre a base imprimada.

Na Figura 53 é mostrado o corpo de prova após o ensaio de cisalhamento, especificamente como ficam a porção inferior e superior da interface após o rompimento, representados respectivamente pela face superior da camada de base granular e a inferior da camada do tratamento superficial. Nota-se que há um escorregamento dos agregados sobre a

base, demonstrando que para esse tipo de revestimento a ligação intersticial é de grande importância para a manutenção da estabilidade da estrutura. Isso é, dependendo da concentração de ligante penetrado, pode-se ter mais ou menos aderência entre a base e revestimento.

Percebe-se também que o comportamento apresentado pelo conjunto Base Granular/*Cape Seal* era esperado, pois nesses casos em que o revestimento tem por finalidade uma condição de melhorador de superfície de rolamento, esperar mais dele é arriscado, em outras palavras, é notório que soluções de revestimentos esbeltos não possuem uma função estrutural bem definida, reforçando a ideia de que a base deve assumir essa atribuição também.

Portanto, mais uma vez verifica-se que o fenômeno de ruptura da interface é complexo. Diferentemente do que ocorreu com a amostra composta pela Base Granular/Concreto Asfáltico (CA), onde a aparência das superfícies avaliadas mostrou que há um rompimento da membrana de imprimação, na amostra que usou o *Cape Seal* como solução de revestimento, houve um escorregamento dos agregados com alguns arrancamentos pontuais devido ao cravamento do agregado em alguns locais. Isso fez com que a resistência ao cisalhamento aumentasse quando do aumento da tensão normal aplicada durante o ensaio.

Figura 53 – Amostra com revestimento do tipo *Cape Seal*



a) Corpo de prova moldado  
Fonte: Próprio Autor (2024)

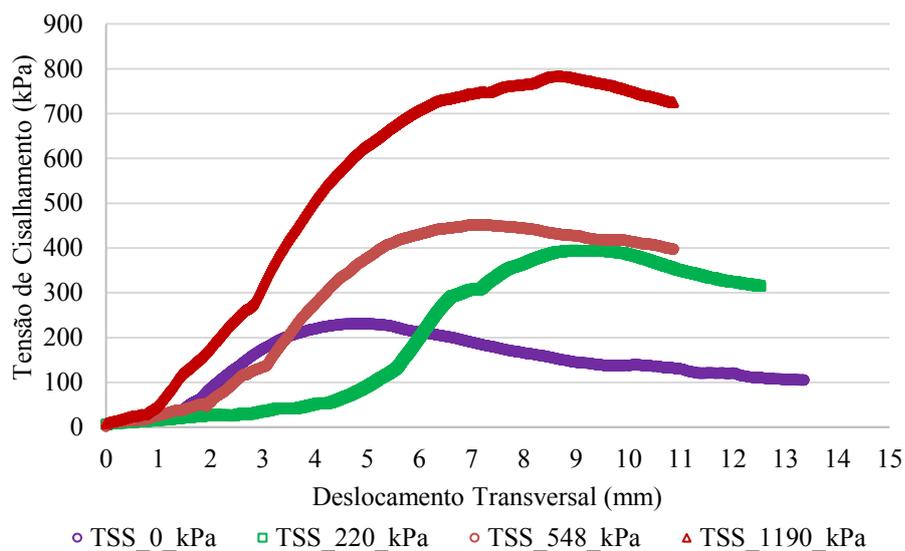
b) Detalhe do ensaio

c) Amostra rompida

Na Figura 54 é possível verificar que a tensão de cisalhamento aumentou à medida que com a tensão normal aplicada foi maior. Observou-se que os pontos de ruptura apresentaram deslocamentos maiores nas amostras em que foram empregadas tensões normais de 220kPa e 1190kPa, de 9 mm aproximadamente. Todavia essas duas amostras romperam com tensão máximas bem diferentes, enquanto na amostra em que foi aplicada tensão normal de 220kPa atingiu uma tensão máxima de ruptura de 380kPa, a amostra submetida à tensão normal

de 1190kPa rompeu com o dobro dessa resistência, de 760kPa, acredita-se que isso ocorreu por conta do efeito provocado pelo aumento da tensão normal aplicada. O que reforça a hipótese na qual a resistência ao cisalhamento sofre influência da variação da tensão normal aplicada, sobretudo quando a solução de revestimento utilizada é de espessura reduzida.

Figura 54 – Gráfico de Tensão de cisalhamento máxima pelo deslocamento



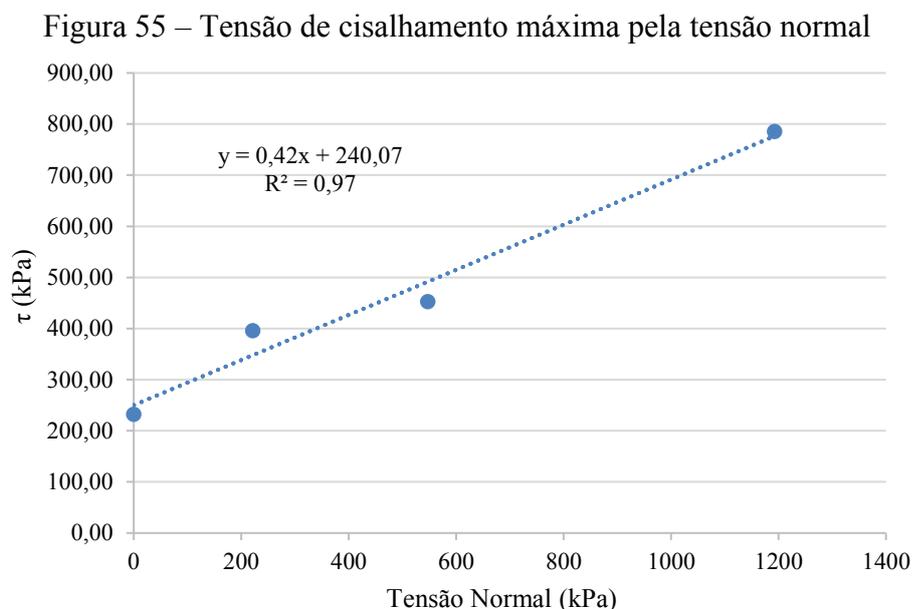
Fonte: Próprio Autor (2024)

Pode-se observar na Figura 54, que as tensões admissíveis máximas de cisalhamento nas amostras que utilizaram o *Cape Seal* apresentaram valores levemente menores do que os observados nas amostras que fizeram uso de CA como revestimento. Dentre os valores medidos é possível verificar uma redução da resistência da ordem de 20% em média, para os valores que utilizaram tensão normal a partir de 220kPa, variando no total entre 380 e 760kPa de resistência à ruptura. Contudo, nas amostras em que não foi aplicada tensão normal (0kPa), o valor de resistência ao cisalhamento chegou ao valor de 200kPa, independente da solução de revestimento utilizada, não havendo, portanto, diferença significativa. Entretanto, em ambos os casos, amostras com CA e com *Cape seal*, a tendência de crescimento da resistência ao cisalhamento a medida que se aumentou a tensão axial se confirmou.

Contudo, é compreensível que as amostras que utilizaram o *Cape seal* como solução de revestimento tenham apresentado redução de resistência, o que pode ser explicado por conta de sua espessura (< 3cm), comum aos tratamentos superficiais. Sendo assim, o fato corrobora com a literatura, segundo Bernucci *et al.* (2022), os tratamentos superficiais possuem uma função estrutural mínima ou inexistente fazendo com que sua estabilidade estrutural seja menor. Por essa razão, neste tipo de revestimento, a resistência à ruptura é mais susceptível às variações

causadas por falhas de adesão, o que reforça a importância de se considerar a aderência no comportamento estrutural do pavimento.

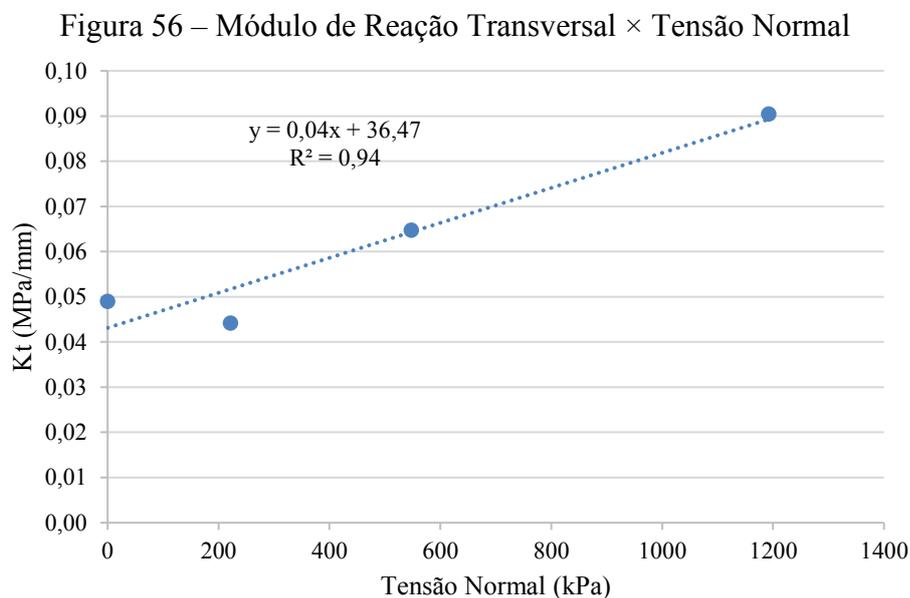
Verifica-se na Figura 55 que a tangente da reta encontrada, que corresponde ao ângulo de atrito, que foi de  $25,31^\circ$  ficou dentro do intervalo encontrado por Mantilla & Button (1994) para interface entre revestimento asfáltico e base granular, que mostrou um intervalo entre  $20$  e  $27^\circ$ . Contudo, a coesão da interface de  $240\text{kPa}$  ficou abaixo do intervalo encontrado pelos mesmos autores, que foi entre  $310$  e  $620\text{kPa}$ . Embora os valores apresentados confirmem uma tendência observada por outros autores (SCHERER, 2018; TORQUATO E SILVA, 2017; KRUNTCEVA *et al.*, 2005 e UZAN *et al.*, 1978). Em relação aos resultados obtidos, a tendência de crescimento da resistência foi consistente, com pouca dispersão ( $R^2 = 0,97$ ), o que torna os resultados mais representativos.



Fonte: Próprio Autor (2024)

Em relação aos valores de  $K_t$  das amostras ensaiadas, todos os valores encontrados ficaram abaixo da zona de influência proposta por Uzan *et al.* (1978), onde esse autor demonstrou que a maior influência do valor de  $K_t$  ocorre entre os valores de  $0,1\text{MPa/mm}$  a  $100\text{MPa/mm}$ . Nesse caso, verificou-se que as tensões normais aplicadas fizeram com que as amostras tivessem um comportamento quase linear quando comparados os valores de  $K_t$  e a tensão normal aplicada, corroborado pelo coeficiente de relação acima de  $90\%$ , conforme apresentado na Figura 56. Esse comportamento demonstrou que a condição na interface da estrutura composta pela base imprimada/*Cape Seal* se assemelha a condição de aderência zero,

ou seja, totalmente descolada, segundo a proposta de Uzan *et al.*, (1978), quando o autor indica que após o valor mínimo de 0,1MPa/mm para se assumir esse comportamento.



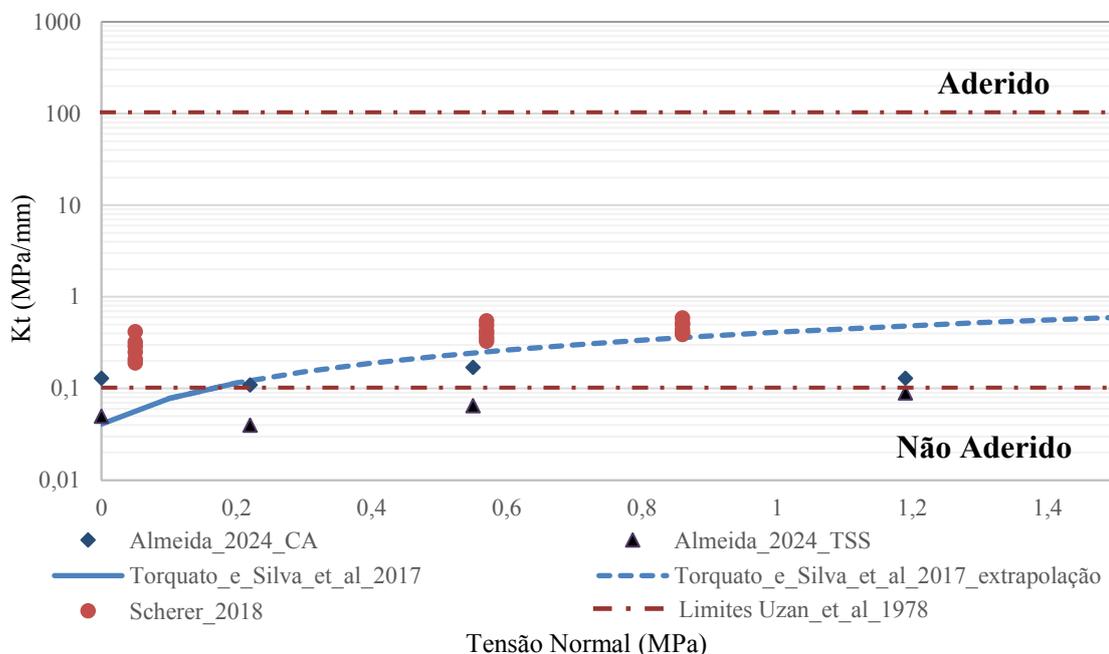
Fonte: Próprio Autor (2024)

Aqui, é possível observar que a variação de  $K_t$ , para as amostras ensaiadas, ainda que abaixo do limite mínimo para se considerar alguma condição de aderência, apresentaram aumento do módulo a partir do incremento de tensão axial, não sendo, no entanto capaz de ultrapassar esse limite. Outro ponto relevante é que, ao analisarmos os resultados desta pesquisa em comparação com os de outros autores que empregaram métodos semelhantes para determinar esses parâmetros, notamos que os valores encontrados aqui se aproximaram do limite mínimo estabelecido por Uzan *et al.*, 1978, mas distantes dos demais autores, com variações de até 95% (para as mesmas condições de tensão axial e temperatura).

Torquato e Silva (2017) conseguiu um  $R^2$  de 0,78, previu bem os valores de  $K_t$  nas amostras em que foram empregadas tensões axiais de 220 e 570kPa, e que utilizaram o CA como solução de revestimento. Já para as amostras em que foi utilizada a solução de TSS somente na amostra em que não foi empregada tensão axial o valor se aproximou da curva ensaiada pelo mesmo autor, para as mesmas condições de ensaio. Tal fato pode ser explicado talvez pela modificação realizada no dispositivo a fim de reduzir o atrito entre peças e pelo fato da tensão axial aplicada ter sido controlada no momento da realização do ensaio de forma direta, através de um macaco hidráulico que foi aferido por um prensa calibrada. Entretanto, embora haja diferença entre os valores o fato é de que a aderência medida pelos autores e a obtida nessa

pesquisa ficaram mais próximas a indicação da condição não aderida, validando assim a resposta obtida a partir do método empregado.

Figura 57 – Comparativo entre valores de  $K_t$  obtidos e os limites de referências



### 5.5.3 Influência da aderência no comportamento da estrutura do pavimento

Para avaliar qual a influência que a aderência tem na resposta estrutural do pavimento foram feitas simulações no software de análises AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) versão 2.4.6 (abril/2023) vinculado ao MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), onde foram estabelecidos os seguintes parâmetros, mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros dos materiais utilizados na simulação da estrutura

Tipo de Material	MR (MPa)	Espessuras adotadas (cm)
Concreto Asfáltico	4500	5
Tratamento Superficial (Cape Seal)	1000	2
Base Granular	600	20
Sub-base Granular	400	20

Fonte: Próprio Autor (2024)

Foram avaliadas duas condições para cada estrutura Revestimento Asfáltico/Base Granular, uma considerando aderência nula e outra condição com o nível de aderência

encontrado através dos ensaios de ruptura realizados com cada amostra ensaiada levando em consideração a aplicação da tensão normal próxima da pressão aplicada pelo eixo padrão rodoviário (cerca de 550kPa). Para fins de comparação foi também simulado uma estrutura na condição de aderência plena, onde, foram calculados valores de  $l_i$  a partir dos valores de  $K_t$  (Equação (11)) obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, o  $l_i$  que é um parâmetro adimensional inserido no AEMC e que assume valores entre 0 e 1, indicando aderência nula quando seu valor é 0 e aderência total quando seu valor é 1.

$$K_t = \frac{l_i}{1 - l_i} \quad (11)$$

Foram inseridos no programa as espessuras das camadas, os conjuntos de MR, o carregamento do eixo padrão, um eixo simples de rodas duplas com 80 kN de carga e pressão de inflação dos pneus de 550kPa, e os pontos de análise. Tais pontos foram dispostos no fundo do revestimento, de 5,01 cm a partir do topo do revestimento para a configuração que utiliza o CA como solução de revestimento (Figura 58), e de 2,01 cm para a solução adotada em *Cape Seal* (Figura 59), longitudinalmente à via no centro do eixo e transversalmente à via, em pontos a 0,00, 2,00, 4,00, 6,24, 7,50, 10,80, 11,60 e 17,00 cm do centro do semieixo.

Figura 58 – Simulação da estrutura com CA na condição de aderência nula

AEMC v.2.4.6 (abr/2023)

Projeto Ajuda

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm <sup>3</sup> )	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5	2,4	LINEAR	4500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0
2	20	1,8	LINEAR	600	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	0
3	20	1,6	LINEAR	400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0
4	0,0	1,6	LINEAR	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,45	0

Tipo de carregamento:

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Eixo padrão rodoviário  
 Eixo simples  
 Dois eixos simples (direcional)  
 Eixo duplo  
 Dois eixos duplos  
 Dois eixos duplos em tandem  
 Três eixos duplos em tandem

Análise: Semi-eixo  
 Número de rodas: 2  
 Carga do semi-eixo (ton): 4,10  
 Carga de roda (ton): 2,05  
 Pressão de pneus (MPa): 0,56  
 Ty (cm): 0,00  
 Tx (cm): 32,40  
 Lx (cm): 181,00  
 Área (cm<sup>2</sup>): 366,07  
 Raio (cm): 10,79

Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)
1	0	0	5,01	0,00000	0,00000	624,0
2	2	0	5,01	-1,09961	0,00000	625,3
3	4	0	5,01	-2,70214	0,00000	629,1
4	6,24	0	5,01	-5,68759	0,00000	635,2
5	7,5	0	5,01	-8,06927	0,00000	638,5
6	10,8	0	5,01	-16,43552	0,00000	643,6
7	11,6	0	5,01	-18,81224	0,00000	643,8
8	17	0	5,01	-36,53782	0,00000	630,0
9	20	0	5,01	-46,27692	0,00000	610,7
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Fonte: Próprio Autor (2024)

Figura 59 – Simulação da estrutura com Cape Seal na condição de aderência nula

AEMC v.2.4.6 (abr/2023)

Projeto Ajuda

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm <sup>3</sup> )	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	2	2,4	LINEAR	1000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0
2	20	1,8	LINEAR	600	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0
3	20,0	1,6	LINEAR	400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0
4	0,0	1,6	LINEAR	200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0

Tipo de carregamento:

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Eixo padrão rodoviário  
 Eixo simples  
 Dois eixos simples (direcional)  
 Eixo duplo  
 Dois eixos duplos  
 Dois eixos duplos em tandem  
 Três eixos duplos em tandem

Análise: Semi-eixo  
 Número de rodas: 2  
 Carga do semi-eixo (ton): 4,10  
 Carga de roda (ton): 2,05  
 Pressão de pneus (MPa): 0,56  
 Ty (cm): 0,00  
 Tx (cm): 32,40  
 Lx (cm): 181,00  
 Área (cm<sup>2</sup>): 366,07  
 Raio (cm): 10,79

Pontos de análise e resultados

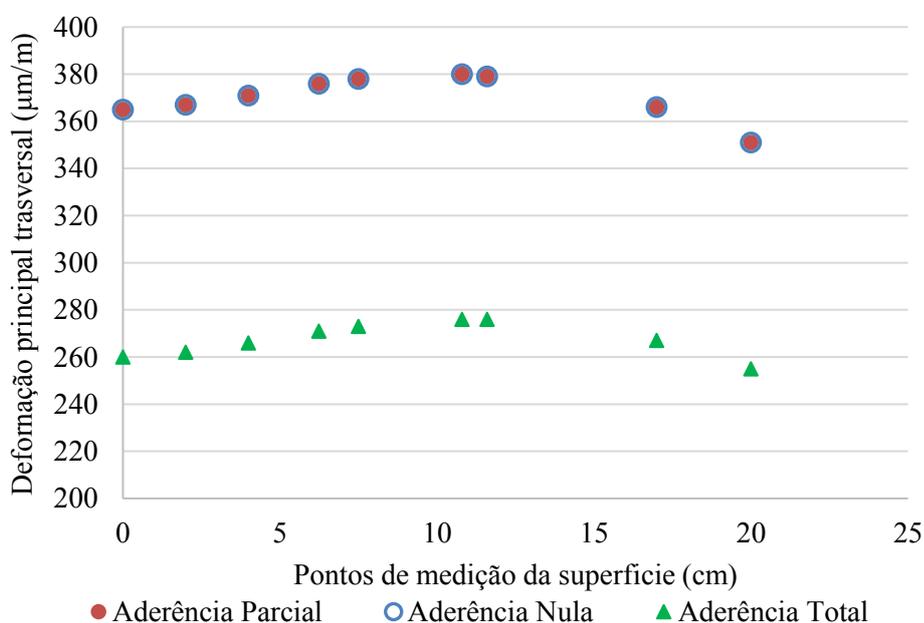
Calcular Ferramentas >>

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)
1	0	0	2,01	0,00000	0,00000	353,0
2	2	0	2,01	1,62184	0,00000	356,3
3	4	0	2,01	2,76674	0,00000	368,1
4	6,24	0	2,01	2,19348	0,00000	392,9
5	7,5	0	2,01	0,77897	0,00000	405,2
6	11,6	0	2,01	-7,09330	0,00000	422,6
7	17	0	2,01	-18,67278	0,00000	415,5
8	20	0	2,01	-25,06801	0,00000	400,6
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Fonte: Próprio Autor (2024)

A partir das simulações realizadas foi verificado que as deformações específicas no eixo transversal ao carregamento, que indicaria a movimentação da interface devido a tensão aplicada pela ação do tráfego, mostra que a variação média desse parâmetro, para as amostras com CA é pouco significativa. Ao se comparar os resultados obtidos nas simulações realizadas considerando a aderência na condição nula e com aderência parcial da interface revestimento-base granular, obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, observam-se valores na ordem da oitava casa decimal, mostrando-se pouco expressivos (Figura 60).

Figura 60 – Deformações principais específicas da solução com CA em diferentes condições de aderência



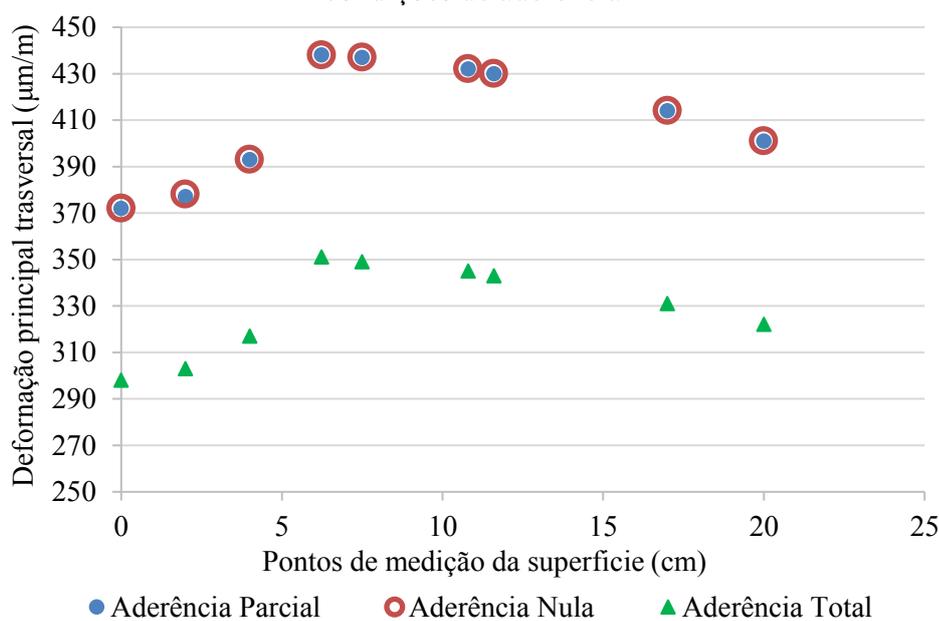
Fonte: Próprio Autor (2024)

Observa-se que para os ensaios realizados todas as amostras simuladas demonstraram um comportamento mais aproximado da condição não aderida, independentemente do nível de aderência inserido na simulação. Acredita-se que isso se deu em função da baixa deformação percebida e relatada por alguns autores (SCHERER, 2018; TORQUATO E SILVA, 2017; KRUNTCHIEVA *et al.*, 2005 e UZAN *et al.*, 1978).

Ao se avaliar, segundo o mesmo critério, nas amostras que usaram o *Cape Seal* como solução de revestimento, verificou-se uma diferença muito menor do que nas amostras que usaram o CA ( $\sim 6,0E-09$ ), ou seja, praticamente não houve diferença nas deformações transversais, que de tão pequenas se sobrepuseram quando se comparou na simulação as condições de aderência nula com a condição aderida parcialmente, esse comportamento não era

esperado. Acreditava-se que, por se tratar de uma solução de revestimento mais delgado (< 3cm) a imprimação produziria uma condição de aderência mais resistente do que na condição de aderência nula. No entanto, não observou-se redução nas deformações transversais durante as simulações, mostrando que a presença da imprimação parece não favorecer um aumento de resistência significativo para a condição avaliada, como pode ser visto na Figura 61.

Figura 61 – Deformações principais específicas da solução com *Cape Seal* em diferentes condições de aderência



Fonte: Próprio Autor (2024)

## 5.6 Considerações finais

Resumidamente, neste item foram apresentados os materiais, o programa experimental que foi utilizado, bem como os ensaios realizados para avaliar a interface entre a base granular e as soluções de revestimentos, a partir dos ensaios de cisalhamento direto. Com esse ensaio foi possível extrair dados da resistência máxima de cisalhamento *versus* o deslocamento sofrido possibilitando se chegar no módulo de reação transversal. Onde, a partir dos dados gerados conseguiu-se simular a estrutura através do software AEMC e extrair o resultado da análise estrutural do pavimento, as deformações transversais na interface. Dessa forma, foi estabelecido um entendimento mais plausível sobre o papel da imprimação como agente de aprimoramento da resistência na interface entre a base e o revestimento asfáltico.

## **6 CONCLUSÕES**

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho com as principais impressões e contribuições da pesquisa desenvolvida, bem como as sugestões para continuidade da pesquisa a fim de ampliar os conhecimentos sobre o tema.

### **6.1 Principais contribuições da pesquisa**

O objetivo principal desta pesquisa foi o de contribuir com o novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos por meio da investigação do comportamento da interface entre bases imprimadas e revestimentos, de forma a propor parâmetros, em laboratório e no campo, para melhorar a qualidade e análise desse serviço. Contudo, acredita-se que esse objetivo tenha sido atingido visto que além da recomendação dos outros parâmetros de avaliação da imprimação que não apenas a penetração, foram propostos também os métodos e limites aceitáveis obtidos e validados ao longo de toda esta pesquisa com uso de diversos tipos de ligantes e diferentes materiais de base e de revestimento através de um processo fundamentado nas normativas vigentes e uma vasta literatura pesquisada.

### **6.2 Contribuições secundárias da tese**

No primeiro artigo foram definidos valores propostos como aceitáveis para os ensaios de laboratório que avaliam os parâmetros de taxa de ligante, coesão, aderência, desgaste, emissões e interface da base imprimada. Com base nesses ensaios foi possível hierarquizar fluídos para imprimação onde alguns desses apresentaram um comportamento igual ou até melhor do que o ligante de referência. Assim, foi possível inferir que os protocolos de avaliação propostos e os valores limites indicados como aceitáveis refletem bem o comportamento esperado de um fluído aplicável em serviços de imprimação betuminosa de rodovias e servem ainda para avaliar novos que ligantes que venham a ser produzidos.

No que se refere ao segundo artigo, buscou-se aqui deixar uma contribuição técnica, através da produção de um manual de melhores práticas (ver todos os detalhes no apêndice A) em serviços de imprimação e cinco normas de avaliação da imprimação segundo os parâmetros de taxa de ligante, coesão, aderência, desgaste superficial e interface da base imprimada. Essas proposições de norma buscaram preencher as lacunas observadas nas normas vigentes pesquisadas, tais como: cuidados com o preparo da base antes da aplicação do fluído

imprimante; cuidados após a aplicação do fluido imprimante; estabelecimento de protocolo para determinação da taxa de aplicação do fluido imprimante; medição da coesão superficial da base imprimada, definindo assim o tempo de cura da imprimação; aferição da aderência da base imprimada e desgaste superficial da imprimação.

No caso das emissões, não é possível ainda propor uma norma de avaliação desse parâmetro no âmbito da obra. Haja vista que tal parâmetro se enquadra em uma etapa de desenvolvimento de produto e, por ser um processo puramente industrial não foi possível indicá-lo como procedimento padrão para a avaliação de emissões em fluídos de imprimação.

Através do terceiro artigo foi possível entender melhor o comportamento da base imprimada e qual sua contribuição para o ganho de resistência da interface frente a um parâmetro definido ainda no laboratório que é a resistência ao cisalhamento transversal da interface, o que contribui para o refinamento do novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos por meio de um melhor compreensão do comportamento da interface entre bases imprimadas e revestimentos, ainda que, essa seja uma variável desafiadora de ser obtida por conta dos vários tipos de materiais utilizados e dos diferentes métodos envolvidos no processo construtivo. Entretanto, a busca por formas mais adequadas de avaliação, que venham a corroborar com os efeitos reais da interface do pavimento em serviço, como efeitos de descolamentos e defeitos relativos à falha da imprimação asfáltica em rodovias ocorrentes precisam continuar sendo investigadas. Contudo, foram elencadas a seguir outras percepções sobre a pesquisa realizada:

### ***6.2.1 Quanto à taxa de aplicação da imprimação***

Verificou-se que a metodologia para a determinação da taxa de aplicação do ligante asfáltico em laboratório para uso em serviço de imprimação e que considerou as variáveis de umidade de compactação, umidade da base no momento da imprimação, limpeza prévia do local a ser realizado o serviço de imprimação, irrigação prévia, temperatura do ligante no momento da aplicação, isolamento do local do serviço (sem tráfego nas primeiras 24 horas), tempo de cura do ligante, se mostrou adequada e confiável como forma de adequar os materiais de base e ligantes disponíveis, a fim de conferir o comportamento adequado da base imprimada.

Assim, foi possível indicar o comportamento dos fluídos imprimantes testados na pesquisa, bem como classificá-los sob a ótica do parâmetro da penetração, estabelecendo como faixa aceitável a medida entre 4 e 13mm de penetração. Contudo, entende-se que medir a penetração do ligante na base apesar de não garantir um comportamento adequado frente aos

outros parâmetros avaliados (coesão, aderência e desgaste superficial), é um parâmetro inicial indispensável na avaliação do serviço de imprimação.

### ***6.2.2 Quanto à coesão da imprimação***

Visando estabelecer o tempo de cura que a imprimação necessita antes da aplicação do revestimento asfáltico o ensaio atingiu seu objetivo, de indicar o tempo de cura mínimo segundo o critério estabelecido, de 10kgf/cm, para a imprimação com base nas variáveis: tipo de solo da base; tipo de fluido imprimante e taxa de imprimação. Com o método foi possível otimizar os recursos disponíveis já que a quantidade de solo e fluido imprimante foi bem reduzida, cerca de 50 g de solo e 2 ml de fluido, em média. A medida que, com a possibilidade de um método que ateste a cura da imprimação será possível ter maior confiabilidade nesse serviço, reduzindo assim prováveis erros decorrentes do processo construtivo.

Observou-se que a coesão não possui uma relação direta com a penetração, e que a coesão sofre maior influência pela variação da umidade da base que mostrou uma tendência de crescimento à medida que o solo estava mais seco. Acredita-se que conforme a taxa de ligante aumentou um filme betuminoso residual se formou na superfície dos corpos de prova favorecendo assim o aparecimento de exsudação, esse comportamento foi melhor observado ao passo que o solo se encontrava mais úmido e em taxas maiores de aplicação, reforçando a ideia de que a coesão sofre influência da variação de umidade diretamente.

Assim, verificou-se que a coesão é proporcionada pela união da coesão natural do solo e do acréscimo de coesão fornecido pela imprimação após sua cura e que esse parâmetro é suscetível às variações de umidade (mesmo dentro do limite de - 2% até + 1% preconizado pela norma DNIT 141 (2010) como aceitável) e taxa de aplicação do ligante. Sendo, portanto, um importante parâmetro a ser avaliado em serviços de imprimação betuminosa.

### ***6.2.3 Quanto à aderência da imprimação***

Sobre o ensaio de aderência por meio do arrancamento por torção (adaptado por Almeida, 2017) utilizado nesta pesquisa para avaliar ligantes para imprimação betuminosa, pode-se afirmar que tal parâmetro se mostrou promissor como tentativa de avaliar o comportamento mecânico da base imprimada por se tratar de um ensaio de fácil execução, ainda que necessite de valores de referência que atestem o comportamento satisfatório da base imprimada.

Nesse sentido, foi possível atestar que o valor de 34 kgf.cm (cerca de 200kPa) de torque mínimo indicado por Almeida (2017) atendeu as expectativas quanto à aderência da base imprimada. Vale salientar que o valor indicado como aceitável é uma média dos valores obtidos com o ligante de referência (CM-30) e verificado por outros autores em estudos de aderência de camada imprimada.

#### **6.2.4 Quanto ao desgaste WTAT e LWT da base imprimada**

O ensaio WTAT conseguiu mostrar os possíveis efeitos provocados na base imprimada quando da liberação momentânea do tráfego, o desgaste superficial acontece após a cura do ligante, contudo, observou-se que se a base imprimada não estiver curada poderão ocorrer escorregamentos da peça de abrasão passando uma falsa percepção de baixo desgaste. Isso se deve, por conta da não observância à taxa de aplicação do ligante, já que o excesso de ligante na superfície da base imprimada dificulta sua cura, reduz a penetração e aumenta os custos por causa do uso de ligante em excesso e que não vai ser absorvido pela base e que acabará sendo retirado e descartado.

Através do ensaio de LWT foi possível inferir a resistência oferecida pela base imprimada através do endurecimento da base, isso foi constatado pela medição do ATR no ensaio, na tentativa de se aproximar daquele medido em campo durante a liberação momentânea do tráfego antes da aplicação do revestimento, reforçando a necessidade de se medir o atributo de endurecimento da superfície da base conferido pela aplicação da imprimação. Contudo, o ensaio merece atenção, principalmente durante o processo de moldagem dos CPs pois deve-se aguardar a secagem de 50% da umidade de moldagem do material de base antes da imprimação, para garantir uma melhor recepção do ligante imprimante pelo material de base. Foi possível ver ainda que em ambos os ensaios (WTAT e LWT) foi notório a sensibilidade a variações de taxa e umidade do material (mesmo dentro do limite de - 2% até + 1% preconizado pela norma DNIT 141 (2010) como aceitável).

A metodologia também indica que se tenha atenção na hora da moldagem dos CPs, para o atingimento da densidade aparente seca máxima do material durante a moldagem dos CPs e assim evitar desgastes acentuados por conta do grau de compactação inadequado. As modificações propostas no método de verificação da abrasão WTAT não geraram inconsistências nos resultados, pois os resultados ruins no ensaio de abrasão WTAT (desgastes acima de 538,0 g/m<sup>2</sup>), foram corroborados pela desaprovação dessas amostras à luz de outros

parâmetros, como: excesso de taxa do ligante, baixa coesão ( $< 10 \text{ kgf.cm}$ ) e aderência insuficiente ( $< 34 \text{ kgf.cm}$ ).

Foi possível observar ainda que as modificações no ensaio de avaliação do ATR para bases imprimadas, se aproxima mais da realidade da imprimação, sendo indicada para esse fim. E que a avaliação objetiva feita através das medidas de afundamento no decorrer do ensaio produz resultados de forma direta dando a real percepção do comportamento da base imprimada a partir da evolução do tráfego, que é traduzida pelo número de passadas da roda do LWT. Apesar das modificações para adequação à realidade encontrada na superfície imprimada, como a supressão do ensaio de adesão de areia que não foi aplicada à técnica da imprimação, o ensaio cumpriu ao seu propósito de ranquear os fluídos imprimantes quando avaliados em uma mesma condição de ensaio (mesmo tipo de base, fluído imprimante e taxa de aplicação).

#### ***6.2.5 Quanto às modificações do dispositivo de ensaio***

O sistema adotado inicialmente para a aplicação do carregamento axial, que fazia uso de uma mola para conferir a aplicação da força normal no CP foi melhorado, através da inserção do macaco hidráulico aferido em uma prensa calibrada foi possível medir com exatidão a força que estava sendo aplicada no corpo de prova, dado o grau de ajuste alcançado com a modificação feita, tornando-o portanto mais preciso e conferindo-lhe maior confiabilidade nos resultados. Isso só foi viável devido a segunda modificação realizada, que foi a utilização de um apoio deslizante montado sobre rolamentos que tornou o atrito entre as peças desprezível, ajudando a evitar possíveis torções no conjunto durante o ensaio.

#### ***6.2.6 Quanto às soluções de revestimento utilizados***

A utilização de uma solução de revestimento esbelto, trouxe uma compreensão mais razoável sobre a contribuição da imprimação na resposta estrutura do pavimento, já que os valores encontrados mostraram que em uma estrutura que possui um revestimento esbelto ocorrem menores valores de resistência ao cisalhamento na interface dado à pouca robustez oferecida pelo conjunto, essa tendência foi observada quando comparou-se as amostras que utilizaram CA, incluindo os resultados de pesquisas anteriores, com àquelas que fizeram uso do *Cape Seal*, ao passo que nas amostras com *Cape Seal* os valores de resistência ao cisalhamento sob as mesmas condições de contorno se mostraram essencialmente menores.

Entretanto, os valores do módulo de reação transversal, que combina essa resistência máxima suportada ao deslocamento sofrido da interface durante o carregamento, em ambas as amostras, tanto nas que usaram CA quanto nas com o *Cape Seal*, apresentaram um comportamento que se assemelha a condição mais próxima da aderência nula. Em função disso, foi possível entender que mesmo a imprimação cumprindo seu papel, atestado pela conferência dos parâmetros discutidos nesta pesquisa, não é capaz de assegurar melhoria de aderência na interface quando uma estrutura esbelta é submetida às condições mais severas de carregamento.

### **6.2.7 Quanto às condições de interface encontradas**

Foi possível através do ensaio melhorado se obter o módulo de reação transversal e assim simular o efeito deste na resposta estrutural do pavimento contribuindo para o entendimento de qual parcela de fato compete a interface, objetivando entender melhor o mecanismo de dano causado pela falta de aderência na camada de revestimento e na própria interface. Portanto, a condição de aderência que foi obtida variou com o uso dos diferentes revestimentos, mas ao mesmo tempo, não foi percebido que essa variação foi suficiente para realmente se aproximar do comportamento de aderência plena. Por certo, o que se experimentou foi a existência de uma contribuição da imprimação na resistência presente na interface, mas que ainda é de difícil dissociação frente à outras variáveis, como tipo de revestimento e espessuras utilizadas. No entanto, considera-se que as contribuições fornecidas por esta pesquisa esclareceram certos aspectos e levantaram mais questões e oportunidades para futuras pesquisas, as quais conduzem a um aprimoramento da pesquisa, tornando sua continuidade mais desafiadora.

### **6.3 Sugestões para futuras pesquisas**

Contudo, diante do exposto, incentiva-se mais estudos que possam aprofundar o tema no que diz respeito a ampliação de amostras com diferentes situações de interface, quais sejam: combinar o uso de da imprimação com a pintura de ligação; utilizar outros fluidos de imprimação; fazer uso de outros tipos de materiais de base granular e bases estabilizadas; realizar ensaios em diferentes temperaturas.

No que compete as soluções de revestimento asfáltico, avaliar seu comportamento frente a variação de espessuras e tipos de revestimentos empregados e de soluções conjuntas, como: revestimentos sobre tratamentos superficiais; com uso de geotêxteis para o propósito de

melhoramento da aderência na interface; bem como o efeito das intempéries no processo de dano da interface.

Em termos de ensaio; elaborar protocolos de verificação dos parâmetros estabelecidos nesta pesquisa para a avaliação da imprimação em campo propondo especificações de serviço; incentivar o desenvolvimento de novos fluidos de imprimação que sejam menos poluentes; promover a prática do ensaio dinâmico para buscar entender melhor a evolução do dano provocada na interface e qual sua contribuição para a estabilidade estrutural do pavimento.

## REFERÊNCIAS

AEMA, **Asphalt Emulsion Manufacturers Association -A Basic Asphalt Emulsion Manual**. Manual Series No. 19 (MS-19), Third Edition, The Asphalt Institute, Lexington – KY - 2019.

ABNT NBR NBR13528-3, **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração Parte 3: Aderência superficial** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas - 2019

ABNT NBR 14746, **Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica - Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT)**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comissão de Estudo de Asfalto - 2014.

ABNT NBR 14841, **Microrrevestimentos a frio - Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina (LWT)**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comissão de Estudo de Asfalto - 2015.

AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. **Pavimentação – Especificação de Serviço – Imprimação**. AGETOP – PAV 07/2019.

ALMEIDA, F. D.; LIMA FILHO, S. A. R.; BARROSO, S. H. A.; BASTOS, J. B. S. **Desenvolvimento de um método expedito para avaliação da imprimação betuminosa de rodovias**. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 21º Encontro de Asfalto - IBP357\_14, 2014.

ALMEIDA, F. D.; BARROSO, S. H. A. **Desenvolvimento de um método expedito para avaliação da imprimação betuminosa de rodovias**. Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto – 0264, Bariloche, Argentina, 2015.

ALMEIDA, F. D.; TORQUATO e SILVA, S. A.; BARROSO, S. H. A.; SOARES, J. B., **Aplicação do Ensaio de Arrancamento por Torção para Avaliação da Aderência de Bases Imprimadas**. XXX Congresso ANPET 2016, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2016

ALMEIDA, F. D.; BARROSO, S. H. A, **Avaliação Da Coesão Da Imprimação Betuminosa De Rodovias**. Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto – 0144, Medellin, Colômbia, 2017

ASFALT INSTITUTE **Construction of Hot Mix Asphalt Institute, Manual Series n°224 (MS-22)**. Second Edition. The Asphalt Institute, Lexington - KY, 2001.

ASTM D8-02 **Standard Terminology Relating Materials for Roods and Pavements**. Annual Book of ASTM Standards 2003, Section 4: Construction, Vol.04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken - P.A, 2003.

BAE, Abraham; MOHAMMAD, Louay N.; ELSEIFI, Mostafa A.; BUTTON, Joe; PATEL, Nachiketa. **Effects of Temperature on Interface Shear Strength of Emulsified Tack Coats and Its Relationship to Rheological Properties**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 2180, n. 1, p. 102-109, jan. 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2180-12>.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro-RJ: Petrobras: ABEDA, 2010.

BOCZKAJ, G.; PRZYJAZNY, A.; KAMIN, M. **Chemosphere Characteristics of volatile organic compounds emission profiles from hot road bitumens**. *Chemosphere* v. 107, p. 23–30, 2014.

BOUSSINESQ, J. V. **Application des potentiels à l'étude de l'Equilibre et du Movement des Solides Elastiques**. Paris: Gualtier-Vilars, 1885.

BURMISTER, D. **The theory of stresses and displacement systems and applications to the design of airport runways**, 1943.

CANESTRARI, F.; FERROTTI, G.; PARTL, M. N.; SANTAGATA, F. A. **Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance**. *Transport Research Record* 1929, pp. 68-78, 2005.

CARGNIN, R. S.; NASCIMENTO, P. C.; FERRAZ, L. M.; BARRICHELLO, M. M.; BRUDI, L. C.; ROSA, M. B.; CARVALHO, L. M.; NASCIMENTO, D. B.; CRAVO, M. C.; NASCIMENTO, L. A. H. **Investigation of extraction and collection of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solutions at different temperatures**. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10406638.2017.1353529>.

CASTRO, C. A. A., **Estudo da técnica de anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego**. Tese de M. Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2003.

CHEN, J. S.; HUANG, C. C., **Effect of Surface Characteristics on Bonding Properties of Bituminous Tack Coat**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2180, pp142-149, 2010. *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington - D.C.

COLLINS, C. H.; BRAGA, G. L.; BONATO, P. S. **Fundamentos de cromatografia**. In: *Fundamentos de cromatografia*. p. 453-453, 2006.

COLLOP, A. C.; THOM, N. H.; SANGIORGI, C.. **Assessment of bond condition using the Leutner shear test**. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Transport*, [s.l.], v. 156, n. 4, p.211-217, nov. 2003. Thomas Telford Ltd.. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/tran.2003.156.4.211>.

COLLOP, A. C.; SUTANTO, M. H.; AIREY, G. D.; ELLIOTT, R. C. **Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores**. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 23, n. 6, p.2251-2258, jun. 2009. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.017>.

CORRÊA, F. C. **Comportamento de Trechos Experimentais com Bases de Solo Arenoso Fino**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, SP, 1975.

CROSS, S. A.; SHRESTHA, P. P., **Guideline for using prime and tack coat**. Central Federal Lands. Lakewood Highway Division. Report n° FHWA-CFL/TD-05-002.

DANTAS, J. M. **Tratamentos contra o pó, imprimações, pinturas de ligação, tratamentos superficiais, macadames betuminosos**. Curso de Especialização Rodoviária. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1959.

DAS, R.; MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M.; CAO, W.; COOPER, S. B., **Effects of Tack Coat Application on Interface Bond Strength and Short-Term Pavement Performance**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 2633, n. 1, p. 1-8, jan. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2633-02>.

DESTRÉE, A.; VISSCHER, J. de. **Impact of tack coat application conditions on the interlayer bond strength**. European Journal Of Environmental And Civil Engineering, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 3-13, 23 fev. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1285252>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT ES-144 **Pavimentação - Imprimação com ligante asfáltico**. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. IPR 719 Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

DUQUE NETO, F. S. **Proposição de metodologia para escolha de solo e dosagem de Antipó com emulsão de xisto**. Dissertação de M. Sc. Programa de Engenharia Civil, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

FAN, L.; YI, J.; FENG, Y.; FENG, D., **Investigation of the Shear Behavior between Layers of Foamed Asphalt Cold-Recycled Pavement**. Journal Of Materials In Civil Engineering, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 04021050, abr. 2021. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003659](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003659).

FERNANDES, P. R. N.; CAVALCANTE, R. M.; SOARES, J. B. **Avaliação da presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) em ligante asfáltico Brasileiro**. In 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Campinas, ABPG, 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Guidelines for using prime and tack coats**. Publication n° CFL/TD-05-002, Lakewood, 2005.

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfáltico**: Manual de utilização do programa MeDiNa. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2020. 78 p.

FREDLUND, D; MORGENSTEN, N. **Stress State of Variables for Unsaturated Soils**. Journal of Geotechnical Engineering Division. v. 103, n. 5, p. 447 - 466, maio de 1977.

GODOI, L. **Estudo do comportamento dos ligantes asfálticos utilizados na imprimação**

**asfáltica relacionados à emissão de VOC's.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais - PIPE. Curitiba - PR, 2011.

GOODMAN, R.; TAYLOR, R.; BREKKE, T. **A model for the mechanics jointed rock.** Transportation Research Board, 637-659, 1968.

GOMES, A., SILVA, P., & MENDES, J. (2022). **Recycled pavement layers and shear resistance:** A sustainable approach. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2676(4), 345-359.

GRIFFITH, A. A. **The Phenomena of Rupture and Flow in Solids.** Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, [s.l.], v. 221, n. 582-593, p.163-198, 1 jan. 1921. The Royal Society. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.

GUIMARÃES, P. A. **Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 2013.

HOLANDA, A. S.; PARENTE Jr., E.; ARAÚJO, T. D. P.; MELO, L. T. B.; EVANGELISTA Jr., F. e SOARES, J. B. **Finite Element Modeling of Flexible Pavements.** XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Belém, Pará. 2006.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design.** 2.ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River - NJ - USA, 2004.

HUANG, W.; LV, Q.; TIAN, J. **Effects of Tack Coat Type and Surface Characteristics on Interface Bond Strength.** New Frontiers In Road And Airport Engineering, [S.L.], p. 25-33, 19 out. 2015. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784414255.004>.

HU, X.; WALUBITA, L. F. **Effects of Layer Interfacial Bonding Conditions on the Mechanistic Responses in Asphalt Pavements.** Journal Of Transportation Engineering, [s.l.], v. 137, n. 1, p.28-36, jan. 2011. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000184](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000184).

ISHAI, I.; LIVNEH, M., **Functional and Structural Role of Prime Coat in Asphalt.** Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, Scottsdale - AZ, 1984.

KULKARNI, M. B. **Effect of Tack and Prime Coats, and Baghouse Fines on Composite Asphalt Pavements. Thesis (Ph.D.)** - North Carolina State University, 2005. Disponível em: <<http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/3269>> Acesso em 25/02/2021.

KRUNTCHEVA, M. R.; COLLOP, A. C.; THOM, N. H. **Effect of Bond Condition on Flexible Pavement Performance.** Journal Of Transportation Engineering, [s.l.], v. 131, n. 11, p.880-888, nov. 2005. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2005\)131:11\(880\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2005)131:11(880)).

LAMBE, T. W; WHITMAN, R. **Soil Mechanics.** 2.ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1995

LARSEN, J. **Tratamento Superficial na Conservação e Construção de Rodovias**. 3ª edição. Rio de Janeiro - RJ, 1992.

LHERUS, J. (2020). **Influence of binder quality on shear resistance in road pavements**. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 11(4), 78-90.

LI S.; LIU X; LIU Z. **Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement**, *Construction and Building Materials* 68 (2014) 341–347, June 2014, School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China

MANTILLA, C. A.; BUTTOM J. W. **Prime coat method sand material store place cutback asphalt**. Research Report TTI 0-1334, Texas Transportation Institute Texas A&M University, 1994.

MORAES, R.; VELASQUEZ, R.; BAHIA, H. U. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2209, Transportation Research Board of the National Academies, Washington - D.C., pp. 70-81, 2011.

MOHAMMAD, L. N.; RAQIB, M. A.; HUANG, B. **Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strenght**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1789, pp56-65. Transportation Research Board of the National Academies, Washington - D.C., 2002.

MULLINS, C. E.; MacLEOD, D. A.; NORTHCOTE, K. H.; TISDALL, J. M.; YOUNG, I. M. **Hard setting soils: Behavior, occurrence and management**. *Adv. Soil Sci.*, 11:37-108, 1990.

NASCIMENTO, M. V. *et al.* **Investigation of the adhesion conditions of the micro-surfacing applied on asphalt concrete**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, p. e02155, 1 jul. 2023.

OUYANG J.; SUN Y.; ZAREI S. **Fabrication of solvent-free asphalt emulsion prime with high penetrative ability**. School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China, 2020.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo. USP/ESALQ, 1989.

POPOV, E. P. **Introdução à Mecânica dos Sólidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1978.

POŚNIAK, M. **Polycyclic aromatic hydrocarbons in the occupational environment during exposure to bitumen fumes**. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 14, n. 6, p. 809–815, 2005.

RAAB, C.; GRENFELL, J.; HALIM, A. O. A. ; PARTL, M. N. **Comparison of Interlayer Bond Behavior Due to Ageing**. *Rilem Bookseries*, [S.L.], p. 323-334, 30 ago. 2015. Springer Netherlands. [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3\\_26](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_26).

RABELO, A. N. **Contribuição ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias do estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2006.

RAMALHO, R. W. **Avaliação em laboratório da utilização de emulsão com óleo de xisto na imprimação de solos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO. Ouro Preto - MG, 2011.

RAPOSEIRAS, A.C.; CASTRO-FRESNO, D.; VEGA-ZAMANILLO, A.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J., **Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 43, p. 372-381, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.011>.

ROMANOSCHI, Stefan A.; METCALF, John B., **Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 1778, n. 1, p. 132-139, jan. 2001. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/1778-16>.

SANT'ANA, W. C. (2009) **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

SANTIAGO, L. S. **Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2017. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SCHREINER, C. A. **Review of mechanistic studies relevant to the potential carcinogenicity of asphalts**. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, v. 59, n. 2, p. 270–284, mar. 2011.

SHAFABAKHSH, G.; AHMADI, S., **Influences of Surface Characteristics and Modified Asphalt Binders on Interface Shear Strength**. International Journal Of Engineering, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 805-812, jun. 2019. International Digital Organization for Scientific Information (IDOSI). <http://dx.doi.org/10.5829/ije.2019.32.06c.02>.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS – SOP-CE. **Informativo gerencial 2023**. Fortaleza, CE, 2023. Disponível em: < <https://www.sop.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2023/04/ARQUIVO-INFORMATIVO-2023-FINAL-3.pdf>>.

SENADHEERA S.; VIGNARAJAH M. **Design and Construction Guide for Surface Treatments over Base Courses**. Center for Multidisciplinary Research in Transportation (TechMRT) Research Project Number: 0-5169 Research Project Title: Constructability Review of Surface Treatments Constructed on Base Courses, USA, 2007.

SCHERER, R. G. **Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico**. 2018. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SCHERER, R. G.; DA SILVA PEREIRA, D.; PIVOTO SPECHT, L.; DOTTO BUENO, L. **Avaliação laboratorial da condição de aderência entre base granular e concreto asfáltico**. TRANSPORTES, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 2725, 2022. DOI: 10.14295/transportes.v30i3.2725. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2725>. Acesso em: 17

jul. 2024.

SILVA, R. C. (2012) **Estudo sobre a aplicação de emulsões de cera de carnaúba e LCC na imprimação betuminosa de pavimentos rodoviários**. Encontros Universitários da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE - 2012.

SISTEMA NACIONAL VIÁRIO - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - SNV-DNIT **Relatório da malha de atuação do DNIT**, 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 17/06/2016.

SMITH, D., TAYLOR, R., & WANG, J. (2021). **Advanced laboratory testing methods for evaluating interlayer shear strength**. International Journal of Pavement Engineering, 22(6), 563-575.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS – SOP Informativo gerencial do estado das rodovias do estado do Ceará – 2023, Fortaleza – CE

SUFIAN, A. A.; SWIERTZ, D.; BAHIA, H. U.; MOHAMMAD, L.; AKENTUNA, M.. **Factors Affecting the Interlayer Shear Strength of Laboratory and Field Samples**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 2675, n. 4, p. 234-244, 7 dez. 2020b. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0361198120975414>.

VAM DAM, T.; KIRCHNER, K.; SHAHIN, M.; BLACKMON, E. W. **Consequence of Layer Separation on Pavement Performance**, Report DOT/FAA/PM-86/48. US. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington - D.C., 1987.

VASCONCELOS, M. A. G. **Primeiro estudo da aplicação de biodiesel como material alternativo para a imprimação betuminosa de pavimentos rodoviários**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2009.

VILLIBOR, D. F. **Pavimentos Econômicos – Novas considerações**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 224p., 1981.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; FABBRI, G. T. P. **Imprimadura asfáltica em bases de Solo Arenoso Fino Laterítico**. Anais da XV Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis - SC, 1989.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. S.; SERRA, P. R. M.; NETO, A. Z. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas - 2ª edição**, São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

TASHMAN, L.; NAM, K.; PAPAGIANNAKIS, T. **Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers**. Washington Center For Asphalt Technology, Pullman, v. 01, n. 01, p.1-91, ago. 2006.

THE ASFALT INSTITUTE **Construction of Hot Mix Asphalt Institute, Manual Series n°224 (MS-22)**. Second Edition. The Asphalt Institute, Lexington - KY, 2001.

TORQUATO e SILVA, S. A.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. **Influência da aderência na**

**análise de pavimentos asfálticos.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 44., 2015, Foz do Iguaçu. Anais. . Foz do Iguaçu: RAPV, p. 1 – 13, 2015.

TORQUATO e SILVA, S. A. **Modelagem mecanístico-empírica da interface revestimento asfáltico/base granular**, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017.

UZAN, J.; LIVNEH, M.; ESHED, Y., **Investigation of adhesion properties between asphaltic concrete layers.** In: Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 47., 1978, Minneapolis. Anais. Minneapolis: University of Minnesota, 1978. p. 495 - 521.

WANG, G.; WANG, D. Yi; L., DAN N., **Laboratory study and performance evaluation of a new type of prime coat material used on cement treated base.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 147, p. 588-597, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.144>.

WANG, J.; XIAO, F.; CHEN, Z.; LI, X.; AMIRKHANIAN, S., **Application of tack coat in pavement engineering.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 152, p. 856-871, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.056>.

XU D. P.; FENG X. T.; CUI Y. C., **A simple shear strength model for interlayer shear weakness zone**, Engineering Geology 147–148 (2012) 114–123, August 2012, State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China, Tongji University, Shanghai 200092, China, UMR Navier/CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, 6 et 8 av. Blaise Pascal, 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

ZHANG, J.; WU, S.; PEL, J.; LI, Y. **Analysis of Mechanical Responses of Asphalt Pavement Interlayers Based on Shear Spring Compliance.** Journal Of Highway And Transportation Research And Development (English Edition), [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-6, mar. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/jhtrcq.0000355>.

ZIARI, H.; KHABIRI, M. **Interface condition influence on prediction of flexible pavement life.** Journal of Civil Engineering and Management, v. 13, n.1, p. 71-76, 2007.

## APÊNDICE A (MANUAL DE IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA)

### MANUAL QUE DEFINE OS CRITÉRIOS QUE ORIENTAM A EXECUÇÃO, ACEITAÇÃO E CONTROLE TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS E SERVIÇOS DE IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DE RODOVIAS

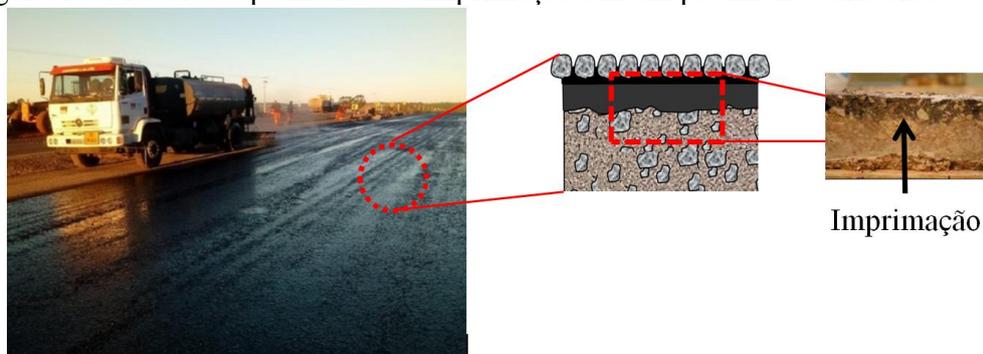
#### 1 OBJETIVO

Esse manual tem por finalidade definir os critérios que orientam a execução, aceitação e controle tecnológico dos materiais e serviços de imprimação betuminosa de rodovias em obras rodoviárias sob a jurisdição da Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará (SOP-CE).

#### 2 DEFINIÇÃO

A imprimação betuminosa (prime coat, em inglês) consiste na aplicação de um material betuminoso sobre a superfície de uma base concluída, antes da execução de uma solução de revestimento qualquer, objetivando conferir coesão superficial, impermeabilização e permitir condições de aderência entre esta e o revestimento a ser executado (adaptado de DNIT 144/2014-ES). Observa-se na Figura 1 a interface, gerada pela imprimação, entre a base e o revestimento. A imprimação pode ser utilizada para outras aplicações como, por exemplo, em reparos profundos que atinjam a camada de base, como ilustrado na Figura 2 (adaptado de DER/SP, 2006).

Figura 1 – Modelo esquemático da imprimação em um pavimento existente



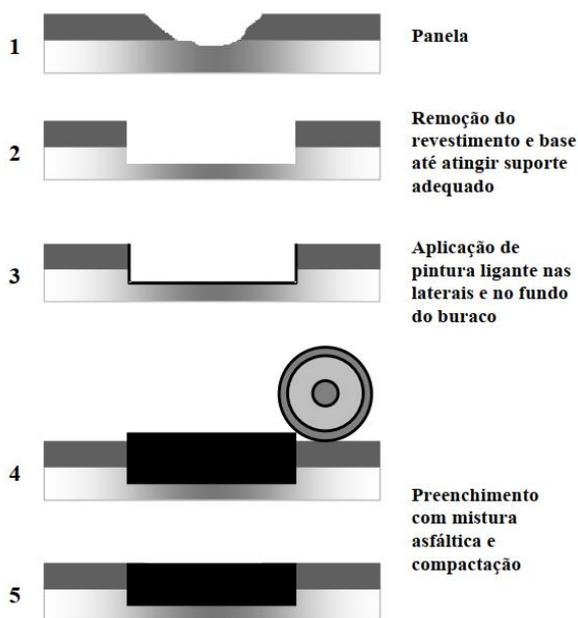
Fonte: adaptado de Senadheera e Vignarajah, 2007 e [https://casacivil.rs.gov.br/upload/recortes/201806/29175205\\_30114\\_GD.jpg](https://casacivil.rs.gov.br/upload/recortes/201806/29175205_30114_GD.jpg)

Larsen (1992), Mantilla e Button (1994), Asphalt Institute (AI) (2001), Rabelo (2006), Villibor (2006), DNIT (2014), Almeida (2017), DER/PR (2017), DER/PR (2017) e AGETOP (2019), atribuem à imprimação as seguintes funções:

- a) aumentar a coesão da superfície da base, pela penetração do material betuminoso empregado;
- b) impermeabilizar a camada de base;
- c) promover condições de aderência entre a base e o revestimento;
- d) enrijecer a parte superior da base para aumentar sua resistência;
- e) proteger a camada de base contra as intempéries e dos efeitos do tráfego controlado, que é liberado antes da aplicação do revestimento.

É importante ressaltar que a mútua ligação criada pela imprimação contribui para a adesão interfacial, para maior eficiência no entrosamento do sistema constituído pelas duas camadas e para a melhoria da capacidade estrutural do pavimento (Ishai e Livneh, 1984 e Godoi, 2011).

Figura 2 – Procedimentos para a execução de um remendo permanente



Fonte: Fernandes Júnior *et al.* (2006)

Observa-se que em muitos estudos a penetração do ligante na base é considerada uma condição essencial para que haja a melhoria na qualidade da base imprimada. Para tanto, a penetração depende de algumas condições, como: tipo de solo, tipo de ligante, temperatura de aplicação do ligante, clima, umidade da base no momento da aplicação, condições da

superfície da base, condições dos equipamentos. Sendo assim, há necessidade da definição de uma taxa de aplicação adequada, imprescindível para evitar problemas como o desprendimento do revestimento pela falta de ligante ou a ocorrência de exsudação, causada pelo seu excesso (Figura 3). Outros defeitos associados à imprimação betuminosa são o deslocamento, a desagregação e o deslocamento do revestimento e a penteadura por falha de bico.

A imprimação não deve ser utilizada em pavimentos que apresentem danos estruturais (fadiga e deformação permanente) e com excesso de afundamentos, panelas e trincas interligadas no revestimento asfáltico. Também não pode ser empregada em pavimento com excesso de umidade nas camadas subjacentes. Para outros casos de impedimento da aplicação em campo, consultar item 6 (execução).

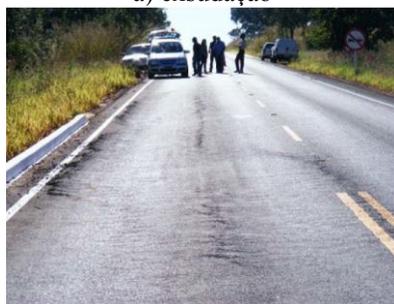
Figura 3 – Problemas ocorrentes na imprimação



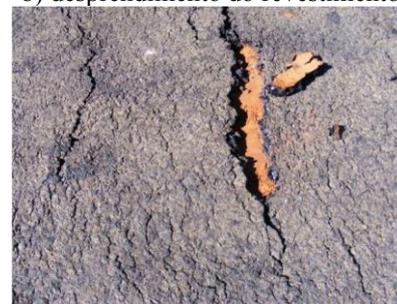
a) exsudação



b) desprendimento do revestimento



c) descolamento do revestimento



d) desagregação do revestimento



e) deslocamento do revestimento



f) penteadura por falha de bico

Fonte: Bernucci *et al.* (2010) e Ramalho (2011)

### 3 MATERIAIS PARA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA

O ligante asfáltico empregado na imprimação pode ser o asfalto diluído de petróleo (ADP) ou a emulsão asfáltica para imprimação (EAI), ambas em conformidade com a norma DNIT 144/2014-ES, ou um outro produto alternativo que venha a ser certificado mediante pesquisa.

#### 3.1 Asfalto diluído

O asfalto diluído de cura média é um material resultante da diluição de um cimento asfáltico de petróleo em um destilado médio conveniente, como é o caso do querosene, por exemplo. Pode ser empregado, desde que indicado em projeto e que o material atenda às especificações apresentadas neste manual.

Os asfaltos diluídos de cura média (CM), conforme sua viscosidade cinemática, classificam-se em: CM-30 e CM-70 (não produzido mais no país). O CM-30 deve atender às especificações da Tabela 1.

Tabela 1 – Asfalto diluído tipo cura média

Características	Unidades	Métodos de Ensaio	Tipo
			CM-30
Viscosidade cinemática, a 60°C	cSt	ME 151/94	30-60
Viscosidade Saybolt-Furol, a 25°C	s	ME 004	75-150
Ponto de fulgor (V. A. Tag), mín.	°C	NBR-5765	38
Destilação até 360°C			
% volume do total destilado, a:			
225°C, máx.	%	NBR-9619	25
250°C			40-70
315°C			75-93
Resíduo a 360°C, por diferença, % volume mín.			50
Água % volume, máx.	%	MB 37	0,2
<b>Ensaio com o Resíduo de destilação</b>			
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	ME 003	80-120
Betume, % peso, mín.	%	ME 010	99
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	ME 163	100

Fonte adaptada: Asfaltos diluídos tipo dura média – DNER-EM 363-97

Cabe ao executante a aceitação ou a rejeição do material recebido, conforme os seguintes critérios:

- a) a amostra deve ser submetida aos ensaios e satisfazer as condições especificadas na Tabela 1;

- b) com base nos resultados de inspeção e independentemente de qualquer ensaio, o comprador poderá rejeitar o fornecimento, total ou parcial, caso não atenda a quantidade requerida, a procedência e a natureza do acondicionamento correspondente ao estipulado no pedido;
- c) caso todos os resultados preencham as exigências da norma DNIT 165/2013-EM, o fornecimento será aceito; caso contrário deverá ser rejeitado se um ou mais resultados não atenderem ao especificado na referida norma.

### **3.2 Emulsão asfáltica**

A emulsão asfáltica compreende um sistema do tipo óleo em água, constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa. A EAI (Emulsão Asfáltica para Imprimação) é uma emulsão asfáltica de ruptura lenta, específica para emprego em serviços de imprimação. A EAI deve apresentar as características descritas na Tabela 2, de modo que sua utilização alcance a máxima eficiência. Quanto à aceitação ou à rejeição, caberá ao executante no ato do recebimento do material:

- a) verificar se a quantidade fornecida e o tipo de emulsão correspondem ao estabelecido;
- b) coletar amostra segundo a NBR 14883:2005 e remetê-la devidamente identificada e autenticada a um laboratório aparelhado para os ensaios de recebimento;
- c) rejeitar a parte do fornecimento que se apresentar em mau estado de acondicionamento, independentemente da realização dos ensaios.

Tabela 2 – Emulsão Asfáltica para Imprimação (EAI)

Características	Unidades	Ruptura Lenta	Método de Ensaio
		EAI	ABNT NBR
Viscosidade Saybolt-Furol a 25°C, máx.	s	90	14491:2007
Sedimentação, máx.	% m/m	10	6570:2010
Peneiração (0,84mm), máx.	% m/m	0,1	14393:2012
pH, máx.	% m/m	8	6299:2012
<b>Ensaio com o resíduo da Destilação</b>			
Solvente destilado	% v/v	0 a 15	6568:2005
Resíduo seco, mín.	% m/m	45	14376:2007
<b>Ensaio para o resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896:2012</b>			
Teor de betume, mín.	%	97	14855:2002
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	40	6293:2001

Fonte adaptada: Emulsões asfálticas para pavimentação - DNIT 165/2013-EM

### 3.3 Ligantes alternativos

Os solventes utilizados na produção dos ADPs são provenientes da destilação do petróleo e tem alto potencial contaminante, pela emissão de voláteis à atmosfera ou pela contaminação de solos e água por permeabilidade. Assim, busca por materiais alternativos para emprego em serviços de imprimação é necessária e incentivada, quer seja pela substituição dos solventes orgânicos por biodegradáveis, quer seja pelo desenvolvimento de materiais emulsificados, tentar dispensar o uso de materiais ricos em compostos voláteis.

O uso de óleos vegetais e reciclados têm mostrado potencial nesse tipo de aplicação. Vários tipos de óleos de base vegetal vêm sendo investigados para diluição do cimento asfáltico de petróleo (CAP) por meio de pesquisas nacionais como as de Dantas Neto (2001), Castro (2003) e Ramalho (2011).

Seguindo essa tendência de uso de biodiluentes ao CAP, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC (Universidade Federal do Ceará) vem estudando, desde o ano de 2005, óleos de base vegetal para modificação de ligantes, bem como novos ensaios que possam ser aplicados para melhor avaliar o comportamento da imprimação. Os principais estudos desse grupo podem ser consultados em Rabêlo (2006), Vasconcelos (2009), Silva et al. (2011), Silva (2012), Almeida et al. (2014), Silva (2016), Almeida et al. (2015), Gondim (2017) e Almeida et al. (2019).

Dentre os materiais testados, podem-se citar: Emulsão de Óleo de Xisto, mistura de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo)/LCC (Líquido da Castanha de Caju), mistura de CAP/Biodiesel de soja, Emulsão de Cera de Carnaúba (ECC), mistura de CAP/ECC, mistura CAP/Emulsão de LCC e mistura de CAP/D-limoneno.

Essa busca por novas alternativas que visem à redução de poluentes nos serviços de imprimação betuminosa é uma tendência mundial. Onde, surgem como soluções as emulsões e ligantes alternativos que utilizam diluentes vegetais. Ações como essa favorecem a redução das taxas de emissão de agentes nocivos, além do fato de contribuir para uma menor dependência do petróleo, reduzindo assim o efeito estufa, problema muito discutido na atualidade.

#### 4 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO

A especificação DNIT 144/2014-ES indica, para o uso do ADP, uma variação da taxa de aplicação entre 0,9 a 1,5 l/m<sup>2</sup>, com tolerância de  $\pm$  0,2 l/m<sup>2</sup>. Já para o caso da EAI, essa variação é da ordem de 0,9 a 1,7 l/m<sup>2</sup> com tolerância de  $\pm$  0,2 l/m<sup>2</sup>. O intervalo de variação da taxa se deve ao tipo e textura da camada a ser imprimada.

Na Tabela 3, estão indicadas ainda as taxas usuais de ADP para imprimação, praticadas pelo DER/SP, segundo a ET-DE-P00/019, para auxiliar na tentativa de se encontrar a melhor taxa. Já na Tabela 4 constam os valores usuais de aplicação de EAI, em função de tipos diferentes de base, conforme a ABEDA (2016).

Tabela 3 – Taxas Usuais de Asfalto Diluído para Imprimação

Camadas	Taxas de aplicação (l/m <sup>2</sup> )
Brita Graduada Simples (BGS)	0,9 - 1,3
Bica Corrida	1,0 - 1,3
Camadas Estabilizadas Granulometricamente	1,0 - 1,2
Solo Arenoso Fino	1,0 - 1,3
Solo Brita Arenoso	1,0 - 1,2
Solo Brita Argiloso	0,9 - 1,1

Fonte: ET-DE-P00-019 (2019)

Tabela 4 – Taxas usuais sugeridas de EAI para cada tipo de base

Camadas	Taxas de aplicação (l/m <sup>2</sup> )
Brita Graduada Simples (BGS)	0,9 - 1,3
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	
Solo Arenoso Fino Laterítico	
Solo-Agregado	
Solo-Cal	0,8 - 1,2
Solo-Cimento	
Solo-Brita com adição de Cimento	

Fonte: ABEDA (2016)

Para bases cimentadas não é indicada a utilização de CM-30, por se tratar de uma base fechada (pouco porosa). Ressalte-se que em nenhuma hipótese será permitida a diluição da emulsão asfáltica do tipo EAI.

A determinação da taxa ideal para aplicação em campo para ADPs, EAI ou outro ligante alternativo certificado deve ser obtida experimentalmente em laboratório através dos ensaios de penetração (Marshall modificado), de coesão (cura do ligante), de desgaste (efeito do tráfego antes do recebimento do revestimento) e aderência (interface entre a base e o revestimento). Esses ensaios são descritos nas especificações constantes na Tabela 5 que trata da avaliação laboratorial da imprimação. Indica-se a experimentação em laboratório para determinação da melhor taxa considerando cura de até 48 horas, a depender do material de base, para garantir a cura total do ligante.

#### 4.1 Ensaios de laboratório para avaliação do comportamento da imprimação

Com o objetivo de atestar alguns parâmetros relativos ao melhor comportamento da imprimação em campo, indica-se a realização dos ensaios de laboratório constantes na Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaios para avaliação da Imprimação em laboratório

Ensaios	Unidades	Limites	Proposta
Determinação de taxa (Marshall modificado)	mm	4 e 13	SOP-ME-P 01/21
Coesão (cura da imprimação)	kgf.cm	10	SOP-ME-P 02/21
Aderência (arrancamento por torção)	kgf.cm	40	SOP-ME-P 03/21
<i>Wet Track Abrasion Test (WTAT)</i> modificado	g/m <sup>2</sup>	538	SOP-ME-P 04/21
<i>Loaded Wheel Tester (LWT)</i> modificado	ciclos	1000	SOP-ME-P 05/21

Fonte: Proprio autor (2024)

##### 4.1.1 Ensaios de determinação do taxa de ligante por penetração

Para se avaliar a imprimação betuminosa com o objetivo de definir a taxa de aplicação em laboratório, indica-se a utilização da metodologia proposta por Rabêlo (2006) que está detalhada na especificação SOP-ME-P 01/21. A metodologia utiliza um cilindro Marshall com um disco espaçador modificado (Figura 4) em que é moldado um corpo de prova (CP) na energia requerida em projeto. Esse ensaio leva em consideração a utilização de solos granulares, considerando que 95% das partículas passam integralmente na peneira de número 4 (4,75 mm).

Dentre os procedimentos listam-se alguns detalhes que devem ser observados, como:

- compactar o CP na energia de projeto;
- esperar a perda de pelo menos 50% da umidade de moldagem;
- limpar com um pincel a superfície na qual será lançada o ligante;

- fazer a irrigação prévia da superfície limpa (indica-se 0,5 l/m<sup>2</sup>);
- aplicar o ligante na taxa definida;
- aguardar até 48 horas para aferição da penetração no CP;
- romper o CP para medir a penetração.

Figura 4 – Cilindro Marshall Modificado



Fonte: Rabêlo (2006)

#### 4.1.2 Ensaios de determinação do tempo de cura da imprimação

Com a finalidade de medir a coesão superficial da base imprimada ainda nos testes preliminares, após as medidas da penetração, recomenda-se a realização do ensaio de cisalhamento por torção, conforme a especificação SOP-ME-P 01/21. Nesse ensaio é utilizado o coesímetro (Figura 5), empregado para verificação da cura de lamas asfálticas.

Figura 5 – Avaliação da coesão superficial com o coesímetro



(a) Torquímetro acoplado ao coesímetro

Fonte: Almeida (2017)



(b) Base rompida

#### 4.1.3 Ensaios de determinação da aderência da imprimação

A aderência é um atributo fornecido à camada de base granular pela imprimação e pela coesão do solo, sendo essa última relacionada à resistência ao cisalhamento. Para avaliar a aderência da camada penetrada pela imprimação de diferentes tipos de ligantes e taxas de

aplicação, a fim de se estudar essa interface, indica-se a realização de um ensaio de arrancamento por torção, segundo a especificação SOP- ME-P 03/21 (Figura 6).

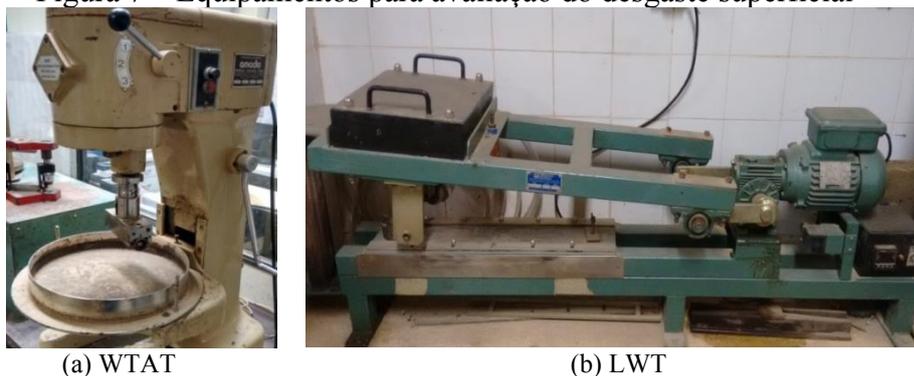
Figura 6 – Ensaio de aderência por arrancamento da base imprimada



#### 4.1.4 Ensaio de desgaste superficial

Para verificação possibilidade da liberação da camada imprimada ao tráfego antes da aplicação do revestimento asfáltico, é necessário conhecer a durabilidade desta camada quando submetida a esse desgaste superficial. Os ensaios utilizados para essa análise foram baseados em metodologias adotadas em avaliações de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), como é o caso do ensaio WTAT (Wet Track Abrasion Test) (Figura 7a) e LWT (Loaded Wheel Test) (Figura 7b). Contudo, foram necessárias algumas modificações para adequação à realidade encontrada na superfície imprimada, conforme as especificações das metodologias dos ensaios SOP- ME-P 04/21 e SOP- ME-P 05/21.

Figura 7 – Equipamentos para avaliação do desgaste superficial



(a) WTAT  
Fonte: Almeida (2019)

(b) LWT

#### 4.2 Procedimento complementar de determinação de taxa em campo

Neste item, com o intuito de auxiliar na definição da taxa de aplicação do ligante, sugere-se, alternativamente, que a taxa pré-selecionada em laboratório seja testada no campo. Recomenda-se para tanto o procedimento proposto por Pessoa Júnior (2019), com as devidas adaptações aqui indicadas.

Desde que investigada preliminarmente no laboratório, conforme procedimentos descritos no item 4.1, a taxa de aplicação pode ser confirmada em campo e pode variar, em detrimento da textura do material utilizado na base. Em bases mais abertas, a taxa necessária de ligante tenderá a ser mais elevada, pois esse penetrará mais facilmente no material.

A Norma DNIT 144/2014-ES menciona que usualmente a taxa de aplicação pode variar a partir da taxa obtida em laboratório (TL), nas proporções de  $\pm 0,1TL$ ,  $\pm 0,2TL$ ,  $\pm 0,3TL$  e TL em  $l/m^2$ , devendo ser determinada em cada obra. Ainda segundo essa norma, a taxa de aplicação é aquela que pode ser absorvida pela base no período de 48 horas.

Então, para realizar essa determinação, segundo a proposição de Pessoa Júnior (2019), indica-se inicialmente marcar no sentido longitudinal da base concluída e liberada uma sequência de 7 (sete) quadrados de  $1,0\text{ m} \times 1,0\text{ m}$ , tomando-se os seguintes cuidados:

- a) escolher um local plano, para evitar o escorrimento do ligante asfáltico;
- b) varrer adequadamente a superfície da base, eliminando o excesso dos finos (Figura 8a). Pode-se, se for o caso, umedecer levemente a camada à taxa de  $0,5\text{ l/m}^2$ , apenas para acomodar os finos. Tais operações simulam a ação da vassoura mecânica e do caminhão tanque, quando da execução da imprimação;
- c) medir os quadrados com uma trena, para obter maior precisão, marcando no chão os seus limites (Figura 8b);

- d) marcar, fora de cada quadrado, a indicação da taxa de ligante (uma delas deverá ser a taxa testada em laboratório) que será espalhada (Figura 8b).

Figura 8 – Varrição da área e marcação dos quadros destinados ao ensaio



(a) Varrição da área destinada ao ensaio



(b) Marcação dos quadros do ensaio

Fonte: Pessoa Junior (2019)

Feitas as operações de a a d, despejar diferentes quantidades de ligante em cada quadrado, com o auxílio de uma proveta de 1.000 ml. Iniciar com a TL no primeiro quadrado e nos demais, aplicar as variações de  $\pm 0,1$ ,  $0,2$  e  $0,3$  de TL, devendo-se tomar os seguintes cuidados:

- iniciar o ensaio utilizando apenas uma proveta até o quadrado correspondente à taxa de  $1 \text{ l/m}^2$ . E nos quadrados com taxa maior que  $1 \text{ l/m}^2$ , onde se requer quantidades de ligante superiores ao volume de uma proveta, utilizar a proveta suja para a quantidade de 1.000 ml e acrescentar sucessivamente, com a segunda proveta as quantidades complementares do ligante. Dessa forma, espera-se que se garanta uma boa visualização, na proveta, do volume de ligante adicionado em cada quadrado;
- espalhar o ligante, com o auxílio de uma vassoura de piaçava, por toda a área de cada quadrado, tão logo ele seja despejado;
- utilizar uma vassoura previamente mergulhada em ligante, para evitar a absorção de parte do asfalto no momento do espalhamento.

A área do ensaio deve então ser isolada e mantida livre de poeira ou ação do tráfego durante o período mínimo de 48 horas.

Passado esse tempo, deve-se avaliar em qual quadrado se deu a melhor situação - isso corresponderá àquele onde houve penetração entre 4 e 13 mm sem que haja sobra de material. Na dúvida entre dois ou mais quadrados, indica-se a retirada de uma porção do material e avaliar em qual houve a penetração requerida com o mínimo de ligante. Reitera-se

que o procedimento descrito é indicado para confirmar a taxa determinada em laboratório. Ressalta-se que o método de campo não substitui e nem deve ser unicamente o método utilizado para determinação da taxa de aplicação da imprimação.

## 5 EQUIPAMENTOS

Inicialmente, após a liberação da camada de base pela supervisora, indica-se a espera de secagem dessa camada, até atingir pelo menos 50 % da umidade de compactação. Essa ação faz com que evapore a água de compactação retida nos poros da base, deixando-os livres para o recebimento do ligante.

Para a execução do serviço de imprimação é necessário que a executora disponha de maquinário adequado (Figura 9) e em funcionamento regular para preparo da superfície que irá receber a imprimação.

Figura 9 – Equipamentos básicos para o serviço de imprimação



a) Vassoura mecanizada



b) Caminhão Pipa



c) Caminhão espargidor

A vassoura mecânica (Figura 9a), que pode ser acoplada normalmente a um trator de pneu, tem a finalidade de remover o excesso de finos da camada de base, podendo, entretanto, ser utilizada uma vassoura de piaçava ou nylon para limpeza manual nesta operação. O jato de ar comprimido poderá, também, ser usado. Esta operação visa evitar que os finos se aglutinem ao ligante asfáltico, absorvendo-o e impedindo sua adequada penetração na camada (PESSOA JÚNIOR, 2019).

Conforme o tipo da base ainda pode ser necessário um leve umedecimento da superfície com um carro pipa dotado de barra distribuidora (Figura 9b). Nesse caso, um caminhão deve passar rapidamente pelo trecho liberando apenas a água necessária para acomodar os poucos finos que não foram varridos pela vassoura mecânica. Recomenda-se a adoção da taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup>.

A Figura 9c apresenta um caminhão espargidor de asfalto que compreende um caminhão tanque com barra de distribuição traseira do tipo de circulação plena, com dispositivo

que possibilite ajustamentos verticais e larguras variáveis de espalhamento do ligante, além de dispositivo espargidor manual para correções em pequenas áreas. Os caminhões devem dispor de tacômetro, calibradores e termômetros, em locais de fácil observação e deve ser dotado também de dispositivo para aquecimento do ligante, para auxiliar na regulagem da taxa aplicada.

Caso necessário, deve ser realizado um teste prévio em trecho experimental, para verificação do atendimento às indicações de projeto. Qualquer equipamento pode ser rejeitado pela fiscalização a qualquer momento, caso não esteja em condições de operação.

Fica vedada a utilização do mesmo caminhão espargidor para dois materiais asfálticos distintos durante a execução da obra.

## **6 EXECUÇÃO**

Para que se consiga uma adequada execução, bom acompanhamento e fiscalização do serviço são definidos procedimentos a serem obedecidos pela executante. Indica-se a execução prévia de um segmento experimental para ajustes dos equipamentos e conferência da taxa de aplicação do ligante. Para tanto, no início dos trabalhos de imprimação, deverá ser executado um segmento experimental, objetivando avaliar o desempenho da camada e estabelecer a taxa ideal de aplicação e sua faixa de trabalho, obedecendo às seguintes condições:

- a) deverá ter uma área de, no mínimo, 1500 m<sup>2</sup>;
- b) para o início da experimentação, deverão ser verificados: a calibragem do equipamento espargidor (bomba reguladora de pressão etc.), a uniformidade dos leques de distribuição do equipamento, a taxa de aplicação do impermeabilizante, aspectos visuais (excesso ou falta de material asfáltico), penetração na camada granular;

Para execução da imprimação asfáltica, devem ser tomados os seguintes cuidados:

- i. implantar a sinalização de obra bloqueando o trecho em que será aplicada a imprimação asfáltica;
- ii. proceder a varredura da superfície, de modo a eliminar o pó e os materiais soltos existentes;
- iii. não permitir o tráfego de equipamentos da obra em área de vegetação natural, para evitar danos, como erosões, e não interferir na drenagem natural da área lindeira;
- iv. nunca executar os serviços em dias de chuva, ou com risco de chuva, bem como em trechos que tenham sido submetidos à ação de chuvas em dias anteriores, evitando o arraste do ligante a ser aplicado;

- v. não aplicar a imprimação com temperatura ambiente inferior a 10°C;
- vi. executar a imprimação em toda largura da camada (pista sem tráfego) e deixá-la fechada ao trânsito de veículos. Quando isso não for possível, trabalhar em meia pista, fazendo-se a imprimação da adjacente, logo que à primeira for permitida a sua abertura ao trânsito. Para tanto, devem ser seguidos as seguintes indicações:
- vii. imprimação em meia pista, interditando-a e deslocando todo o tráfego para outra meia pista, geralmente por um período de 5 dias, até que se possa inverter o tráfego e imprimir a outra meia pista;
- viii. quando não se puder esperar os 5 dias, interditar a meia pista por um tempo menor, de no mínimo 48 horas, para que ocorra a cura do ligante;
- ix. em alguns casos pode-se permitir o tráfego de veículos sobre a imprimação, como em locais onde não há a possibilidade de desvios, cruzamento com outras estradas e serviços de restauração, desde que tomadas as seguintes medidas devidamente previstas em projeto: seja aumentada a taxa de aplicação do ligante e coberta com camada selante de pedrisco, areia ou outro material capaz de evitar a remoção da imprimação e danificação da base, bem como a redução da velocidade do tráfego e a prevenção às freadas e manobras bruscas;
- x. a camada selante descrita no parágrafo anterior deve ser executada de preferência sobre imprimação devidamente curada. Nos casos onde essa atividade não for possível, a imprimação deverá ser efetuada no período da manhã e liberada ao trânsito no final da tarde, com o objetivo de se promover a penetração adequada e cura, dentro das possibilidades impostas. O tempo de exposição ao tráfego será condicionado pelo comportamento da base imprimada, de modo a não danificar o pavimento, não devendo ultrapassar 5 dias.
- xi. com o propósito de evitar a superposição, ou excesso, nos pontos inicial e final das aplicações, devem-se colocar faixas de papel transversalmente, na pista, de modo que o início e o término da aplicação do material asfáltico situem-se sobre essas faixas, as quais serão, a seguir, retiradas;
- xii. qualquer falha (falta ou excesso de ligante) na aplicação da imprimação deve ser imediatamente corrigida;
- xiii. o caminhão deve operar em velocidade uniforme e adequada para a distribuição da imprimação ocorrer de forma homogênea;

- xiv. só deverá ser executado o revestimento após decorridos, no mínimo, 48 horas da aplicação da imprimação impermeabilizante, e somente quando essa estiver convenientemente curada.
- xv. quando o revestimento se tratar de uma mistura asfáltica é obrigatória a aplicação de uma pintura de ligação sobre a imprimação que tiver perdido o seu poder de aderência.

Eventualmente, não há necessidade de pintura de ligação, salvo nos casos em que a superfície se apresentar extremamente seca e desgastada após a exposição de tráfego. Caso uma das premissas para pintura de ligação exista, deve ser utilizada uma emulsão catiônica de ruptura rápida, sendo uma parte de emulsão para uma parte de água (50/50%), aplicada com equipamento de distribuição adequado para esse uso, observando-se o tempo de cura para aplicação do revestimento. Esse tempo pode variar de 1 a 3 horas, a depender das condições climáticas e da formulação da emulsão.

Nota:

No caso de não aceitação dos serviços, por motivos tais como: taxas de aplicação, falhas em equipamentos, excessos ou falhas de ligante na superfície etc., deverão ser promovidos os ajustes necessários, por meio de nova calibração e/ou taxa de aplicação.

## **7 CONTROLE E ACEITAÇÃO**

### **7.1 Ligantes asfálticos**

Os materiais utilizados na execução da imprimação devem ser rotineiramente examinados em laboratório, obedecendo à metodologia indicada pelo DNIT 144/2014-ES e satisfazer às especificações em vigor. Ao final deste manual, há um checklist (Anexo A), para auxiliar no controle de materiais, aplicação, execução e qualidade em campo, elaborado com base em FHWA (Federal Highway Administration, 2019). No Anexo B pode-se verificar ainda um modelo de ficha de campo utilizado em um trecho experimental executado na UTE Energia-Pécem, desenvolvido pela UFC, e um mapa mental (Anexo C), para ajudar no entendimento dos passos a serem seguidos para a realização de um serviço de imprimação.

Para recebimento e aceitação dos ligantes asfálticos, deverão ser executados os ensaios especificados nos itens 7.1.1 e 7.1.2, de amostras coletadas quando da chegada do material à obra, conforme cada especificação concernente.

### **7.1.1 Asfalto diluído**

- a) Para todo carregamento que chegar à obra, deve-se realizar:
  - i. 1 (um) ensaio de viscosidade cinemática a 60°C (NBR 14.756:2001);
  - ii. 1 (um) ensaio do ponto de fulgor e combustão (vaso aberto TAG) (NBR 5.765:2012).
- b) Para cada 100 toneladas:
  - i. 1 (um) ensaio de viscosidade Saybolt Furol (NBR 14.491:2007), no mínimo em 3 (três) temperaturas, para o estabelecimento da relação viscosidade × temperatura;
  - ii. 1 (um) ensaio de destilação para os asfaltos diluídos (NBR 14.856:2002), para verificação da quantidade de resíduo.

### **7.1.2 Emulsão asfáltica do tipo EAI**

- a) Para todo carregamento que chegar à obra:
  - iii. 1 (um) ensaio de viscosidade Saybolt Furol (NBR 14.491:2007) a 25°C;
  - iv. 1 (um) ensaio de resíduo por evaporação (NBR 14.376:2007);
  - v. 1 (um) ensaio de peneiração (NBR 14.393:2012);
  - vi. 1 (uma) determinação da carga da partícula (DNIT 156/2011-ME).
- b) Para cada 100 toneladas:
  - vii. 1 (um) ensaio de sedimentação para emulsões (NBR 6.570:2010);
  - viii. 1 (um) ensaio de viscosidade Saybolt Furol (NBR 14.491:2007), no mínimo em 3 (três) temperaturas, para o estabelecimento da relação viscosidade × temperatura.

Os resultados dos ensaios realizados deverão atender ao disposto no subtópico 7.5. Os ligantes somente serão liberados para aplicação após verificação e aprovação dos resultados dos ensaios.

## **7.2 Controle da execução**

Nessa seção serão apresentados os cuidados relativos ao manuseio e operação do serviço de imprimação

### **7.2.1 Temperatura de aplicação**

A temperatura da imprimação deve ser medida no caminhão distribuidor imediatamente antes de qualquer aplicação, com a intenção de verificar se satisfaz ao intervalo de temperatura definido pela relação viscosidade × temperatura.

### **7.2.2 Taxa de aplicação (T)**

O controle da taxa de imprimação aplicada deve ser efetuado aleatoriamente, mediante a colocação de bandejas, de massa (P1) e área (A) conhecidas, na pista onde está sendo feita a aplicação. A imprimação deve ser coletada na bandeja, na passagem do carro distribuidor. Com a pesagem da bandeja depois da cura total (até massa constante) da imprimação coletada (P2) se obtém a taxa de aplicação do resíduo (TR) (Equação 1);

$$TR = \frac{P_2 - P_1}{A} \quad (1)$$

A partir do TR se obtém a taxa de aplicação (T) em l/m<sup>2</sup> da imprimação, em função da porcentagem de resíduo verificada no ensaio de laboratório, quando do recebimento do correspondente carregamento do ligante asfáltico, conforme o Tópico 7 deste manual:

- a) para trechos de imprimação de extensão limitada ou com necessidade de liberação imediata, com área de no máximo 4.000 m<sup>2</sup>, devem ser feitas 5 determinações de T, no mínimo, para controle;
- b) nos demais casos, para segmentos com área superior a 4.000 m<sup>2</sup> e inferior a 20.000 m<sup>2</sup>, o controle da execução da imprimação deve ser exercido mediante a coleta de amostras, para determinação da taxa de aplicação, feita de maneira aleatória, de acordo com o Plano de Amostragem Variável (ver item 7.5).

## **7.3 Controle geométrico**

Nessa seção serão apresentados formas de controle operacional relativos ao controle geométrico e acabamento da superfície para melhor resultado da imprimação.

### **7.3.1 Largura**

Não serão admitidos valores inferiores aos previstos em projeto. Em caso de não atendimento deverá ser aplicada uma nova camada, para complementar a largura projetada e observada a tolerância de +10 cm quanto à largura, não sendo tolerada falta, com ônus da executora.

### **7.3.2 Acabamento da superfície**

A superfície acabada, visualmente, deverá se apresentar com total cobrimento da imprimação, sem falhas, excessos, exsudações e com o aspecto estabelecido no segmento experimental. Qualquer inconformidade observada deve ser corrigida imediatamente.

Ocorrendo insuficiências frequentes de largura ou excesso além do tolerado, os serviços deverão ser paralisados e só reiniciados quando corrigidas as falhas de execução, se necessário com a troca do equipamento espargidor ou do operador.

## **7.4 Plano de amostragem e condições de aceitação**

O número e a frequência de determinações da taxa de aplicação (T) da imprimação devem ser estabelecidos segundo um Plano de Amostragem previamente aprovado pela Fiscalização e elaborado de acordo com os preceitos da Norma DNER-PRO 277/1997.

O tamanho das amostras deve ser documentado e informado previamente à Fiscalização. O número mínimo de determinações por segmento (que corresponde a uma área inferior a 4.000 m<sup>2</sup>) é de cinco (5). Essa é a frequência mínima aceitável (1 a cada 800 m<sup>2</sup> imprimados) indicada para a execução dessas determinações, devendo ser compatibilizada com o tamanho das amostras, e sempre deve ser documentado e informado previamente à fiscalização.

## **7.5 Condições de conformidade e não conformidade**

Todos os ensaios de controle e determinações relativos à execução e ao produto, realizados de acordo com o Plano de Amostragem citado, devem cumprir às especificações deste manual, e estarem de acordo com os critérios de conformidade apresentados no Quadro 1 (ver também Equações 2 e 3, bem como Tabela 6). Quando especificado valor ou limite mínimo

e/ou máximo a ser(em) atingido(s), devem ser verificadas as condições apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Condições de conformidade e não conformidade.

Condições de conformidade:	Condições de não conformidade:
$\bar{X} - k \times s \geq$ valor mínimo especificado	$\bar{X} - k \times s <$ valor mínimo especificado
$\bar{X} + k \times s \leq$ valor máximo especificado	$\bar{X} + k \times s >$ valor máximo especificado

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Tabela 6 – Valores dos coeficientes para as tolerâncias uni e bilateral

<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>K</i>
4	0,95	16	0,71
5	0,89	18	0,70
6	0,85	20	0,69
7	0,82	25	0,67
8	0,80	30	0,66
9	0,78	40	0,64
10	0,77	50	0,63
12	0,75	100	0,60
14	0,73	∞	0,52

Fonte: Adaptado de DNER (1997)

Em que:

$\bar{X}$  é a média da amostra, dada pela Equação (2);

$x_i$  são os valores individuais da amostra;

$n$  é o tamanho da amostra, dado pelo número de determinações em campo;

$s$  é o desvio padrão da amostra, dado pela Equação (3);

$k$  é o coeficiente tabelado (Tabela 6) em função do número de determinações para as tolerâncias.

Os resultados do controle estatístico devem ser registrados em relatórios periódicos de acompanhamento, de acordo com a norma DNIT 011/2004-PRO, a qual estabelece que sejam tomadas providências para o tratamento das não conformidades.

Os serviços só devem ser aceitos se atenderem ao estabelecido neste documento. Todo resultado que aponte para situação de não conformidade deve ser refeito ou corrigido, conforme indicação dos projetistas. Qualquer serviço corrigido só deve ser aceito se as

correções executadas estiverem em conformidade com o disposto; caso contrário o serviço deve ser rejeitado.

## **7.6 Cuidados ambientais**

Nas operações referentes ao serviço de imprimação devem ser adotadas as seguintes medidas de proteção ambiental:

- a) evitar a instalação de depósitos de ligante para imprimação próximo a curso d'água;
- b) a área dos depósitos deverá contar com bacia de contenção com uma canalização (valeta) que capte qualquer derrame acidental em uma caixa, para sua posterior retirada, evitando contaminação dos solos e das águas;
- c) impedir o refugo de materiais já utilizados na faixa de domínio e áreas lindeiras adjacentes, ou qualquer outro lugar causador de prejuízo ambiental;
- d) na desmobilização dessa atividade, remover os depósitos de ligante e efetuar a limpeza do local, recompondo a área afetada pelas atividades da construção.

Quanto à execução, cabe lembrar que não deve ser permitida a descarga do espargidor, mesmo para teste, sobre o solo ou nas proximidades de cursos d'água. Para executar os eventuais testes com o objetivo de verificar se existe falha de bico, deve ser providenciado um coletor apropriado que evite o derrame de ligante sobre o solo.

## **REFERÊNCIAS**

AGETOP (Agência Goiana de Transportes e Obras). **Pavimentação – Especificação de Serviço – Imprimação**. AGETOP – PAV 07/2019.

ALMEIDA, F. D.; LIMA FILHO, S. A. R.; BARROSO, S. H. A.; BASTOS, J. B. S. **Desenvolvimento de um método expedito para avaliação da imprimação betuminosa de rodovias**. In: Copyright 2014, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 21º Encontro de Asfalto - IBP357\_14, 2014.

ALMEIDA, F. D.; BARROSO, S. H. A. **Desenvolvimento de um método expedito para avaliação da imprimação betuminosa de rodovias**. Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto - CILA, Bariloche, Argentina, 2015.

ALMEIDA, F. D.; BARROSO, S. H. A. **Avaliação da coesão da imprimação betuminosa de rodovias**. Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto - CILA, Medellín, Colômbia, 2017.

ALMEIDA, F. D. **Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017.

ALMEIDA, F. D.; BARROSO, S. H. A. **Avaliação da penetração do ligante asfáltico e do desgaste superficial de bases imprimadas**. 33º Congresso da Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú, SC, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS – ABEDA. Informativo Técnico N° 7. **Emulsão Asfáltica para Serviço de Imprimação (EAI)**, 2016.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Ed. ABEDA/PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 2010.

CASTRO, C. A. A. **Estudo da técnica de anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego**. Tese de M. Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2003.

DANTAS NETO, S. A. **Materiais asfálticos alternativos para uso em pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília - DF, 2001.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ - DER/PR. **Pavimentação: Pinturas Asfálticas**. DER/PR ES-P 17/17. Especificações de Serviços Rodoviários. Paraná, 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO - DER/SP. **Imprimação Betuminosa Impermeabilizante**. ET-DE-P00/019. Especificação Técnica. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Metodologia para controle estatístico de obras e serviços** – Procedimento. DNER-PRO 277/97. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Metodologia para controle de Asfaltos diluídos tipo cura média** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1997. – Especificação de Material. DNER-EM 363/97. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Metodologia para controle de Emulsões asfálticas para pavimentação** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 2013. – Especificação de Material. DNIT 165/2013 - EM. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentação - Imprimação com ligante asfáltico** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 2014. – Especificação de Material. DNIT 144/2014 - ES. Rio de Janeiro, 2014.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Pavement Preservation Checklist Series - 8 - Slurry Seal**. Publication No. FHWA-HIF-19-036, 2019.

FERNANDES JÚNIOR, J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L.F. **Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos**. Gráfica EESC – USP. São Carlos - SP, 2006.

GODOI, L. **Estudo do comportamento dos ligantes asfálticos utilizados na imprimação asfáltica relacionados à emissão de VOC's**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais – PIPE, Curitiba - PR, 2011.

GONDIM, L. M. **Investigação sobre a formulação de um bio-ligante à base da seiva de Euphorbia Tirucalli para emprego em pavimentação**, Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017.

ISHAI, I.; LIVNEH, M. **Functional and Structural Role of Prime Coat in Asphalt**. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, Scottsdale - AZ, 1984.

LARSEN, J. **Tratamento Superficial na Conservação e Construção de Rodovias**. 3ª edição. Rio de Janeiro - RJ, 1992.

MANTILLA, C. A.; BUTTOM J. W. **Prime coat method sand material store place cutback asphalt**. Research Report TTI 0-1334, Texas Transportation Institute Texas A&M University, 1994.

RABELO, A. N. **Contribuição ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias do estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2006.

RAMALHO, R. W. **Avaliação em laboratório da utilização de emulsão com óleo de xisto na imprimação de solos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO. Ouro Preto - MG, 2011.

SENADHEERA, S.; VIGNARAJAH, M. **Design and Construction Guide for Surface Treatments over Base Courses**. Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Texas Tech University, Lubbock, TX, 2007.

SILVA, B. T. A.; VASCONCELOS, M. A. G.; BARROSO, S. H. A. **Avaliação do potencial do biodiesel como diluente alternativo na imprimação betuminosa de misturas de solos/RCD de diferentes granulometrias**, XVI CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto. IBP2204\_11, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, R. C. **Estudo sobre a aplicação de emulsões de cera de carnaúba e LCC na imprimação betuminosa de pavimentos rodoviários**. Encontros Universitários da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2012.

SILVA, R. C. **Introdução de um novo coeficiente para análise de desempenho dos tratamentos superficiais a partir dos estudos desenvolvidos nos estados do Ceará/Brasil e Carolina do Norte/USA**. Monografia de Graduação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2016.

PESSOA JÚNIOR, E. **Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana**. Execução e Fiscalização I, Elci Pessoa Júnior. São Paulo: Pini, 2019.

THE ASPHALT INSTITUTE, **Construction of Hot Mix Asphalt Institute**, Manual Series n°224 (MS-22). Second Edition. The Asphalt Institute, Lexington - KY, 2001.

VILLIBOR, D. F. **Solo Arenoso Fino Laterítico Critérios de Escolha e Recomendações Construtivas para esta Base de Pavimento**. Revista Pavimentação, pp.35-55. Ano I – N° 2, Abril, 2006.

## **APÊNDICE B (DETERMINAÇÃO DA TAXA DE IMPRIMAÇÃO)**

### **PROPOSIÇÃO DE INSTRUÇÃO METODOLÓGICA PARA A DETERMINAÇÃO DE TAXA DE APLICAÇÃO DE LIGANTES EM SERVIÇOS DE IMPRIMAÇÃO**

#### **1 DEFINIÇÃO**

A imprimação consiste na aplicação de material asfáltico sobre uma superfície de base concluída, antes da execução de um revestimento asfáltico qualquer (DNIT, 2014). Ela promove a aderência entre a base e o revestimento, impermeabilizando-a e fornecendo coesão superficial. Contudo, são necessários cuidados com a sua execução, pois a imprimação betuminosa depende de muitas variáveis, como: tipo de base, umidade de compactação, tipo de ligante, temperatura  $\times$  viscosidade de aplicação da imprimação, condições climáticas, etc.

Nesse sentido, a definição da taxa ideal é o ponto de partida para uma base imprimada com incremento das propriedades de resistência causado pelo endurecimento da superfície da base associado à porção do solo penetrada pela imprimação.

#### **2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS**

Para aplicação deste Método de Ensaio (ME) são indispensáveis os seguintes documentos:

- a) Almeida, F. D. Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017;
- b) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA DNIT 144/2014 - ES. Pavimentação - Imprimação com Ligante Asfáltico. Especificação de serviço;
- c) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 041/94 - Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização;
- d) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 162/94. Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas;

- e) Rabêlo, A. N., Contribuição ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias do estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2006.

### **3 APARELHAGEM E MATERIAL**

Aparelhagem e materiais necessários:

- seringas descartáveis de 10 ml, para aplicação do ligante betuminoso e da irrigação prévia;
- pincel com cerdas médias para limpeza prévia da superfície a ser imprimada;
- cronômetro, para controle do tempo decorrido entre a irrigação prévia e o início da aplicação do ligante betuminoso;
- cerca de 1 kg de solo umedecido, de acordo com o determinado no ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, para cada CP Marshall que se pretende moldar;
- ligantes asfálticos utilizados no ensaio;
- régua de alumínio, com divisões em milímetros, para medição das penetrações;
- régua biselada para partição dos corpos de prova (CPs);
- estufa ou mesa aquecedora, para aquecimento dos ligantes;
- termômetro, para controle da temperatura de aplicação dos ligantes betuminosos;
- cilindro Marshall 100 mm de diâmetro, conforme Figura 1 em anexo;
- compactador Marshall manual, conforme Figura 2 em anexo.

### **4 AMOSTRAGEM**

O ensaio de determinação da taxa de imprimação leva em consideração a utilização de solos finos, considerando que 95% das partículas passam integralmente na peneira de número 4 (4,75 mm). Após a homogeneização do solo na umidade determinada pelo ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, a amostra deve ser acondicionada em saco plástico hermeticamente fechado e ser levado à câmara úmida por um prazo de 12 horas, no mínimo, antes da compactação, com o intuito de garantir a homogeneização da umidade no solo conforme DNIT 134/2018 - ME.

A compactação do solo pode ser realizada utilizando-se um compactador Marshall manual (Figura 2 em anexo) no cilindro Marshall (Figura 1 em anexo).

A DNIT 144/2014-ES indica que a variação da taxa de aplicação para o caso do asfalto diluído de petróleo (ADP) entre 0,9 a 1,5 l/m<sup>2</sup>, com tolerância de  $\pm 0,2$  l/m<sup>2</sup>. Já para o caso da emulsão asfáltica especial para imprimação (EAI), essa variação é de 0,9 a 1,7 l/m<sup>2</sup> com tolerância de  $\pm 0,2$  l/m<sup>2</sup>. O intervalo de variação da taxa se deve ao tipo e textura da camada a ser imprimada, sendo recomendado a realização do ensaio em pelo menos 3 CPs para as mesmas condições de ensaio, ou seja: umidade da base; tipo de material; e taxa.

Quanto aos resultados, indica-se adotar a taxa que penetrar entre 4 e 13 mm. Posterior à análise da penetração, as taxas que resultaram em penetrações dentro desse intervalo necessitam de análise mecânica indicada na Tabela 1, tais como: resistência ao cisalhamento das partículas (Coesão) e das interfaces (Aderência), desgaste abrasivo (WTAT modificado) e afundamento em trilha de roda (LWT modificado). Se mais de uma taxa penetrar no intervalo entre 4 e 13 mm e tiverem seus comportamentos validados pelos ensaios mecânicos, deve-se selecionar a taxa mais econômica.

Tabela 1 – Ensaios para análise mecânica da imprimação em laboratório

Ensaios	Unidades	Limites	Proposta
Coesão (cura da imprimação)	kgf.cm	10	SOP-ME-P 02/21
Aderência (arrancamento por torção)	kgf.cm	40	SOP-ME-P 03/21
<i>Wet Track Abrasion Test (WTAT)</i> modificado	g/m <sup>2</sup>	538	SOP-ME-P 04/21
<i>Loaded Wheel Tester (LWT)</i> modificado	ciclos	1000	SOP-ME-P 05/21

Fonte: Próprio Autor (2021)

Em resumo deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) homogeneizar o solo na umidade desejada e acondicioná-lo em saco plástico por no mínimo 12 horas;
- b) colocar o solo úmido no cilindro Marshall;
- c) moldar os CPs com o auxílio do compactador Marshall manual na energia de compactação indicada no projeto, levando em conta as especificidades do cilindro. A Tabela 2 em anexo pode auxiliar na determinação da energia;
- d) aguardar, em média, 48 horas para a cura do CP;
- e) executar uma varrição da superfície do CP para retirada do pó com o pincel;
- f) aplicar uma irrigação prévia na taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup> de água com uma seringa visando desobstruir os capilares da base;

- g) Aquecer o ligante, se necessário, para que atinja a temperatura indicada na curva de temperatura  $\times$  viscosidade segundo DNIT 144/014-ES;
- h) realizar a imprimação, após 15 minutos da irrigação prévia segundo a taxa de projeto em l/m<sup>2</sup>;
- i) aguardar a cura da imprimação por um período de 48 horas;
- j) partir longitudinalmente os corpos de prova, em seções dispostas e com o auxílio de uma régua biselada amolada, o mais que possível em ângulo reto, e proceder às leituras das medidas da penetração da imprimação, em 5 pontos equidistantes, utilizando uma régua com divisões milimétricas, evitando-se medidas próximas à parede do rebaixo, conforme Figura 4 em anexo;
- k) registrar a média aritmética das 5 medidas obtidas (com precisão de 1,0 mm), sendo a penetração atingida pelo ligante betuminoso;
- l) traçar o gráfico de variação da penetração do ligante aplicado em função das taxas testadas.

Observações: Não deve ser colocado desmoldante no ressalto do disco espaçador, pois tal procedimento causará a impermeabilização do local que receberá o ligante. Indica-se que o ensaio seja realizado em ambiente com temperatura controlada (25° C) para que tenha homogeneidade nos resultados.

Para a adaptação do processo da compactação do molde convencional para o molde Marshall, utiliza-se: Equação 1 - para o cálculo da energia de compactação e Equação 2 - para cálculo do número e golpes.

$$Ec = \frac{n \times P \times H}{V} \times N \quad (1)$$

$$n = \frac{Ec \times V}{N \times P \times H} \quad (2)$$

em que:

Ec: energia de compactação [12,93 kg  $\times$  cm/cm<sup>3</sup>], para a energia intermediária;

P: peso do soquete [4,54 kg];

H: altura de queda [45,7 cm];

N: número de camadas [uma camada].

n: número de golpes; e

V: volume do CP [V = 456,46 cm<sup>3</sup>].

## 5 RESULTADOS

O valor da penetração do CP será àquele obtido a partir da média das cinco medidas realizadas no mesmo CP, conforme Figura 5 em anexo. O procedimento se repetirá em todos os CPs, sendo o resultado final da penetração a média dos resultados dos CPs utilizados (pelo menos 3 CPs), em uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante e a serem realizados no mesmo dia.

Assim, será definida como a taxa de aplicação àquela que ficar dentro do intervalo de 4 a 13 mm de penetração, e que forem validadas nos ensaios de análise mecânica (coesão, aderência e desgaste) indicada na Tabela 1. Sendo, preferível a mais econômica.

Se em nenhum dos CPs ensaiados for atingido o intervalo indicado de penetração (4 a 13 mm) indica-se a investigação do ligante utilizado, e se ele estiver dentro dos parâmetros normativos, deve-se proceder à substituição ou adequação do material de base. A realização do procedimento de determinação da taxa de imprimação deve ser repetida sempre que houver modificação do material de base ou do ligante para imprimação.

## ANEXO NORMATIVO

Figura 1 – Conjunto Marshall: (a) Colar (b) cilindro e (c) base



Figura 2 – Compactador Marshall manual



Figura 3 – Detalhe do rebaixo preenchido de ligante no CP

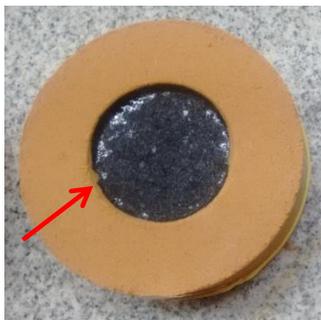


Figura 4 – Rompimento do CP após a cura



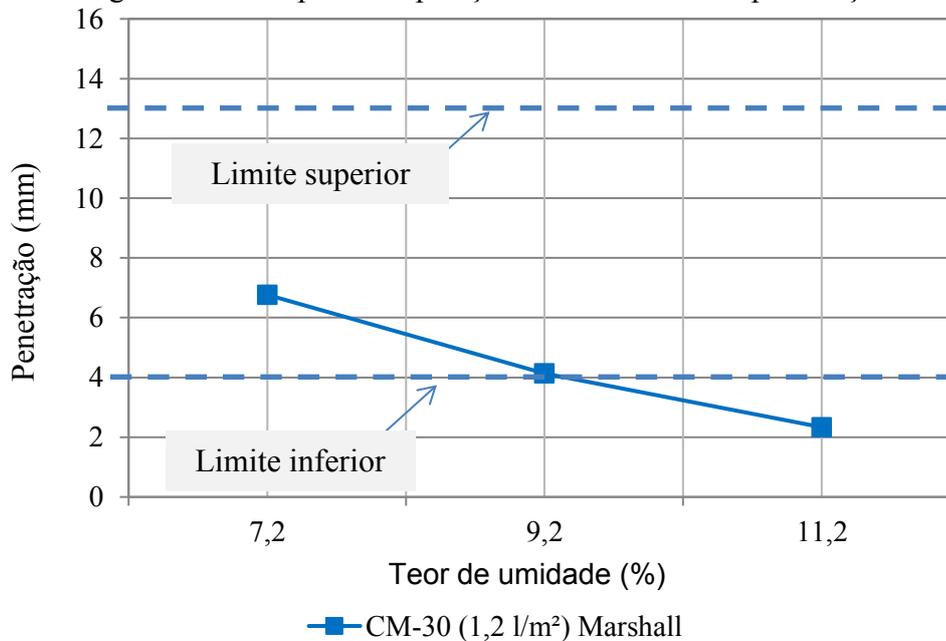
Figura 5 – Detalhe da medida das penetrações



Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios de compactação com os cilindros convencional e Marshall.

Características	Cilindro	
	Proctor	Marshall
Diâmetro médio (cm)	15	10,1
Altura útil média do CP (cm)	12,6	5,7
Peso do soquete (kg)	4,45	4,54
Diâmetro do rebaixo (cm)	-	4,95
Altura do rebaixo (cm)	-	0,42
Altura de queda (cm)	45,72	
Número de camadas	cinco	uma
Número de golpes	26	28
Energia (kg.cm/cm <sup>3</sup> )	12,93	12,93

Figura 6 – Exemplo de exposição dos resultados de penetração



## **APÊNDICE C (DETERMINAÇÃO DA COESÃO DE IMPRIMAÇÃO)**

### **PROPOSIÇÃO DE INSTRUÇÃO METODOLÓGICA PARA A DETERMINAÇÃO DA COESÃO DA BASE IMPRIMADA**

#### **1 DEFINIÇÃO**

A coesão da base imprimada é caracterizada pela resistência ao cisalhamento do solo que normalmente, dada pela força de atração entre as superfícies de suas partículas, e que tem suas propriedades ampliadas quando penetrada pela imprimação. Dessa forma, verifica-se que imprimação funciona como um agente melhorador da coesão e a protege a base da ação deletéria da umidade.

#### **2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS**

Para aplicação desta Especificação de Serviço são indispensáveis os seguintes documentos:

- a) Almeida, F. D. Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017.
- b) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA DNIT 144/2014 - ES. Pavimentação - Imprimação com Ligante Asfáltico. Especificação de serviço.
- c) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 041/94 - Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização.
- d) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 162/94. Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.
- e) ISSA TB-139 Classify Emulsified Asphalt/Aggregate Mixture Systems by Modified Cohesion Tester Measurement of Set and Cure Characteristics, International Slurry Surfacing Association, 1990.

- f) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA DNIT 156/2011 – ME. Pavimentação asfáltica – Lama asfáltica. Método de Ensaio.

### 3 APARELHAGEM E MATERIAL

A aparelhagem e materiais necessários:

- seringas descartáveis de 10 ml, para aplicação do ligante betuminoso e da irrigação prévia;
- pincel com cerdas médias para limpeza prévia da superfície a ser imprimada;
- cronômetro, para controle do tempo decorrido entre a irrigação prévia e o início da aplicação do ligante betuminoso;
- cerca de 50 g de solo umedecido, de acordo com o determinado no ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, para cada CP moldado na Cápsula;
- ligantes asfálticos utilizados no ensaio;
- régua de alumínio, com divisões em milímetros, para medição das penetrações;
- estufa ou mesa aquecedora, para aquecimento dos ligantes;
- termômetro, para controle da temperatura de aplicação dos ligantes betuminosos;
- cápsulas de alumínio de 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura, conforme Figura 1 em anexo;
- embolo compactador de 39 mm de diâmetro e 20 mm de altura, conforme Figura 2 em anexo.
- coesímetro pneumático (Figura 3 em anexo), conforme normas: ASTM D3910 e NBR 14798, vigentes;
- torquímetro (Figura 4 em anexo) para coesímetro pneumático;.

### 4 AMOSTRAGEM

O ensaio de coesão da imprimação leva em consideração a utilização de solos finos, considerando que 95% das partículas passam integralmente na peneira de número 4 (4,75 mm). Após a homogeneização do solo na umidade determinada pelo ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, a amostra deve ser acondicionada em saco plástico hermeticamente fechado e ser levado à câmara úmida por um prazo de 12 horas, no mínimo, antes da compactação, com o intuito de garantir a homogeneização da umidade no solo conforme DNIT 134/2018 - ME.

A compactação do solo pode ser realizada no próprio coesímetro, utilizando o embolo de 39 mm de diâmetro (a ser usinado), conforme Figura 5 em anexo, até atingir o torque máximo suportado pelo equipamento (40 kgf.cm). Para isso, deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) homogeneizar o solo na umidade desejada e acondicioná-lo em saco plástico por no mínimo 12 horas;
- b) colocar o solo úmido nas cápsulas para moldar os corpos de prova (CPs);
- c) aplicar, com uso de um coesímetro, uma torção de 40,0 kgf.cm medidos com uso do torquímetro manual, podendo ser repetido o procedimento se o torque não for atingido na primeira tentativa;
- d) aguardar, em média, 24 horas para que o CP cure antes da imprimação;
- e) executar uma varrição da superfície do CP para retirada do pó com o pincel;
- f) aplicar uma irrigação prévia na taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup> de água com uma seringa visando desobstruir os capilares da base;
- g) Aquecer o ligante, se necessário, para que atinja a temperatura indicada na curva de temperatura × viscosidade segundo DNIT 144/014-ES;
- h) imprimir, após 15 minutos da irrigação prévia segundo a taxa de projeto em l/m<sup>2</sup>;
- i) aguardar a cura da imprimação por um período de 48 horas;
- j) após a cura, posicionar o CP no coesímetro para o ensaio de coesão;
- k) acoplar o torquímetro do coesímetro na parte superior do pistão e girá-lo em 1/4 (45°) de volta à velocidade constante, rompendo a camada imprimada;
- l) anotar o torque medido.

Observações: Não há necessidade de colocar desmoldante nas cápsulas, pois tal procedimento poderá causar a impermeabilização do local que receberá o ligante. Indica-se que o ensaio seja realizado em ambiente com temperatura controlada (25° C) para que tenha homogeneidade nos resultados.

## **5 RESULTADOS**

O valor final da coesão deve ser àquele obtido a partir de três cápsulas testadas para uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante, a serem realizados no mesmo dia.

Quanto aos resultados, sugere-se o valor mínimo de 10,0 kgf.cm para aceitação quanto à coesão da imprimação, ou seja, tendo em vista que essa não é a camada final de

rolamento e que o tráfego será apenas provisório e leve, esse valor indica que a base atingiu um nível de cura mínimo para se prosseguir com o serviço de pavimentação.

Almeida (2017), ao avaliar 5 ligantes, sendo 4 ligantes comerciais e 1 alternativo para imprimação, verificou que os valores de coesão mínimo de 10 kgf.cm foi satisfatório para gerar um comportamento adequado na base imprimada.

Caso contrário, se pelo menos um dos valores encontrados ficarem abaixo de 10,0 kgf.cm, passadas 24 horas, indica-se que seja aguardado um tempo adicional até que a imprimação atinja esse valor (10,0 kgf.cm). Sendo o tempo final medido, o mínimo para indicar a cura da imprimação.

## ANEXO NORMATIVO

Figura 1 – Cápsula de alumínio  $\varnothing 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$



Figura 2 – êmbolo de compactação  $\varnothing 39 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  com rosca

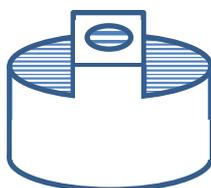
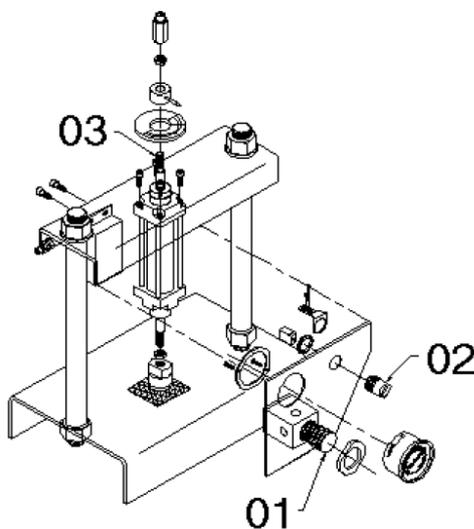


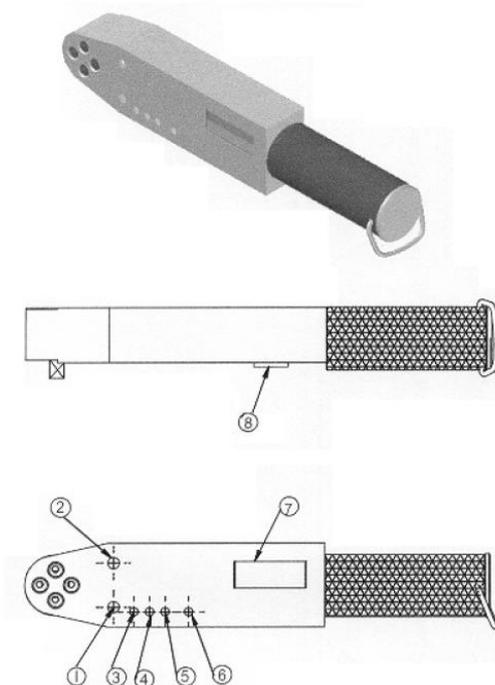
Figura 3 – Desenho esquemático do coesímetro



Fonte: Manual de uso do coesímetro – Solotest

- (1) Válvula de ajuste de entrada de ar no sistema;
- (2) Botão que aciona o pistão para cima e para baixo;
- (3) Conector do torquímetro na parte superior do pistão.

Figura 4 – Torquímetro Digital MMK



Fonte: Manual de uso do coesímetro – Solotest

- (1) Ajuste de zero;
- (2) Programador de torque;
- (3) Chave programação / normal;
- (4) Chave detector de pico;
- (5) Reset de pico;
- (6) Chave liga e desliga e horário anti-horário;
- (7) Display LCD 3 ½ dígitos;
- (8) Sinal sonoro.

## **APÊNDICE D (DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA DE IMPRIMAÇÃO)**

### **PROPOSIÇÃO DE INSTRUÇÃO METODOLÓGICA PARA A DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA DA BASE IMPRIMADA**

#### **1 DEFINIÇÃO**

A aderência da imprimação é caracterizada pela resistência da interface entre a camada subjacente imprimada e o revestimento ao cisalhamento, resultante da movimentação dos veículos. Dessa forma, verifica-se que imprimação funciona como um agente potencializador da aderência além de proteger da ação deletéria da umidade.

Assim, ela contribui para a adesão interfacial, para maior eficiência no entrosamento do sistema constituído pelas duas camadas e para a melhoria da capacidade estrutural do pavimento segundo Ishai e Livneh (1984).

#### **2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS**

Para aplicação desta Especificação de Serviço são indispensáveis os seguintes documentos:

- a) Almeida, F. D.; Torquato e Silva, S. A.; Barroso, S. H. A.; Soares, J. B. Aplicação do ensaio de arrancamento por torção para avaliação da aderência de bases imprimadas. 30º Congresso da Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- b) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA DNIT 144/2014 - ES. Pavimentação - Imprimação com Ligante Asfáltico. Especificação de serviço. 7 páginas.
- c) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 041/94 - Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização
- d) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 162/94. Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.
- e) Ishai, I.; Livneh, M., Functional and Structural Role of Prime Coat in Asphalt. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, Scottsdale - AZ, 1984.

- f) Tashman, L.; Nam, K.; Papagiannakis, A. T., Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers. (No. WARD 645.1). Washington State Department of Transportation, 2006.

### **3 APARELHAGEM E MATERIAL**

Aparelhagem e materiais necessários:

- seringas descartáveis de 20 ml, para aplicação do ligante betuminoso e da irrigação prévia;
- pincel com cerdas médias para limpeza prévia da superfície a ser imprimada;
- cronômetro, para controle do tempo decorrido entre a irrigação prévia e o início da aplicação do ligante betuminoso;
- cerca de 2200 g de solo umedecido, de acordo com o determinado no ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, para cada CP moldado no molde circular;
- ligantes asfálticos utilizados no ensaio;
- estufa ou mesa aquecedora, para aquecimento dos ligantes;
- termômetro, para controle da temperatura de aplicação dos ligantes betuminosos;
- compactador Marshall manual, conforme Figura 1 em anexo.
- moldes cilíndricos com 280 mm de diâmetro e 25 mm de altura (medidas internas), conforme Figura 2 em anexo;
- discos de arrancamento de 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura, conforme Figura 3 em anexo;
- torquímetro (Figura 4 em anexo) de capacidade mínima de 100 kgf.cm;

### **4 AMOSTRAGEM**

O ensaio de aderência da imprimação leva em consideração a utilização de solos finos, considerando que 95% das partículas passam integralmente na peneira de número 4 (4,75 mm). Após a homogeneização do solo na umidade determinada pelo ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, a amostra deve ser acondicionada em saco plástico hermeticamente fechado e ser levado à câmara úmida por um prazo de 12 horas, no mínimo, antes da compactação, com o intuito de garantir a homogeneização da umidade no solo conforme DNIT 134/2018 - ME.

A compactação do solo pode ser realizada utilizando-se um compactador Marshall manual em moldes cilíndricos com 300 mm de diâmetro (externo) e 25 mm de altura (Figura 2 em anexo). Os discos de arrancamento são de 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura (Figura 3 em anexo). Recomenda-se a realização do ensaio em pelo menos 3 CPs para as mesmas condições de ensaio, ou seja: umidade da base; tipo de material; e taxa.

Deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) homogeneizar o solo na umidade desejada e acondicioná-lo em saco plástico por no mínimo 12 horas;
- b) colocar o solo úmido nos moldes circulares;
- c) moldar os CPs com o auxílio do compactador Marshall manual na energia de compactação indicada no projeto, levando em conta as especificidades do molde circular. A Tabela 2 em anexo pode auxiliar na determinação da energia;
- d) aguardar, em média, 48 horas para a cura do CP;
- e) executar uma varrição da superfície do CP para retirada do pó com o pincel;
- f) aplicar uma irrigação prévia na taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup> de água com uma seringa visando desobstruir os capilares da base;
- g) Aquecer o ligante, se necessário, para que atinja a temperatura indicada na curva de temperatura × viscosidade segundo DNIT 144/014-ES;
- h) realizar a imprimação, após 15 minutos da irrigação prévia segundo a taxa de projeto em l/m<sup>2</sup>;
- i) aguardar a cura da imprimação por um período de 48 horas;
- j) após a cura, colar os discos de arrancamento no CP (até 6 por CP) para o teste de aderência;
- k) aguardar por 30 minutos para a cola secar;
- l) acoplar o torquímetro na parte superior do disco de arrancamento e girá-lo em 1/4 (45°) de volta à velocidade constante, rompendo a camada imprimada (Figura 5 em anexo);
- m) anotar o torque medido.

Observações: Indica-se que o ensaio seja realizado em ambiente com temperatura controlada (25° C) para que tenha homogeneidade nos resultados. Para a adaptação do processo da compactação do molde convencional para o molde cilíndrico adotou-se, como exemplo, o seguinte procedimento: da Equação 1, definida para o cálculo da energia de compactação, obtém-se a Equação 2, para cálculo do número e golpes.

$$Ec = \frac{n \times P \times H}{V} \times N \quad (1)$$

$$n = \frac{Ec \times V}{N \times P \times H} \quad (2)$$

em que:

Ec: energia de compactação [12,93 kg x cm/cm<sup>3</sup>], para a energia intermediária;

P: peso do soquete [4,536 kg];

H: altura de queda [45,7 cm];

N: número de camadas [1].

n: número de golpes; e

V: volume a ser compactado [V = 157 cm<sup>3</sup>].

O que resulta em 10 golpes a serem desferidos no CP para sua compactação. Para que se tenha maior acurácia orienta-se que seja feito o controle geométrico do CP para que o mesmo atinja a mesma densidade seca máxima determinada no ensaio de compactação segundo a norma DNER-ME162/1994.

## 5 RESULTADOS

O valor final da aderência deve ser àquele obtido a partir de seis discos arrancados em pelo menos 3 CPs ensaiados para uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante, a serem realizados no mesmo dia.

Quanto aos resultados, sugere-se o valor mínimo de 200kPa para aceitação quanto à aderência da imprimação, ou seja, tendo em vista a falta de valores comparativos para avaliar a aderência da camada imprimada de pavimentos asfálticos, o valor citado faz referência o valor médio obtido do arrancamento de revestimentos de argamassas à base de cimento e areia. Nesses materiais os valores de aderência são da ordem de 200kPa (equivalendo ao torque de 34,0 kgf.cm) segundo a NBR 13528 (2010).

Tashman (2008), quando estabelece em sua pesquisa a Equação 3 para determinar a força de ligação interfacial entre camadas de misturas asfálticas sobrepostas, indica valores em torno de 400kPa (aproximadamente 70,0 kgf.cm de torque), o que sugere coerência no valor proposto para indicar o comportamento satisfatório da base imprimada. Com tudo, esse valor indica que a base atingiu um nível de cura mínimo para se prosseguir com o serviço de pavimentação.

$$\tau = \frac{12 \times M \times 10^6}{\pi \times D^3} \quad (3)$$

Onde:

M – torque medido em N.m;

D – diâmetro do disco de arrancamento em mm;

$\tau$  – força de ligação interfacial em kPa.

Almeida (2016), ao avaliar 5 ligantes, sendo 4 ligantes comerciais e 1 alternativo para imprimação, verificou que os valores de aderência mínimo de 200kPa foi satisfatório para gerar um comportamento adequado na base imprimada.

Caso contrário, se pelo menos um dos valores encontrados ficarem abaixo de 200kPa após 24 horas, indica-se aguardar um tempo adicional a fim de que a imprimação atinja 200kPa. Adotando-se esse período como tempo mínimo para indicar a aderência adequada da imprimação.

**ANEXO NORMATIVO**

Figura 1 – Compactador Marshall manual



Figura 2 – Moldes circulares (CP)s

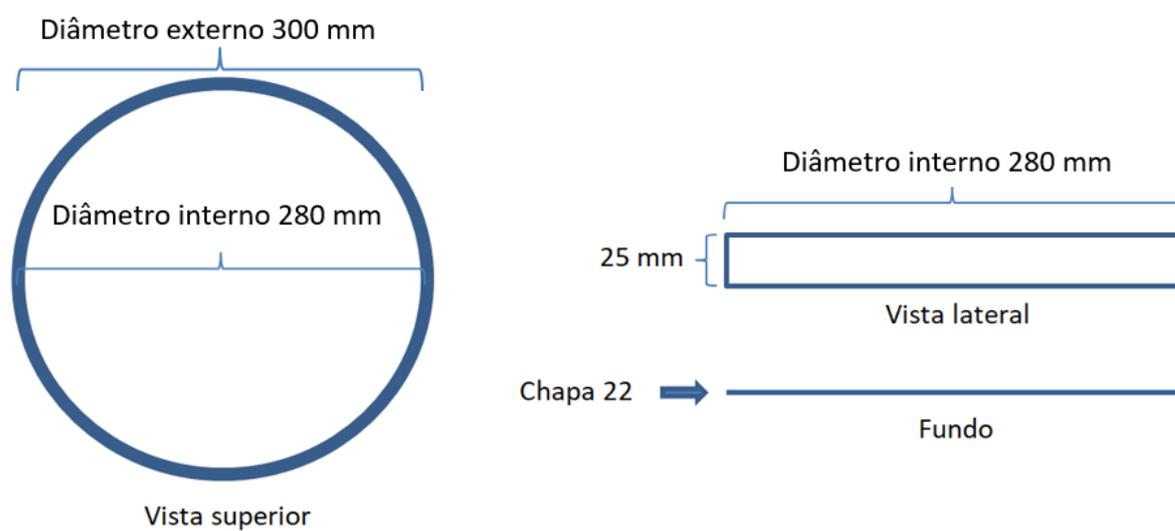


Figura 3 – Discos de aderência por arrancamento, sendo (1) 40 mm e (2) 50 mm.

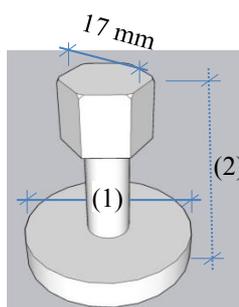


Figura 4 – Torquímetro genérico com capacidade mínima de 100 kgf.cm



Figura 5 – Exemplo de colagem e arrancamento



a) Torquímetro



b) Detalhe do rompimento

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios de compactação com os cilindros convencional e moldes circulares.

Características	Cilindro	
	Proctor	Molde circular
Diâmetro médio (cm)	15	28
Altura útil média do CP (cm)	12,6	2,5
Peso do soquete (kg)	4,45	4,54
Altura de queda (cm)	45,72	
Número de camadas	cinco	uma
Número de golpes	26	10
Energia (kg.cm/cm <sup>3</sup> )	12,93	12,93

## **APÊNDICE E (DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO WTAT DA BASE IMPRIMADA)**

### **PROPOSIÇÃO DE INSTRUÇÃO METODOLÓGICA PARA A DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO WTAT DA BASE IMPRIMADA**

#### **1 DEFINIÇÃO**

A abrasão da imprimação é caracterizada pelo desgaste sofrido pela superfície da imprimação quando do tráfego liberado momentaneamente antes da aplicação do revestimento, e que tem suas propriedades de resistência à abrasão ampliada pela porção do solo penetrada pela imprimação. Dessa forma, verifica-se que imprimação funciona como um agente potencializador da resistência à abrasão. Assim, O WTAT (Wet Track Abrasion Test) tem o objetivo de verificar a perda por abrasão da superfície imprimada causada pela peça de desgaste que simula a passagem dos veículos.

#### **2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS**

Para aplicação desta Especificação de Serviço são indispensáveis os seguintes documentos:

- a) Almeida, F. D. Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017.
- b) ABNT NBR 14746 Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica - Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comissão de Estudo de Asfalto, 2014.
- c) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA DNIT 144/2014 - ES. Pavimentação - Imprimação com Ligante Asfáltico. Especificação de serviço. 7 páginas.
- d) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 041/94 - Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização.
- e) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 162/94. Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.

- f) Ishai, I.; Livneh, M., Functional and Structural Role of Prime Coat in Asphalt. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, Scottsdale - AZ, 1984.
- g) Tashman, L.; Nam, K.; Papagiannakis, A. T., Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers. (No. WARD 645.1). Washington State Department of Transportation, 2006.

### **3 APARELHAGEM E MATERIAL**

Aparelhagem e materiais necessários:

- seringas descartáveis de 20 ml, para aplicação do ligante betuminoso e da irrigação prévia;
- pincel com cerdas médias para limpeza prévia da superfície a ser imprimada;
- cronômetro, para controle do tempo decorrido entre a irrigação prévia e o início da aplicação do ligante betuminoso;
- cerca de 2200 g de solo umedecido, de acordo com o determinado no ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, para cada CP moldado no molde circular;
- ligantes asfálticos utilizados no ensaio;
- estufa ou mesa aquecedora, para aquecimento dos ligantes;
- termômetro, para controle da temperatura de aplicação dos ligantes betuminosos;
- moldes cilíndricos com 280 mm de diâmetro e 25 mm de altura (medidas internas), conforme Figura 1 em anexo;
- compactador Marshall manual, conforme Figura 2 em anexo.
- equipamento de desgaste WTAT (Wet Track Abrasion Test) (Figura 3 em anexo) conforme NBR 14746 vigente;

### **4 AMOSTRAGEM**

O ensaio de abrasão WTAT da imprimação leva em consideração a utilização de solos finos, considerando que 95% das partículas passam integralmente na peneira de número 4 (4,75 mm). Após a homogeneização do solo na umidade determinada pelo ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, a amostra deve ser acondicionada em saco plástico hermeticamente fechado e ser levado à câmara úmida por um prazo de 12 horas, no mínimo,

antes da compactação, com o intuito de garantir a homogeneização da umidade no solo conforme DNIT 134/2018 - ME.

A compactação do solo pode ser realizada utilizando-se um compactador Marshall manual em moldes cilíndricos com 300 mm de diâmetro (externo) e 25 mm de altura (Figura 1 em anexo). Recomenda-se a realização do ensaio em pelo menos 3 CPs para as mesmas condições de ensaio, ou seja: umidade da base; tipo de material; e taxa.

Em resumo deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) homogeneizar o solo na umidade desejada e acondicioná-lo em saco plástico por no mínimo 12 horas;
- b) colocar o solo úmido nos moldes circulares;
- c) moldar os CPs com o auxílio do compactador Marshall manual na energia de compactação indicada no projeto, levando em conta as especificidades do molde circular. A Tabela 2 em anexo pode auxiliar na determinação da energia;
- d) aguardar, em média, 48 horas para a cura do CP;
- e) executar uma varrição da superfície do CP para retirada do pó com o pincel;
- f) aplicar uma irrigação prévia na taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup> de água com uma seringa visando desobstruir os capilares da base;
- g) Aquecer o ligante, se necessário, para que atinja a temperatura indicada na curva de temperatura × viscosidade segundo DNIT 144/014-ES;
- h) realizar a imprimação, após 15 minutos da irrigação prévia segundo a taxa de projeto em l/m<sup>2</sup>;
- i) aguardar a cura da imprimação por um período de 48 horas;
- j) pesar os moldes imprimados e curados obtendo assim P1;
- k) colocar os moldes no equipamento WTAT e deixá-lo pelo tempo indicado na tabela 1 (em anexo) a depender do modelo do misturador;
- l) retirar o molde ao fim do ensaio e pesá-lo novamente obtendo P2.

Observações: Os ensaios utilizados para esta avaliação foram baseados em metodologias adotadas em avaliações de microrrevestimento asfáltico. Dessa forma, foram necessárias algumas modificações para adequação à realidade encontrada na superfície imprimada, quais sejam: a) o ensaio de cone não foi utilizado no caso da avaliação da imprimação; b) foi realizado o ensaio de abrasão WTAT sem a presença de água na verificação da imprimação. As características da peça de abrasão foram mantidas.

Indica-se que o ensaio seja realizado em ambiente com temperatura controlada (25° C) para que tenha homogeneidade nos resultados.

Para a adaptação do processo da compactação do molde convencional para o molde cilíndrico adotou-se, como exemplo, o seguinte procedimento: da Equação 1, definida para o cálculo da energia de compactação, obtém-se a Equação 2, para cálculo do número e golpes.

$$Ec = \frac{n \times P \times H}{V} \times N \quad (1)$$

$$n = \frac{Ec \times V}{N \times P \times H} \quad (2)$$

em que:

Ec: energia de compactação [12,93 kg x cm/cm<sup>3</sup>], para a energia intermediária;

P: peso do soquete [4,536 kg];

H: altura de queda [45,7 cm];

N: número de camadas [1].

n: número de golpes; e

V: volume a ser compactado [V = 157 cm<sup>3</sup>].

O que resulta em 10 golpes a serem desferidos no CP para sua compactação. Para que se tenha maior acurácia orienta-se que seja feito o controle geométrico do CP para que o mesmo atinja a mesma densidade seca máxima determinada no ensaio de compactação segundo a norma DNER-ME162/1994.

## 5 RESULTADOS

O valor final da abrasão deve ser àquele obtido a partir da média dos resultados de pelo menos 3 CPs ensaiados para uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante, a serem realizados no mesmo dia.

Para os resultados da abrasão sugere-se o valor máximo de desgaste segundo a norma ISSA TB-100/90, que estabelece, para o microrrevestimento, o limite máximo de perda por abrasão da amostra de 538,0 g/m<sup>2</sup>.

O valor da perda por abrasão em gramas (P) para cada corpo de prova ensaiado pode ser encontrado a partir da Equação 3:

$$P = P_1 - P_2 \quad (3)$$

Onde:

P1 – peso obtido antes do ensaio (g);

P2 – peso obtido depois do ensaio (g);

Para o valor expresso em  $\text{g/m}^2$  basta dividir o valor P encontrado pelo fator de área indicado na tabela 1 em anexo a depender do tipo de equipamento utilizado.

No caso de reprovação das amostras testadas indica-se realizar os ajustes necessários, tais como: verificação de taxa de imprimação, alteração da energia de compactação, mudança do material de base, mudança do ligante, etc. E repetir o procedimento de ensaio até que se chegue ao resultado satisfatório.

**ANEXO NORMATIVO**

Figura 1 – Moldes circulares (CP)s

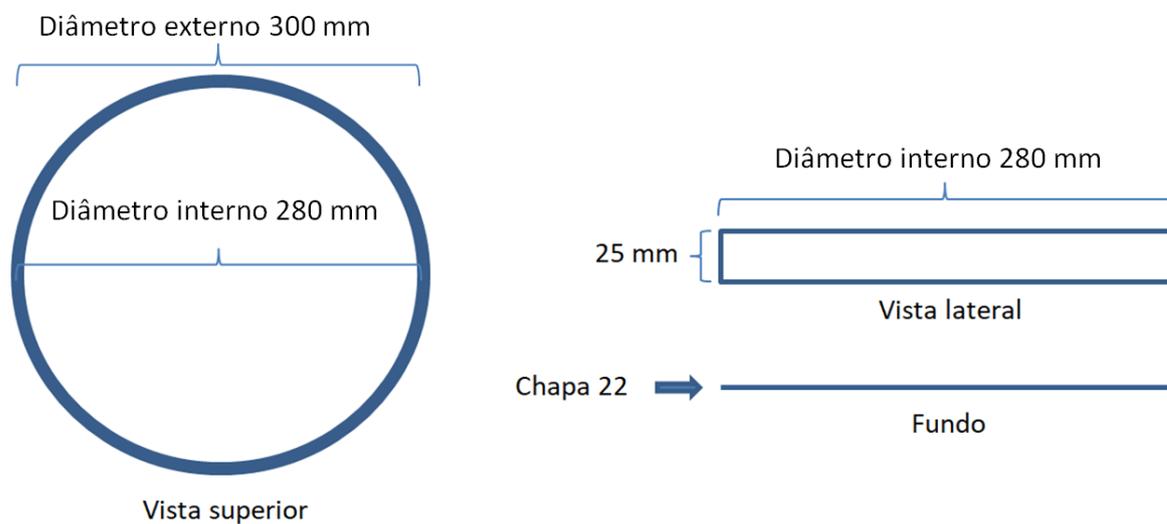


Figura 2 – Compactador Marshall manual

Figura 3 – Equipamento W.T.A.T (*Wet Track Abrasion Test*)

Tabela 1 – Tempos de operação e fatores de área

Misturadora	Tempo de operação equivalente (s)	Fator de área (m <sup>2</sup> )
C-100	300 (□ 2)	32,9 × 1,0
A-120	405 (□ 2)	29,9 × 1,17
N-50	315 (□ 2)	37,5 × 0,78

Fonte: ABNT NBR 14746

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios de compactação com os cilindros convencional e moldes circulares.

Características	Cilindro	
	Proctor	Molde circular
Diâmetro médio (cm)	15	28
Altura útil média do CP (cm)	12,6	2,5
Peso do soquete (kg)	4,45	4,54
Altura de queda (cm)	45,72	
Número de camadas	cinco	uma
Número de golpes	26	10
Energia (kg.cm/cm <sup>3</sup> )	12,93	12,93

## **APÊNDICE F (DETERMINAÇÃO DO DESGASTE LWT DA BASE IMPRIMADA)**

### **PROPOSIÇÃO DE INSTRUÇÃO METODOLÓGICA PARA A DETERMINAÇÃO DA DESGASTE LWT DA BASE IMPRIMADA**

#### **1 DEFINIÇÃO**

O ensaio de LWT (Loaded Wheel Test) tem o objetivo de aferir, a partir do número de passadas de roda e de um carregamento padrão, o afundamento em trilha de roda (ATR) da camada de base, representando o desgaste sofrido pela superfície da imprimação quando o tráfego é liberado antes da aplicação do revestimento, ou seja, simulando a ação do tráfego sobre a base imprimada. Nesse sentido, com o intuito de melhorar as propriedades de resistência da base é realizada a imprimação que ao causar o endurecimento da superfície da base associado à porção do solo penetrada pela imprimação.

#### **2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS**

Para aplicação desta Especificação de Serviço são indispensáveis os seguintes documentos:

- a) Almeida, F. D. Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017;
- b) ABNT NBR 14841 Microrrevestimentos a frio - Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina (LWT) (Loaded Wheel Test). Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comissão de Estudo de Asfalto, 2015;
- c) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA DNIT 144/2014 - ES. Pavimentação - Imprimação com Ligante Asfáltico. Especificação de serviço;
- d) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 041/94 - Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização;

- e) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. NORMA DNER-ME 162/94. Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas;
- f) Duque Neto, F. S., Proposição de Metodologia para Escolha de Solo e Dosagem de Antipó com Emulsão de Xisto. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

### **3 APARELHAGEM E MATERIAL**

Aparelhagem e materiais necessários:

- seringas descartáveis de 20 ml, para aplicação do ligante betuminoso e da irrigação prévia;
- pincel com cerdas médias para limpeza prévia da superfície a ser imprimada;
- cronômetro, para controle do tempo decorrido entre a irrigação prévia e o início da aplicação do ligante betuminoso;
- cerca de 700 g de solo umedecido, de acordo com o determinado no ensaio de compactação conforme DNER-ME 162/94, para cada CP retangular que se pretende moldar;
- ligantes asfálticos utilizados no ensaio;
- estufa ou mesa aquecedora, para aquecimento dos ligantes;
- termômetro, para controle da temperatura de aplicação dos ligantes betuminosos;
- equipamento de desgaste LWT (Figura 1 em anexo), conforme NBR 14841 vigente;
- molde retangular com 380 mm de comprimento por 50 mm de largura (internos) e 25 mm de altura, conforme Figura 2 em anexo;
- peça de apoio, em madeira tipo maçaranduba limpa, para o soquete de compactação, conforme Figura 3 em anexo;
- compactador Marshall manual, conforme Figura 4 em anexo;
- paquímetro de centro conforme Figura 5 em anexo.

### **4 AMOSTRAGEM**

O ensaio de desgaste LWT leva em consideração a utilização de solos finos, considerando que 95% das partículas passam integralmente na peneira de número 4 (4,75 mm). Após a homogeneização do solo na umidade determinada pelo ensaio de compactação conforme

DNER-ME 162/94, a amostra deve ser acondicionada em saco plástico hermeticamente fechado e ser levado à câmara úmida por um prazo de 12 horas, no mínimo, antes da compactação, com o intuito de garantir a homogeneização da umidade no solo conforme DNIT 134/2018 - ME.

Recomenda-se a realização do ensaio em pelo menos 3 CPs para as mesmas condições de ensaio, ou seja: umidade da base; tipo de material; e taxa. A compactação do solo pode ser realizada utilizando-se um compactador Marshall manual com auxílio do apoio em madeira para compactação (Figura 3 em anexo) em moldes retangulares com 380 mm de comprimento por 50 mm de largura (internos) e 25 mm de altura (Figura 2 em anexo).

Em resumo deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) homogeneizar o solo na umidade desejada e acondicioná-lo em saco plástico por no mínimo 12 horas;
- b) colocar o solo úmido nos moldes retangulares;
- c) moldar as amostras com um compactador Marshall manual com auxílio do apoio em madeira para compactação (Figura 3 em anexo) na energia de compactação indicada no projeto, levando em conta as especificidades do cilindro. A Tabela 2 em anexo pode auxiliar na determinação da energia;
- d) aguardar, em média, 48 horas para a cura do CP;
- e) executar uma varrição da superfície do CP para retirada do pó com o pincel;
- f) aplicar uma irrigação prévia na taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup> de água com uma seringa visando desobstruir os capilares da base;
- g) Aquecer o ligante, se necessário, para que atinja a temperatura indicada na curva de temperatura × viscosidade segundo DNIT 144/014-ES;
- h) realizar a imprimação, após 15 minutos da irrigação prévia segundo a taxa de projeto em l/m<sup>2</sup>;
- i) aguardar a cura da imprimação por um período de 48 horas;
- j) medir a altura da base em relação ao molde com o auxílio de um paquímetro (Figura 5 em anexo) em cinco pontos equidistantes antes do início do ensaio para acompanhar o ATR durante o ensaio, conforme Figura 6 em anexo;
- k) colocar a amostra no equipamento LWT e deixá-lo por 1000 ciclos, medindo o ATR a cada 100 ciclos;
- l) retirar o molde no fim do ensaio e medir a altura da base em relação ao molde com o auxílio de um paquímetro nos mesmos cinco pontos equidistantes medidos antes do ensaio (Figura 6 e anexo), obtendo-se o ATR total após o fim do ensaio (1000 ciclos).

m) traçar o gráfico de ATR das amostras ensaiadas conforme Figura 7 em anexo.

Observações: os ensaios utilizados para esta avaliação foram baseados em metodologias adotadas em avaliações de microrrevestimento asfáltico. Dessa forma, foram necessárias algumas modificações para adequação à realidade encontrada na superfície imprimada, onde o ensaio de adesão de areia não se aplica à técnica da imprimação e, portanto não é utilizada no caso do uso do LWT.

Indica-se que o ensaio seja realizado em ambiente com temperatura controlada (25° C) para que tenha homogeneidade nos resultados. Para a adaptação do processo da compactação do molde convencional para o molde retangular LWT, utiliza-se: Equação 1 - para o cálculo da energia de compactação e Equação 2 - para cálculo do número e golpes.

$$Ec = \frac{n \times P \times H}{V} \times N \quad (1)$$

$$n = \frac{Ec \times V}{N \times P \times H} \quad (2)$$

em que:

Ec: energia de compactação [12,93 kg × cm/cm<sup>3</sup>], para a energia intermediária;

P: peso do soquete [4,54 kg];

H: altura de queda [45,7 cm];

N: número de camadas [uma camada].

n: número de golpes; e

V: volume do CP [V = 190 cm<sup>3</sup>].

O que resulta em 13 golpes a serem desferidos no CP para sua compactação. Para que se tenha maior acurácia orienta-se que seja feito o controle geométrico do CP para que o mesmo atinja a mesma densidade seca máxima determinada no ensaio de compactação segundo a norma DNER-ME162/1994.

## 5 RESULTADOS

O valor final do afundamento deve ser àquele obtido a partir da diferença entre os resultados das medidas realizadas antes e depois do ensaio em todos os moldes ensaiados. Sendo, o resultado final do afundamento a média dos resultados dos CPs utilizados (pelo menos 3 CPs), em uma mesma condição de ensaio, material de base e taxa de aplicação do ligante e a

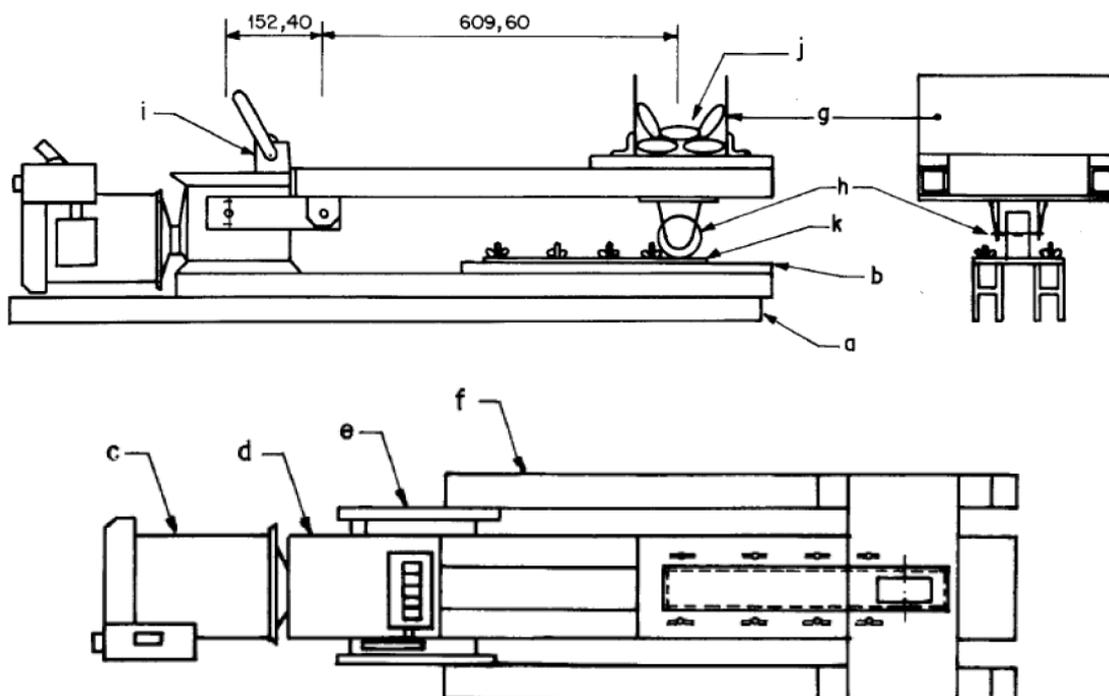
serem realizados no mesmo dia. Depois plota-se um gráfico como exemplificado na Figura 7 em anexo

Quanto aos resultados, são indicadas notas que vão de 0 a 3 e levam em consideração: a) afundamento; b) exsudação; c) afundamentos e arrancamentos d) destruição total da peça. Onde, são atribuídos conceitos que vão de conforme a não conforme, segundo a Tabela 1 em anexo.

Assim, serão aceitos os materiais testados que passarem pelo ensaio e que tenham resultado conforme.

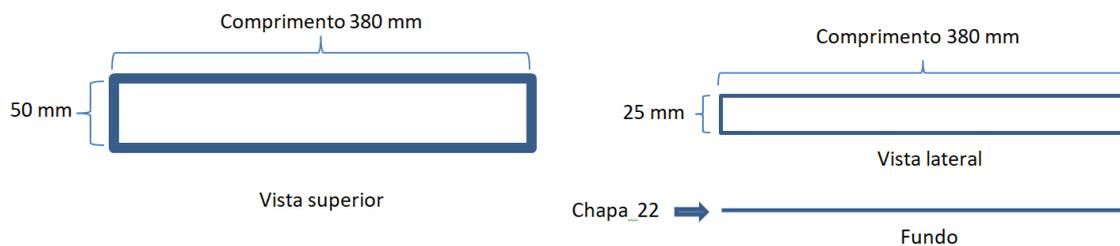
## ANEXO NORMATIVO

Figura 1 – Equipamento LWT



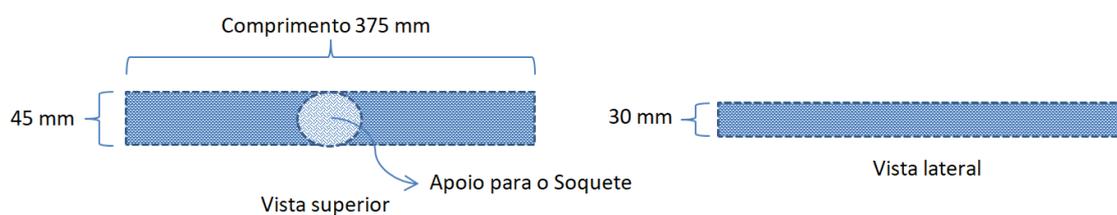
- (9) dispositivo fixador ajustável para o corpo de prova (CPs);
- (10) base para os CPs;
- (11) motor de 1/3 hP com 1.750 rpm;
- (12) redutor de engrenagens com saídas horizontais e relação de redução de 40:1;
- (13) discos excêntricos com 150 mm de diâmetro;
- (14) haste de conexão ajustável;
- (15) compartimento para carga ajustado em cima da roda;
- (16) roda de borracha com dureza Shore A de 60 a 70 com 76,2 mm de diâmetro e 25,4 mm de largura fixada em chassis de aço;
- (17) contador de ciclos com ajuste de zero;
- (18) bolsas com esferas de chumbo compondo um total de 56 kg;
- (19) chapas de aço galvanizado para montagem de amostras com espessura de 0,6 mm com 76,0 mm de largura e 400 mm de comprimento, ambas as medidas externas.

Figura 2 – Molde retangular (CP)



Observação: medidas internas.

Figura 3 – Apoio em madeira para o soquete de compactação



Observação: medidas externas.

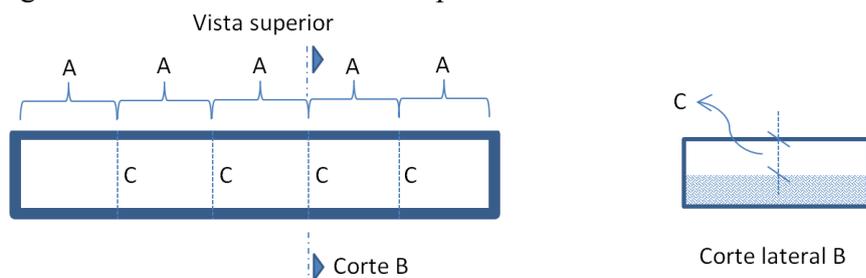
Figura 4 – Compactador Marshall manual



Figura 5 – Paquímetro de centro genérico



Figura 6 – Detalhe da medida dos pontos de controle do afundamento



A = ~ 76 mm

C = Medidas de controle do afundamento

Figura 7 – Exemplo de gráfico das medidas de ATR durante o ensaio

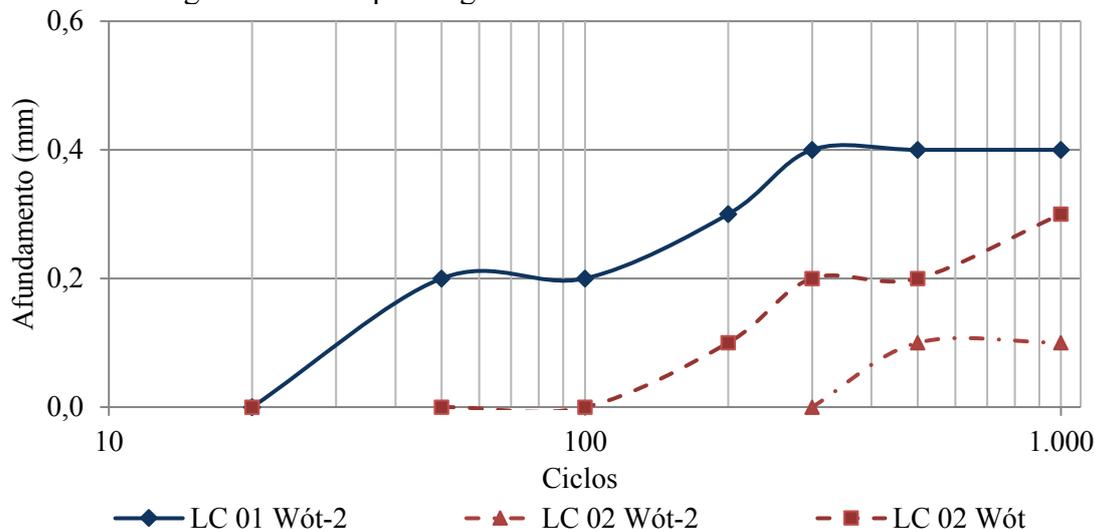


Tabela 1 – Atribuições para a amostra no ensaio LWT – base imprimada.

Notas	Conceitos	Observações visuais	ATR (mm)
3	Conforme	Sem defeitos, pouco desgaste, ausência de exsudação	< 2,0
2	Conforme com necessidade de correções	Poucos defeitos, arrancamento de até 40% da penetração, pequena exsudação, aparecimento de lombadas sem arrancamento de placas	2,0 a 4,0
1	Não conforme com necessidade de correções	Arrancamento acima de 40% da penetração, arrancamento nas partidas, exsudação, aparecimento de lombadas com arrancamento de placas	4,0 a 6,0
0	Não conforme	Destruição total pela penetração	> 6,0

Fonte: Adaptado de Duque Neto (2004)

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios de compactação com moldes retangulares LWT.

Características	Molde retangular
Largura interna (cm)	5
Comprimento interno (cm)	38
Altura útil média do CP (cm)	2,5
Peso do soquete (kg)	4,54
Altura de queda (cm)	45,72
Número de camadas	uma
Número de golpes	13
Energia (kg.cm/cm <sup>3</sup> )	12,93

## ANEXO A – CHECKLIST: IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA

Neste documento são encontradas perguntas sobre os procedimentos gerais e específicos do serviço de imprimação. Por favor, responda com responsabilidade! Os resultados desses questionamentos são de fundamental importância para o entendimento do que foi realizado em campo. E, além disso, servirão de base para obter um serviço satisfatório.

Marque a opção correta, ou descreva o que for necessário.

Trecho: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

1. Qual a distância de transporte entre a refinaria e o canteiro de serviço? _____	
2. Qual a temperatura ambiente do local da obra, no momento da aplicação da imprimação? _____	
3. Qual o tipo de ligante para imprimação que está sendo utilizado? _____	
4. O certificado de análise do ligante para imprimação existe? Se SIM, anexá-lo a este <i>check list</i> .	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
5. Existe ligante em quantidade suficiente para a etapa de serviço que se pretende executar?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
6. Existem desvios do tráfego no trecho?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
7. Os equipamentos envolvidos no serviço foram testados e estão funcionando a contento?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
8. Está chovendo ou na iminência de ocorrer?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>9. Condições climáticas</b> Temp. mínima prevista: _____ °C      Temp. máxima prevista: _____ °C Ocorreu chuva durante o serviço: <input type="checkbox"/> Sim (duração: _____ min) <input type="checkbox"/> Não Intensidade da chuva: <input type="checkbox"/> leve (até 2,5 mm/h) <input type="checkbox"/> moderada (de 2,5 a 13 mm/h) <input type="checkbox"/> forte (acima de 13 mm/h) Observações: _____ _____	
10. A base está completamente compactada?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
11. A imprimação ocorreu imediatamente após a compactação? Se NÃO, quanto tempo depois? _____	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
12. A varrição da superfície da base foi realizada?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>13. Como foi realizada a varrição?</b> Vassoura mecânica <input type="checkbox"/> Jato de ar <input checked="" type="checkbox"/> Manualmente <input type="checkbox"/>	
14. Depois da base varrida foi efetuada uma passada de um rolo pneumático?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
15. Foi realizada uma irrigação prévia (borrifo) da base antes da imprimação?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não

<b>16.</b> Qual a taxa de irrigação prévia aplicada antes de se iniciar o serviço da imprimação? _____	
<b>17.</b> O caminhão espargidor de água foi calibrado e testado?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>18.</b> A água utilizada é potável e livre de minerais reativos?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>19.</b> Qual a temperatura do ligante asfáltico utilizado? _____	
<b>20.</b> Qual a taxa de aplicação de ligante utilizada para imprimação? Foi definida em campo <input type="checkbox"/> Foi definida em laboratório <input type="checkbox"/> Taxa de (l/m <sup>2</sup> ): _____	
<b>21.</b> Foi realizado o ensaio de verificação de taxa em campo (bandeja)? Se SIM, qual a taxa em l/m <sup>2</sup> ?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não Taxa: _____
<b>22.</b> A imprimação ocorreu na largura total da pista no mesmo turno de trabalho?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>23.</b> O caminhão espargidor de ligante foi calibrado e testado?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>24.</b> O caminhão espargidor de água foi calibrado e testado?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>25.</b> Os bicos do caminhão espargidor de ligante estavam entupidos? Se SIM, foram desentupidos?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>26.</b> Os bicos do espargidores foram verificados ao longo da aplicação?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>27.</b> Qual o tempo de exposição da base imprimada ao tráfego, depois da efetiva cura? _____	
<b>28.</b> Foram apontadas falhas de imprimação? Se SIM, quais foram? – falha de bico <input type="checkbox"/> – excesso de ligante <input type="checkbox"/> – não mediu a taxa <input type="checkbox"/> – temperatura inadequada <input type="checkbox"/> – sobreposição de passada <input type="checkbox"/> – outra _____ Qual medida corretiva foi adotada? _____	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
<b>29.</b> Foram utilizados papéis ou lonas nas transições para evitar sobreposição de taxa?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não

## ANEXO B – FICHA DE CONTROLE DE CAMPO – SERVIÇO DE IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA



### FORMULÁRIO DE IMPRIMAÇÃO

Entrada de Acesso: \_\_\_\_\_

1. Qual o imprimante que está sendo utilizado?

ADP CM-30

EAI

Outro: \_\_\_\_\_

2. Antes da aplicação da imprimação, procedeu-se a varrição da camada de base?

SIM

NÃO

Observação: \_\_\_\_\_

3. Antes da aplicação da imprimação, procedeu-se a irrigação prévia da camada de base?

SIM

NÃO

Em caso positivo, qual a taxa utilizada (l/m<sup>2</sup>)? \_\_\_\_\_

4. Qual a taxa de aplicação da imprimação?

0,8 l/m<sup>2</sup>

1,0 l/m<sup>2</sup>

1,2 l/m<sup>2</sup>

Outra

Observação: \_\_\_\_\_

5. Foi observada a ocorrência de falhas durante o processo de imprimação?

SIM

NÃO

Em caso positivo, qual(is) a(s) falha(s) observada(s):

– falha de bico  – excesso de ligante  – não mediu a taxa

– temperatura inadequada  – sobreposição de passada

– outra \_\_\_\_\_

Informar quais as medidas de correção adotadas: \_\_\_\_\_

6. Foi utilizado algum controle de taxa em campo durante a imprimação?

SIM NÃO 

Em caso positivo, informar a(s) medida(s) de controle: \_\_\_\_\_

## ANEXO C – MAPA MENTAL: IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA

