



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

FERNANDO DÁCIO DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO, COESÃO, ADERÊNCIA E DESGASTE
SUPERFICIAL DE LIGANTES ALTERNATIVOS E COMERCIAIS PARA
APLICAÇÃO NA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DE RODOVIAS**

FORTALEZA

2017

FERNANDO DÁCIO DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO, COESÃO, ADERÊNCIA E DESGASTE
SUPERFICIAL DE LIGANTES ALTERNATIVOS E COMERCIAIS PARA APLICAÇÃO
NA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DE RODOVIAS

Dissertação 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 Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. D. Eng. Suelly Helena de Araújo Barroso

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A446a Almeida, Fernando Dácio de.
Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias / Fernando Dácio de Almeida. – 2017.
170 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Pavimentação. 2. Imprimação. 3. Sustentabilidade. 4. D-limoneno. I. Título.

CDD 388|

FERNANDO DÁCIO DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO, COESÃO, ADERÊNCIA E DESGASTE
SUPERFICIAL DE LIGANTES ALTERNATIVOS E COMERCIAIS PARA APLICAÇÃO
NA IMPRIMAÇÃO BETUMINOSA DE RODOVIAS

Dissertação 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 Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovado em: 23 / 03 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. PhD. Jorge Barbosa Soares - Examinador Interno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Pesquisador, PhD. Luis Alberto Hermann do Nascimento - Examinador Externo
Petrobras/Cenpes

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.

À minha filha, Yasmin Maria, 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 LMP/UFC que fizeram desta etapa da minha vida algo inesquecível. Sem vocês essa trajetória não teria sido tão prazerosa! Aos que colaboraram ao me fornecer as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho: Márcio Anderson, Synardo Leonardo, Sérgio Alexandre e Juceline. Também sou grato às empresas parceiras, 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

No Brasil, geralmente utiliza-se o asfalto diluído de petróleo do tipo Cura Média (CM-30) para serviços de imprimação betuminosa. Tem-se verificado em países desenvolvidos uma maior restrição na utilização do CM-30 na imprimação, por ele ser considerado poluente ao meio ambiente devido à própria manipulação do material betuminoso, bem como a emissão de hidrocarbonetos orgânicos voláteis. Na área de pavimentação, verifica-se pouca informação sobre o comportamento dos produtos comerciais e alternativos para emprego em imprimação, destacando-se a necessidade de se desenvolver estudos sobre o desempenho de ligantes alternativos menos poluentes que venham, no futuro, substituir o CM-30. Sendo assim, o objetivo geral desta dissertação foi investigar o comportamento de ligantes comerciais e alternativo para o emprego em serviços de imprimação betuminosa. Para tanto, foram avaliados os parâmetros de penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de uma base imprimada, com solo arenoso, usando-se: (i) um ligante comercial de referência do tipo CM-30, (ii) um ligante alternativo produzido em laboratório a partir da mistura de um CAP com D-limoneno, óleo vegetal obtido a partir de cascas de frutas cítricas e (iii) três ligantes comerciais. De forma geral, para a base arenosa testada, o ligante alternativo com D-limoneno apresentou resultados promissores quando comparado aos ligantes de referência e comerciais para todos os parâmetros avaliados. Concluiu-se que o ligante alternativo pode representar uma alternativa ambientalmente mais autossustentável por utilizar óleo vegetal como solvente em substituição ao solvente betuminoso usado na produção do CM-30.

Palavras-chave: Pavimentação, Imprimação, Sustentabilidade, D-limoneno, CM-30.

ABSTRACT

In Brazil, the cutback of Medium Cure (CM-30) is usually used for bituminous primer services. In developed countries, there has been a greater restriction on the use of the CM-30 in the primer because it is considered damaging to the environment due to the very manipulation of bituminous material as well as the emission of volatile organic hydrocarbons. In the pavement area, little information is available on the behavior of commercial and alternative products for the use in bituminous primer services, the need to develop studies on alternative materials, less polluting cutbacks that may in the future replace the CM-30. The general objective of this research was to investigate the behavior of commercial cutbacks and alternative cutbacks for the use in services of bituminous primer. For this purpose, the parameters of penetration, cohesion, adhesion and surface wear of a primed base with sandy soil were evaluated using: (i) a commercial reference cutback of type CM-30, (ii) An alternative cutback produced in the laboratory from the blend of a CAP with D-limonene, a vegetable oil obtained from citrus peel; and (iii) three commercial cutbacks. In general, for the sandy base tested, the alternative cutback with D-limonene showed promising results when compared to reference and commercial cutbacks for all evaluated parameters. It was concluded that the alternative cutback may represent an environmental friendly alternative using vegetable oil as solvent instead of the solvent used in CM-30 production.

Keywords: Pavimentation, Primer, Sustainability, D-Limonene, CM-30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da malha rodoviária brasileira.....	1
Figura 2 - Fotografia de uma emulsão asfáltica sob um filtro vermelho.....	17
Figura 3 - Penetração da imprimação em base granular compactada.....	25
Figura 4 - <i>Ancona Shear Testing Research and Analysis – ASTRA</i>	33
Figura 5 - Ensaio de aderência com o equipamento DIPEA adaptado de Pereira (2002).....	34
Figura 6 - Detalhes do ensaio de cisalhamento direto <i>Leutner</i>	35
Figura 7 - Detalhe do ensaio: <i>Torque Bond Tester</i>	36
Figura 8 - Resumo Esquemático dos Ensaios de Avaliação da Imprimação.....	43
Figura 9 - Resumo da Metodologia	44
Figura 10 - Localização geográfica e aspecto visual do solo coletado.....	45
Figura 11 - Produção do ADP alternativo CAP/D-limoneno (LA).....	49
Figura 12 - Detalhes da moldagem do solo nas cápsulas	50
Figura 13 - Comparação entre o cilindro Marshall e a Cápsula	51
Figura 14 - Verificação da penetração e de sua leitura no método da cápsula.....	52
Figura 15 - Procedimentos de imprimação com o CM-30	53
Figura 16 - Avaliação da coesão superficial com o coesímetro	56
Figura 17 - Compactação das placas para o ensaio de aderência e WTAT.....	58
Figura 18 - Ensaio de aderência por meio da resistência ao arrancamento da base imprimada	59
Figura 19 - Equipamentos para avaliação do desgaste superficial	61
Figura 20 - Esquema do programa experimental adotado para avaliar a penetração da imprimação	62
Figura 21 - Perda da umidade de moldagem - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)	69
Figura 22 - Resumo dos resultados de penetração na Cápsula e no Marshall.....	70
Figura 23 - Penetração do LR - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)	71
Figura 24 - Penetração do LA - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)	72

Figura 25 - Penetração do LC 01 - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2).....	73
Figura 26 - Penetração do LC 02 - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2).....	74
Figura 27 - Penetração do LC 03 - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2).....	75
Figura 28 - Penetração obtida pelo método da Cápsula de todos os ligantes na taxa de 0,8 L/m ² nas três umidades de moldagem	76
Figura 29 - Penetração obtida pelo método da Cápsula de todos os ligantes na taxa de 1,0 L/m ² nas três umidades de moldagem	76
Figura 30 - Penetração obtida pelo método da Cápsula de todos os ligantes na taxa de 1,2 L/m ² nas três umidades de moldagem	77
Figura 31 - Representação gráfica da penetração do LA à taxa de 1,2 L/m ² e nas três umidades de moldagem.....	77
Figura 32 - Penetração dos ligantes pelo método da cápsula para ranqueamento.....	79
Figura 33 - Penetração dos ligantes no cilindro Marshall	81
Figura 34 - Coesão das amostras na taxa de 0,8 L/m ² nas três umidades de moldagem.....	82
Figura 35 - Coesão das amostras na taxa de 1,0 L/m ² nas três umidades de moldagem.....	82
Figura 36 - Coesão das amostras na taxa de 1,2 L/m ² nas três umidades de moldagem.....	82
Figura 37 - Coesão dos ligantes.....	83
Figura 38 - Coesão × Penetração para o LR sob diferentes taxas de aplicação e umidades	85
Figura 39 - Coesão × Penetração para o LA sob diferentes taxas de aplicação e umidades	87
Figura 40 - Coesão × Penetração para o LC 01 sob diferentes taxas de aplicação e umidades ...	90
Figura 41 - Coesão × Penetração para o LC 02 sob diferentes taxas de aplicação e umidades ...	91
Figura 42 - Coesão × Penetração para o LC 03 sob diferentes taxas de aplicação e umidades ...	92
Figura 43 - Superfície do CP com exsudação para o ensaio de coesão com o ligante LC 03 ..	92
Figura 44 - Resumo dos Resultados de Deformação e Torque de Ruptura.....	94
Figura 45 - Ângulo de ruptura da camada imprimada com o LR.....	95
Figura 46 - Ângulo de ruptura da camada imprimada com LA.....	99

Figura 47 - Aparência do CP imprimado com o LA na taxa de 0,8 L/m ²	100
Figura 48 - Ângulo de ruptura da camada imprimada com LC 01	103
Figura 49 - Filme betuminoso excessivo formado na superfície do CP com o LC 01	104
Figura 50 - Ângulo de ruptura da camada imprimada com LC 02.....	106
Figura 51 - Aderência × penetração para LR nas três taxas e umidades Wót-2 e Wót.....	111
Figura 52 - Aderência × penetração para LA nas três taxas e umidades Wót-2 e Wót.....	112
Figura 53 - Aderência × penetração para LC 01 nas três taxas e umidades Wót-2 e Wót.....	113
Figura 54 - Aderência × penetração para o LC 02 nas três taxas e umidades Wót-2 e Wót..	115
Figura 55 - Desgaste superficial nas taxas 0,8, 1,0 e 1,2 L/m ² nas umidades Wót-2 e Wót para todos os ligantes testados.....	117
Figura 56 - Desgaste × penetração para o LR nas três taxas e umidades Wót-2 e Wót.....	118
Figura 57 - Desgaste × penetração para o LA nas três taxas e nas umidades Wót-2 e Wót ..	119
Figura 58 - Desgaste × penetração para o LC 01 nas três taxas e nas umidades Wót-2 e Wót	120
Figura 59 - Desgaste × penetração para o LC 02 nas três taxas e nas umidades Wót-2 e Wót	122
Figura 60 - Desgaste × penetração para o LC 03 nas três taxas e nas umidades Wót-2 e Wót	123
Figura 61 - Placa com arrancamentos pontuais após o ensaio de WTAT para o LC 03	124
Figura 62 - Exemplo de placa destruída para o LC 03 na umidade Wót.....	125
Figura 63 - Ensaio de LWT nas umidades Wót-2 e Wót à taxa de 0,8 L/m ² para os ligantes testados	126
Figura 64 - Aspecto da placa intacta após o ensaio LWT com LA à taxa de 0,8 L/m ² na Wót-2	127
Figura 65 - Aspecto da placa imprimada com LC 01 na taxa de 0,8 L/m ² com início de ruptura	128
Figura 66 - Penetração descontínua na amostra com o LC 02 na Wót e taxa de 0,8 L/m ²	128
Figura 67 - Desgaste superficial na amostra com o LC 02 na Wót e taxa de 0,8 L/m ²	129
Figura 68 - Ensaio de LWT nas umidades Wót-2 e Wót na taxa de 1,0 L/m ² para os ligantes testados	129
Figura 69 - Pontos de descolamento para a amostra com LA à taxa de 1,0 L/m ² na Wót-2 ..	130
Figura 70 - Ruptura observada para a amostra com LC 02 à taxa de 1,0 L/m ² na Wót-2.....	131

Figura 71 - Ensaio de LWT com o LC 02 na umidade $W_{ót}$ e taxa de 1,0 L/m ²	132
Figura 72 - Ensaio de LWT nas umidades $W_{ót-2}$ e $W_{ót}$ na taxa de 1,2 L/m ² para os ligantes testados	132
Figura 73 - Quebra de uma placa com o LR na condição $W_{ót-2}$ e taxa de 1,2 L/m ²	134
Figura 74 - Ensaio de LWT para o LR na condição de umidade $W_{ót}$ e taxa de 1,2 L/m ²	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos ADPs de Cura Rápida e Cura Média.....	15
Tabela 2 - Atribuições para a amostra no ensaio LWT – base imprimada.....	38
Tabela 3 - Atribuições para a amostra no ensaio LWT – camada antipó.....	39
Tabela 4 - Conceitos para qualificação do ensaio LWT.....	39
Tabela 5 - Atribuições para a amostra no ensaio WTAT – base imprimada.....	40
Tabela 6 - Atribuições para a amostra no ensaio WTAT – camada antipó.....	40
Tabela 7 - Conceitos para qualificação do ensaio WTAT.....	41
Tabela 8 - Localização geográfica do solo coletado.....	45
Tabela 9 - Ensaio e normas empregados para identificar o comportamento do solo coletado	45
Tabela 10 - Resultados da caracterização do solo	65
Tabela 11 - Resultados do MR do solo investigado nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2	66
Tabela 12 - Resultados da caracterização do ligante CM-30	67
Tabela 13 - Resultados da caracterização das emulsões comerciais	67
Tabela 14 - Avaliação qualitativa dos resultados do ensaio WTAT para os ligantes testados	118
Tabela 15 - Atribuições de comportamento do ensaio LWT.....	135

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>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTRA	<i>Ancona Shear Testing Research and Analysis</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/LCC	Mistura de CAP + Líquido da Casca da Castanha de Caju
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CBR	<i>California Bearing Ratio (%)</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CR	Cura Rápida
CM	Cura Média
CL	Cura Lenta
CP	Corpo de Prova
DER	Departamento Estadual de Rodovias

DIPEA	Dispositivo Portátil para Ensaio de Aderência
DNC	Departamento Nacional de Combustível
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ECC	Emulsão de Cera de Carnaúba
EAI	Emulsão Asfáltica Especial
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IP	Índice de Plasticidade (%)
ISSA	<i>International Slurry Surfacing Association</i>
LCC	Líquido da Casca da Castanha de Caju
LL	Limite de Liquidez (%)
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LWT	<i>Loaded Wheel Test</i>
MB	Macadame Betuminoso
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MR	Módulo de Resiliência
NL	Não Líquido
NP	Não Plástico
PMF	Pré-Misturados à Frio
RBVT	Rodovia de Baixo Volume de Tráfego
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
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

LISTA DE SÍMBOLOS

$W_{ót}$	Umidade ótima (%)
$W_{ót-2}$	Umidade ótima menos 2%
$W_{ót+2}$	Umidade ótima mais 2%
σ_d	Tensão desvio
σ_3	Tensão de confinamento
R^2	Coefficiente de relação
E_c	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
τ	Força de ligação interfacial
D	Diâmetro do corpo de prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Justificativa	4
1.3	Problema de pesquisa	6
1.4	Objetivo geral e específicos	7
1.5	Estrutura da dissertação	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Considerações iniciais.....	9
2.2	Importância das rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT).....	9
2.3	Considerações sobre imprimação.....	12
2.4	Tipos de materiais empregados em serviços de imprimação.....	15
2.4.1	<i>Asfalto diluído de petróleo (ADP)</i>	15
2.4.2	<i>Emulsões asfálticas especiais para imprimação (EAI)</i>	17
2.5	Alguns estudos realizados no brasil sobre o uso de ligantes alternativos com diluentes vegetais aplicados em serviços de imprimação	19
2.6	Principais fatores que podem interferir na qualidade da imprimação	23
2.7	Outros fatores relativos ao desempenho da imprimação	28
2.7.1	<i>Aderência e coesão.....</i>	28
2.7.2	<i>Metodologias para avaliação da aderência</i>	32
2.7.3	<i>Desgaste superficial.....</i>	36
2.7.3.1	<i>Adaptação do ensaio LWT.....</i>	37
2.7.3.2	<i>Adaptação do ensaio WTAT</i>	39
2.8	Considerações finais	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Considerações iniciais.....	42
3.2	Caracterização do solo	44
3.3	Materiais betuminosos.....	46
3.3.1	<i>Ligantes comerciais</i>	46
3.3.2	<i>Ligante alternativo.....</i>	47
3.4	Descrição dos ensaios de imprimação	49
3.4.1	<i>Procedimentos do ensaio de imprimação simplificado</i>	49

3.4.2	<i>Procedimentos de imprimação com o ligante de referência (LR) do tipo CM-30</i>	52
3.4.3	<i>Procedimentos de imprimação com as emulsões comerciais e o ligante alternativo.</i>	53
3.5	Coesão da base imprimada	55
3.6	Aderência da base imprimada	56
3.7	Ensaio de desgaste superficial	60
3.8	Considerações finais	62
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
4.1	Considerações iniciais	64
4.2	Resultados da caracterização do solo	64
4.3	Propriedades mecânicas do solo	65
4.4	Caracterização dos materiais betuminosos	66
4.5	Ensaio de penetração da imprimação betuminosa	68
4.5.1	<i>Avaliação do tempo da perda de umidade</i>	68
4.5.2	<i>Comparação do método da Cápsula × Marshall para penetração da imprimação</i>	70
4.5.2.1	<i>Resultados para o LR (Ligante de referência)</i>	71
4.5.2.2	<i>Resultados para o LA (Ligante alternativo)</i>	72
4.5.2.3	<i>Resultados para o LC 01 (Ligante comercial 01)</i>	72
4.5.2.4	<i>Resultados para o LC 02 (Ligante comercial 02)</i>	73
4.5.2.5	<i>Resultados para o LC 03 (Ligante comercial 03)</i>	74
4.5.3	<i>Avaliação da umidade de compactação e da taxa de ligante</i>	75
4.5.4	<i>Ranqueamento dos ligantes testados</i>	79
4.6	Coesão da base imprimada	81
4.6.1	<i>Resultados dos ensaios de coesão</i>	81
4.6.2	<i>Influência da penetração na coesão</i>	84
4.6.2.1	<i>Resultados para o LR (Ligante de referência)</i>	84
4.6.2.2	<i>Resultados para o LA (Ligante alternativo)</i>	87
4.6.2.3	<i>Resultados para o LC 01 (Ligante comercial 01)</i>	89
4.6.2.4	<i>Resultados para o LC 02 (Ligante comercial 02)</i>	90
4.6.2.5	<i>Resultados para o LC 03 (Ligante comercial 03)</i>	91

4.6.2.6	<i>Análise geral da relação penetração × coesão para os ligantes testados</i>	93
4.6.3	<i>Ângulo de ruptura no ensaio de coesão</i>	93
4.6.3.1	<i>Resultados para o LR (Ligante de referência)</i>	95
4.6.3.2	<i>Resultados para o LA (Ligante alternativo)</i>	99
4.6.3.3	<i>Resultados para o LC 01 (Ligante comercial 01)</i>	102
4.6.3.4	<i>Resultados para o LC 02 (Ligante comercial 02)</i>	105
4.6.3.5	<i>Análise geral do ângulo de ruptura da superfície imprimada</i>	108
4.6.4	<i>Ranqueamento dos ligantes testados à luz da coesão superficial</i>	109
4.7	<i>Ensaio de arrancamento para verificação da aderência</i>	110
4.7.1	<i>Resultados do ensaio de arrancamento para o LR (Ligante de referência)</i>	110
4.7.2	<i>Resultados do ensaio de arrancamento para o LA (Ligante alternativo)</i>	112
4.7.3	<i>Resultados do ensaio de arrancamento para o LC 01 (Ligante comercial 01)</i>	113
4.7.4	<i>Resultados do ensaio de arrancamento para o LC 02 (Ligante comercial 02)</i>	114
4.8	<i>Ensaio de desgaste superficial</i>	116
4.8.1	<i>Resultados dos ensaios WTAT</i>	116
4.8.1.1	<i>Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LR</i>	118
4.8.1.2	<i>Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LA</i>	119
4.8.1.3	<i>Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LC 01</i>	120
4.8.1.4	<i>Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LC 02</i>	121
4.8.1.5	<i>Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LC 03</i>	123
4.8.1.6	<i>Comentários gerais do desgaste superficial versus penetração para os ligantes testados</i>	124
4.8.2	<i>Resultados dos ensaios LWT</i>	125
4.8.2.1	<i>Avaliação dos resultados de ATR para os ligantes testados à taxa de 0,8 L/m²</i> . 125	
4.8.2.2	<i>Avaliação dos resultados de ATR para os ligantes testados à taxa de 1,0 L/m²</i> . 129	
4.8.2.3	<i>Avaliação dos resultados de ATR para os ligantes testados à taxa de 1,2 L/m²</i> . 132	
4.8.2.4	<i>Comentários gerais dos resultados de ATR para os ligantes testados</i>	134
4.9	<i>Considerações finais</i>	136
5	<i>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</i>	137
5.1	<i>Considerações iniciais</i>	137
5.2	<i>Conclusões sobre os ligantes utilizados</i>	137
5.3	<i>Principais constatações do programa experimental</i>	138

5.3.1	<i>Quanto aos ensaios de penetração e a metodologia simplificada</i>	138
5.3.2	<i>Quanto às limitações das especificações de imprimação</i>	140
5.3.3	<i>Quanto aos ensaios de coesão</i>	140
5.3.4	<i>Quanto aos ensaios de aderência</i>	141
5.3.5	<i>Quanto aos ensaios de desgaste superficial</i>	142
5.4	Recomendações para futuras pesquisas	142
	REFERÊNCIAS	144

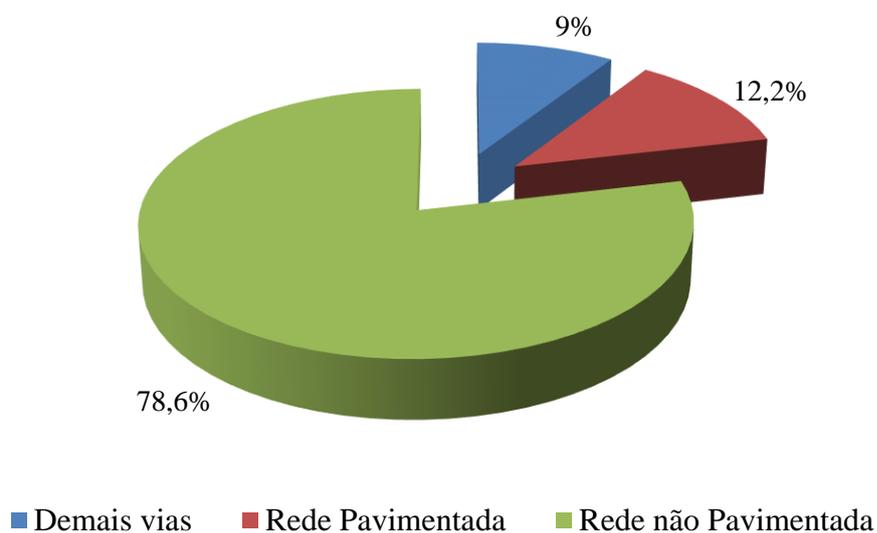
CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O sistema viário brasileiro compreende uma malha de 1.720.755,7 km, segundo o último relatório do Sistema Nacional de Viação - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (SNV-DNIT, 2016). Cerca de 80% (Figura 1) dessa malha é composta por rodovias não pavimentadas, sendo 91% desse total representada por vias municipais. Algumas dessas vias são chamadas, normalmente, de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT) e possuem um importante papel no cenário econômico e social.

Figura 1 - Distribuição da malha rodoviária brasileira



Fonte: Adaptado dos Relatórios SNV-DNIT (2016)

Segundo Sant'ana (2009), o termo “baixo volume de tráfego” pode ser associado a uma rodovia de menor importância, se esta for comparada relativamente às rodovias arteriais ou de

classe I (rodovias que possuem características geométricas da pista de rolamento favoráveis a um tráfego intenso, DNIT 2006), por exemplo. Porém, se for considerada a representação percentual de todas as RBVTs em relação à malha rodoviária da grande maioria dos países, constata-se a sua grande importância, em termos de extensão. O mesmo pode ser considerado sob o foco do escoamento de produção, da acessibilidade, do desenvolvimento regional, etc.

A melhoria da pavimentação nesse tipo de rodovia esbarra na aprovação do Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) que se torna difícil de ser explicado em função do baixo volume de tráfego registrado (oferta e demanda) que faz parte da fase preliminar desses estudos. Outras questões avaliadas em um estudo de viabilidade para a realização de um projeto são: os gastos com implantação e operação, vida útil e taxa de retorno. Passando ainda pelo estudo de custo/benefício e do interesse comum de todas as esferas administrativas envolvidas no projeto (DNIT, 1999). Sendo assim, torna-se um desafio para os projetistas e construtores de estradas desenvolverem soluções técnicas adequadas com poucos recursos disponíveis.

Uma das soluções empregadas para se tentar viabilizar projetos com rodovias de baixo tráfego é o uso de revestimentos delgados que, mesmo sem exercer função estrutural, devem propiciar conforto ao rolamento para o usuário, além de impermeabilizar a superfície, fornecer coesão e aderência ao revestimento e resistir aos esforços horizontais de frenagem e aceleração.

Os revestimentos com espessuras reduzidas e com pouca ou nenhuma função estrutural levam as camadas de base a suportarem quase que totalmente todos os esforços provenientes do tráfego e, por esse motivo, exigem que a camada de base possua uma forte ligação com o

revestimento, atributo esse que deve ser fornecido pela imprimação (RABÊLO, 2006). Bastos (2013) corroborou com tal afirmação, ao analisar a distribuição de tensões e deformações em estruturas com revestimentos delgados.

Segundo a especificação ES 144/2014 (DNIT), a imprimação consiste no lançamento de um material betuminoso em uma base pronta que recebe um revestimento asfáltico qualquer. A camada imprimada possui uma adesão mecânica que provavelmente é resultado de uma combinação de mecanismos que ocorrem simultaneamente à promoção de aderência. Esses mecanismos podem ser classificados em uma das três categorias: 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).

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 pronta, 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.

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.

Para imprimação betuminosa no Brasil, geralmente utiliza-se o ADP do tipo CM-30 que é constituído de uma mistura de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e querosene. No entanto, essa mistura libera Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) e é capaz de contaminar o solo e reservas de água devido ao seu escoamento.

1.2 Justificativa

Algumas pesquisas (MANTILLA e BUTTOM, 1994; DANTAS NETO, 2001; CROSS e SHRESTHA, 2004; RABÊLO, 2006; GODOI, 2011) apontam o uso de produtos alternativos em substituição ao CM-30 que minimizam os impactos ambientais dos serviços realizados na imprimação betuminosa. Pode-se citar alguns exemplos de materiais alternativos já investigados no estado do Ceará, como: o Líquido da Casca da Castanha do caju (LCC), a emulsão da cera de carnaúba e o Biodiesel.

Além da questão ambiental, o uso de materiais alternativos busca oferecer opções aos derivados do petróleo, pois apesar do Brasil ser autossuficiente na produção desse produto, a incerteza de preço do petróleo no mercado internacional é um fator preocupante economicamente (CIVILIS, 2007).

Tem-se verificado em países desenvolvidos o uso de Emulsões Especiais para Imprimação (EAI) e uma maior restrição na utilização do asfalto diluído na imprimação. Cross e Shrestha (2004) relatam que muitos departamentos de transporte rodoviário no exterior têm evitado ou reduzido a utilização desses materiais em virtude do perigo da poluição ambiental, devido à própria manipulação do material betuminoso, bem como a emissão de VOCs.

Segundo Rabêlo (2006), no Brasil, a pouca preocupação com os serviços de imprimação, no tocante à preservação ambiental, é demonstrada pela limitação dos cuidados recomendados pelas especificações de serviço DNER-ME ES-306/97 e ES 144/2014, mesmo após sua atualização (DNIT, 2014). Esses cuidados se restringem a não instalação de depósitos de ligantes próximos aos cursos d'água, a desmobilização desses depósitos e do canteiro da obra após a sua conclusão, bem como o impedimento do refugo de materiais já utilizados na faixa de domínio e áreas lindeiras.

Recentemente, a especificação ES-144/2010 foi atualizada para ES 144/2014 e verificaram-se algumas alterações em seu texto. Uma delas foi a inserção do ligante EAI com um intervalo de taxa de aplicação específico para esse ligante (8,0 a 1,6 L/m²) e viscosidade de aplicação recomendada [20 a 100 Segundos de Saybolt-Furol (ssf)]. O ensaio de Ponto de Fulgor e combustão (NBR 5765, 2012) passou a ser necessário para todo novo carregamento que chegar a obra. Houve uma simplificação na verificação do produto que agora passou a ser apenas visual para atestar a homogeneidade da aplicação, a penetração do ligante na camada da base e sua efetiva cura.

De acordo com a SINICESP (2013), seguindo uma tendência mundial de redução de emissões de poluentes na atmosfera para redução do efeito estufa e visando a uma melhora na qualidade dos itens de saúde, meio ambiente e segurança dos colaboradores envolvidos nos serviços de imprimação, as associadas da ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto) desenvolveram uma Emulsão Asfáltica Catiônica capaz de substituir, com ganhos de desempenho, o ADP-CM 30 ou CM 70 para esse tipo de serviço. Essa nova emulsão recebeu a denominação de Emulsão Asfáltica para Imprimação (EAI). Tal medida pode contribuir para o acordo da 21ª Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas (COP 21) realizada em 2015 que estabeleceu metas de redução de poluentes na atmosfera.

Nesse contexto, e dada à importância do emprego da imprimação betuminosa na pavimentação, instiga-se a comunidade científica e técnica local à busca por materiais alternativos e ambientalmente mais corretos para emprego na interface base-revestimento. Contudo, se faz necessário a investigação sobre a aplicação e o desempenho dos ligantes alternativos e comerciais aos materiais granulares regionais, visando assim o aumento da qualidade da imprimação dos pavimentos.

1.3 Problema de pesquisa

O problema de pesquisa da presente dissertação está relacionado à insuficiência de informações técnicas sobre o desempenho dos produtos comerciais e alternativos para emprego em serviços de imprimação betuminosa. Sente-se a necessidade de parâmetros que avaliem a aplicação do asfalto diluído ou emulsões asfálticas tradicionais para tais serviços, como: penetração, coesão, aderência e desgaste superficial.

1.4 Objetivo geral e específicos

O objetivo geral da presente dissertação é investigar o comportamento de ligantes comerciais e um ligante alternativo para emprego em serviços de imprimação betuminosa, por meio de parâmetros de penetração, coesão, aderência e desgaste superficial.

Os objetivos específicos estabelecidos foram:

- investigar quais produtos, normas e ensaios são usados para imprimação betuminosa no Brasil e no exterior;
- introduzir os parâmetros de coesão e aderência para analisar o comportamento da imprimação betuminosa;
- apresentar um método simplificado de laboratório para avaliar preliminarmente a penetração da imprimação de diversos ligantes;
- comparar a penetração obtida por métodos já estabelecidos na literatura com o método simplificado de laboratório;
- avaliar o comportamento da imprimação betuminosa com o emprego de um ligante alternativo produzido em laboratório com diversas taxas de aplicação e diferentes teores de umidade da camada de base;
- analisar o comportamento das emulsões especiais e do asfalto diluído com variações das taxas de aplicação dos ligantes em uma base granular variando também os teores das umidades dessa base.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída de cinco capítulos. O Capítulo 1 aqui apresentado mostra os objetivos, problema de pesquisa e justificativa. O Capítulo 2 de Revisão Bibliográfica resume, com base na literatura nacional e internacional, a importância de RBVTs no desenvolvimento do país, da imprimação betuminosa, bem como apresenta os principais parâmetros usados para se analisar o resultado da imprimação. O Capítulo 3, Materiais e Métodos, descreve o processo de escolha das amostras, o procedimento experimental e as metodologias empregadas no solo, nos ligantes e nas análises dos ensaios de imprimação, desgaste superficial, coesão e de aderência. No Capítulo 4 são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização do solo, dos ligantes alternativos, bem como o comportamento quanto à penetração, à coesão, à aderência e ao desgaste superficial desses ligantes à base testada. No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e constatações do programa experimental desenvolvido, bem como são apontadas as recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem a finalidade de reunir informações que subsidiem as investigações sobre a importância da imprimação betuminosa em RBVTs e os principais conceitos e parâmetros importantes para a sua análise e melhor concepção.

2.2 Importância das rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT)

A implantação de uma nova rodovia tem influência econômica, política, ambiental e social sobre a região por onde ela passa, criando perspectivas de desenvolvimento, pois favorece uma maior rapidez no deslocamento das pessoas e mercadorias, permitindo ainda o melhor acesso à saúde e educação. No entanto, a ausência de acessibilidade ou as péssimas condições da infraestrutura rodoviária podem constituir um obstáculo para o crescimento econômico de uma dada localidade.

Muito embora cerca de 61% do transporte de cargas do país seja realizada através do módulo rodoviário, CNT 2016 (Confederação Nacional dos Transportes), as más condições de trafegabilidade impactam negativamente o crescimento econômico e a melhoria social. Dentre alguns fatores que afetam à segurança ao rolamento, destacam-se: buracos, sinalização deficiente, traçados mal elaborados ou a completa ausência de pavimentação.

Entretanto, é sabido que os custos de implantação e de manutenção de rodovias pavimentadas não são baixos, chegando à cerca de três milhões de reais por quilômetro no caso de implantações e a cerca de 1 milhão de reais por quilômetro em casos de reconstrução, no caso de rodovias de classe I.B, (DNIT SICRO 2 – 2014). Assim é crescente a procura por alternativas que ofereçam condições mínimas de trafegabilidade com a redução dos custos de implantação e manutenção.

Percebe-se então a necessidade de melhoria das estradas não pavimentadas, principalmente no que se refere ao desenvolvimento econômico e aos padrões de qualidade de vida das populações das áreas rurais. A pavimentação e/ou melhoramento das rodovias de terra, normalmente, são inibidos pelas dificuldades de aprovação dos EVTEs, dado o baixo volume de tráfego nelas registrado. Essa restrição constitui um desafio para os projetistas e construtores rodoviários na busca de soluções de pavimento que tornem economicamente viáveis aqueles investimentos (RABÊLO, 2006).

Conforme citado por Silva (2016), o Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará (DER-CE) classifica informalmente as RBVTs como aquelas que possuem um volume diário médio de tráfego inferior a 700 veículos/dia. Bernucci (1995) considera como RBVT aquelas rodovias dimensionadas para um tráfego previsto de no mínimo 10^4 e no máximo 10^6 repetições de carga equivalente ao eixo padrão de 82 kN, para o período de projeto adotado. Identificar com clareza o que é baixo volume de tráfego se torna uma difícil tarefa devido à variedade de conceitos encontrados em vários países do mundo ou mesmo regiões de um mesmo país de dimensões continentais como o Brasil. Certamente, o desenvolvimento

econômico contrastante entre regiões compete decisivamente para aumentar a complexidade da definição de limites para diferentes níveis de tráfego (SANT'ANA, 2009).

Essas rodovias, normalmente, permitem o escoamento de produtos provenientes de pequenas propriedades, acessibilidade das pessoas ao turismo, fluxo de insumos e produtos para a atividade agropecuária e abastecimento das comunidades com produtos industrializados produzidos nas áreas mais urbanizadas (MOTA, 2009). Muito embora, por muitas vezes, não ofereçam condições de trafegabilidade favoráveis, encarecendo assim os produtos, desanimando os produtores e atrasando o crescimento do Brasil.

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2015), a deficiência da infraestrutura em transporte no Brasil se manifesta de diversas formas, entre as quais se destacam, no caso do setor agropecuário:

- malha insuficiente para atender adequadamente todas as regiões produtoras;
- manutenção insuficiente da malha existente;
- opção pelo modal rodoviário de transporte, pouco indicado para produtos de baixo valor agregado e grande quantidade, e as grandes distâncias no Brasil.

Essas rodovias, em grande parte, estão sob a responsabilidade de órgãos rodoviários ou agências de Municípios, Distritos e/ou, em alguns casos, dos Estados ou Províncias e, apenas em casos excepcionais, como em rodovias que dão acessos aos Parques e Reservas Nacionais são administradas pelos órgãos rodoviários vinculados à Administração Federal. Assim, esses órgãos menores, com recursos limitados para investimento em infraestrutura, não conseguem sanar as deficiências existentes.

Nesse contexto, normalmente, são adotados como solução os revestimentos esbeltos que fornecem boas condições de rolamento e atendem ao baixo tráfego além de possuir custos menores. Muito embora, sua espessura reduzida exija uma forte ligação entre a base e o revestimento, atributo esse que deve ser fornecido pela imprimação.

2.3 Considerações sobre imprimação

Poucos pesquisadores, no Brasil e no mundo, têm se dedicado ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias. Alguns, ao definirem a imprimação betuminosa, são bastante objetivos, descrevendo sucintamente as funções desempenhadas em um pavimento asfáltico (DNIT, 2014), enquanto outros são mais detalhistas, inclusive discriminando em que situação a imprimação deve ser aplicada (RABÊLO, 2006).

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. Alguns autores, Larsen (1992), Buttom e Mantilla (1994), *American Society for Testing and Materials - ASTM* (D8-02, 2003) e *The Asphalt Institute* (AI) (2001), atribuem à imprimação outras funções, tais como: (a) endurecimento e estabilização da parte superior da base ao preencher os vazios capilares desta impermeabilizando-a, (b) promoção da coesão e adesão da base com a camada asfáltica sobrejacente e (c) proteção da camada de base contra as intempéries e os efeitos do tráfego até que o revestimento seja executado.

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 revestimento 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.

OAI (2001) afirma que a imprimação impede que uma base granular absorva o 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. Os benefícios adicionais da imprimação são relatados, como indicação para a utilização da base de rodovias de tráfego leve utilizada como camada de rolamento, pois ela une as partículas de poeira.

Dantas (1959), Rabêlo (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.

Segundo Rabêlo (2006), a imprimação betuminosa tem a função de promover a aderência entre a base e o revestimento, além de impermeabilizar a base e fornecer coesão superficial. Todavia, é necessário ter bastante cuidado com a sua execução, pois a imprimação betuminosa depende de muitas variáveis, como: tipo de base, umidade de compactação, tipo de ligante, temperatura/viscosidade de aplicação da imprimação, condições climáticas, etc.

Villibor (2009) ao realizar estudos para verificação do comportamento da imprimação asfáltica em diferentes bases de pavimentos compostas por solos lateríticos e da influência dos vários fatores que interferem no processo de imprimação, lista, que entre essas variáveis, destacam-se: tipo e taxa de aplicação do material betuminoso; teor de umidade de

compactação; tipo de solo; densidade aparente seca; influência da perda de umidade e da irrigação prévia da base.

2.4 Tipos de materiais empregados em serviços de imprimação

2.4.1 *Asfalto diluído de petróleo (ADP)*

Convencionalmente utilizados em serviços de imprimação, os ADPs são produzidos a partir do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e diluentes. 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).

Os ADPs são classificados pelo Departamento Nacional de Combustível (DNC) (2016) de acordo com a velocidade de cura em três categorias: Cura Rápida (CR), Cura Média (CM) e Cura Lenta (CL). Eles são produzidos pela adição de um diluente volátil, geralmente nafta, querosene ou gasolina, com sua proporção em torno de 25 a 45%, com o objetivo de reduzir temporariamente sua viscosidade, facilitando sua aplicação, sendo que os ADPs CL não são produzidos no Brasil. Quanto à viscosidade, são subdivididos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos ADPs de Cura Rápida e Cura Média

Asfaltos diluídos de cura rápida e média		
	Viscosidade Cinemática a 60°C, cSt	Viscosidade do resíduo a 60°C, P
CR-70	70 - 140	600 a 2400
CR-250	250 - 500	600 a 2400
CM-30	30 - 60	300 a 1200

Fonte: BR Petrobras (2016)

No Brasil, o ADP mais utilizado é o CM-30, recomendado para serviços de imprimação, indicado para superfícies com textura fechada e deve ser aplicado à taxa que varia de 0,8 a 1,6 L/m². Essa taxa deve ser determinada experimentalmente mediante absorção pela base em 24 horas. Conforme a BR distribuidora (2015), o tempo de cura é geralmente de 48 horas, dependendo das condições climáticas locais (temperatura, ventos, etc).

Em alguns países o uso do ADP é regulado e até restringido devido à emissão de voláteis que ocorre em seu processo de cura. Segundo Cross e Shrestha (2005), dentre os produtos mais usados em pavimentação, o ADP é o mais nocivo em emissões de voláteis. Isso ocorre devido ao alto teor do solvente que dilui o asfalto.

Assim, o asfalto diluído de cura rápida (chamado de Cutback) 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 (EIP, 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; (c) 70% do solvente evapora depois de três a quatro meses após a aplicação. Por esse motivo, há uma tendência cada vez maior da redução do seu emprego, devido aos

problemas relacionados à segurança e meio ambiente por causa da emissão de VOCs (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.4.2 Emulsões asfálticas especiais para imprimação (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 2 são mostradas esferas com contorno escuro representando os glóbulos de asfalto em meio a um material avermelhado, água mais emulsificantes, estabilizado.

Figura 2 - Fotografia de uma emulsão asfáltica sob um 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 são dispersões de CAP em fase aquosa estabilizadas com tensoativos, onde o tempo de ruptura depende, dentre outros fatores, da quantidade e do tipo do agente emulsificante e a viscosidade depende principalmente da qualidade do ligante residual. A quantidade de asfalto pode variar entre 60 a 70% (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Nos últimos 4 anos as EAIs, em conformidade com as especificações da ANP (Agência Nacional do Petróleo, 2012), apresentam características próprias das emulsões:

- viscosidade do ligante asfáltico baixa; frações de solvente em teores máximos de 15% que reduzem a emissão de voláteis;
- mesmo com baixa penetração, oferecem uma superfície de ancoragem na base formada pela película asfáltica;
- aumentam a resistência ao descolamento da mesma frente à ação dos pneus do maquinário em trânsito sobre o serviço, ou do tráfego liberado na via antes da aplicação do revestimento asfáltico.

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 visto, 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).

2.5 Alguns estudos realizados no Brasil sobre o uso de ligantes alternativos com diluentes vegetais aplicados em serviços de imprimação

As obras de infraestrutura rodoviária, por serem fundamentais como indutoras do desenvolvimento econômico, produzem modificações ambientais significativas. Portanto, é constante a busca nessa área por materiais que reduzam os impactos ambientais, de forma a evitar ou mitigar os seus efeitos. Caso não sejam avaliados previamente, alguns materiais utilizados em infraestrutura podem provocar danos irreversíveis, em nível local e regional a médio e longo prazo (DNIT, 2006).

Com a finalidade de buscar produtos alternativos menos poluentes para aplicação em serviços de imprimação alguns autores fizeram uso de vários tipos de óleos de base vegetal para diluição do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). 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 a imprimação. Os principais estudos desse grupo podem ser consultados em Rabêlo (2006), Silva (2009), Vasconcelos (2009), Silva (2012), Almeida (2013 e 2014) e Gondim (2015).

Dantas Neto (2001) estudou a utilização de uma emulsão asfáltica a base de óleo de xisto, denominada CM PLUS, como alternativa ao CM-30. De acordo com o pesquisador essa emulsão obteve valores de penetração no solo de forma semelhante ao CM-30, sendo recomendada sua utilização em serviços de imprimação. Entretanto, o mesmo autor relatou que em elevadas condições de secagem superficial do solo compactado, o ligante testado perde a capacidade de penetração, o que provavelmente se deve a ruptura prematura da emulsão provocada pela perda de água da emulsão para solo.

Castro (2003) estudou o emprego da emulsão de óleo de xisto em serviços de imprimação betuminosa e constatou vantagens quanto ao seu uso, do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Essa emulsão se mostrou ser mais econômica, oferecendo alta penetração devido a sua baixa viscosidade, e baixa volatilidade, reduzindo assim, a emissão de nocivos no meio ambiente.

Rabêlo (2006) em sua pesquisa investigou o comportamento de uma mistura composta por 60% de CAP (cimento asfáltico de petróleo) e 40% de LCC (Líquido da Casca da Castanha de Caju) quanto à penetração da imprimação. O autor obteve resultados favoráveis, do ponto de vista técnico para a penetração em solo do tipo mais arenoso. Esse autor também testou a emulsão RM-1C sem diluição em água e, verificou que a mesma não penetrou em nenhuma das amostras de solos estudadas. Esse pesquisador concluiu que as emulsões convencionais não se adequam aos serviços de imprimação betuminosa.

Rabêlo (2006) relatou ainda que, de forma geral, na literatura nacional e internacional várias são as vantagens para a utilização de emulsões asfálticas em serviços de pavimentação, tais como economia de energia, produção de grandes volumes e baixas dosagens de ligantes. A pesquisa desse autor corroborou o trabalho internacional de Buttom e Mantilla (1994) que alertaram para o fato das emulsões não serem tão poluentes quanto os asfaltos diluídos, em virtude da presença dos emulsificantes necessários para estabilidade da emulsão.

Vasconcelos (2009) utilizou 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. Essa mistura foi aplicada como imprimação alternativa de uma base constituída por solo e Resíduo de Construção e Demolição (RCD). Esse autor verificou que o material testado se mostrou viável do ponto de vista de penetração, pois atingiu penetrações maiores que 4 mm, que é um valor de referência mínimo, segundo a literatura pesquisada.

Silva (2009) utilizou 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. Essa mistura foi aplicada como imprimação alternativa de 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. Esse autor verificou que o material testado se mostrou do ponto de vista de penetração viável em bases mais secas e com energias de compactação abaixo da modificada, pois só assim, atingiu penetrações maiores que 4 mm, tida como satisfatória segundo a literatura pesquisada.

Ramalho (2011) ao testar uma emulsão de óleo de xisto na imprimação de solos finos lateríticos verificou que o material testado obteve baixas penetrações, mas todas dentro do limite mínimo encontrado na literatura pesquisada. Constatou também que o tempo de secagem da superfície interfere diretamente na penetração da emulsão.

Silva (2012) testou uma Emulsão de Cera de Carnáuba (ECC), acreditando-se que sua capacidade aglutinante pudesse ser aproveitada para fins de aplicação em serviços de imprimação de rodovias. Os testes iniciais foram satisfatórios do ponto de vista da penetração do material na base testada, embora sua percepção tenha sido dificultada pela transparência da emulsão e concluiu que seria necessário pigmentar a emulsão e realizar outros ensaios de avaliação de imprimação para atestar sua viabilidade para fins rodoviários.

Essa última autora testou ainda misturas de CAP/ECC, CAP/emulsão de LCC e uma Emulsão de LCC, onde as misturas à base de CAP não apresentaram penetração. Entretanto, a emulsão de LCC apresentou resultados médios de penetração favoráveis (6,0 mm) em uma amostra de solo arenoso, sendo, para tanto, necessários mais testes para atestar o emprego desse material em serviços de imprimação.

Gondim (2015), ao testar um CAP modificado com 10% de seiva de aveloz, diluído 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.

É consenso entre os autores pesquisados de que são necessários estudos de novas alternativas que visem à redução de poluentes nos serviços de imprimação betuminosa. Surgem como soluções as emulsões e ligantes alternativos que utilizam diluentes vegetais com o objetivo de reduzir as 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.

2.6 Principais fatores que podem interferir na qualidade da imprimação

Ao conceituar a imprimação betuminosa, a ASTM D8-02 (2003) observou 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.

Villibor *et al.* (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, Rabêlo (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. Nestas 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.

Para Duque Neto (2004), pavimentos executados com bases de misturas de solos naturais imprimadas com emulsão de óleo de xisto apresentaram desempenho satisfatório para pavimentos com a penetração da imprimação fora do intervalo de 4,0 a 13,0 mm proposto por Castro (2003).

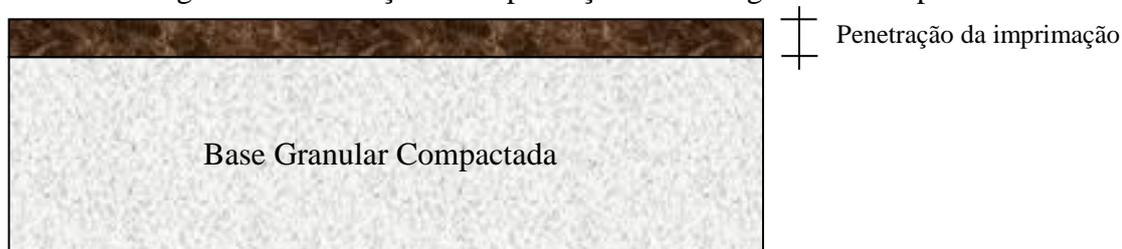
Percebe-se que as controvérsias sobre a faixa de penetração dos autores citados é fruto das diferentes condições vivenciadas por cada um deles, como por exemplo: os materiais utilizados nas camadas granulares, condições de umidade no momento do serviço de imprimação, taxa de irrigação prévia e taxa de ligante. Contudo, 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.

Rabêlo (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 3).

Figura 3 - Penetração da imprimação em base granular compactada



Fonte: Villibor (1981)

Resumidamente, existem 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 Villibor *et al.* (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 Villibor *et al.* (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 - Villibor *et al.* (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 - Rabêlo (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 *et al.* (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 - 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 Dantas (1959), 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 “arrepia a base”, tem como finalidade retirar as crostas de material fino existentes sobre a superfície à imprimir. Segundo Villibor *et al.* (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/m².

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 recomendado para produzir uma superfície aceitável quando são utilizadas emulsões.

Villibor *et al.* (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.

2.7 Outros fatores relativos ao desempenho da imprimação

2.7.1 Aderência e coesão

Apesar desta pesquisa focar em RBVTs, apresentam-se neste item alguns trabalhos que estudaram pavimentos mais robustos, tendo em vista a ausência de pesquisas que aplicam conceitos de aderência e coesão em RBVTs.

As 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.

A total aderência na interface, porém, é algo que não se pode garantir em campo e em laboratório. 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). 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.

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). Verificou-se também que, dessa forma, existe uma taxa ótima de aplicação do ligante que constitui, portanto, um fator preponderante para garantir boa aderência entre camadas.

Acredita-se que força de ligação está diretamente relacionada com a espessura do filme de ligante. Amostras 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)

Já a coesão do solo, caracterizada pelo cisalhamento do solo, 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 (MULLINS *et al.*, 1990).

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. A coesão aparente constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). As características de cisalhamento do solo são representadas pela coesão do solo, pelo ângulo de atrito interno e pela resistência do solo ao cisalhamento (ORTIGÃO, 1995).

O ângulo de atrito interno do solo representa as características friccionais entre as suas partículas, sendo definido como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. O ângulo de atrito interno do solo depende de fatores como grau de compactação, percentagem e tipo de solo, tamanho e forma dos grãos do solo (CAPUTO, 2014).

Entretanto, com a presença de umidade essa propriedade do solo fica suscetível à falha. Dessa forma, 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).

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 esta 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).

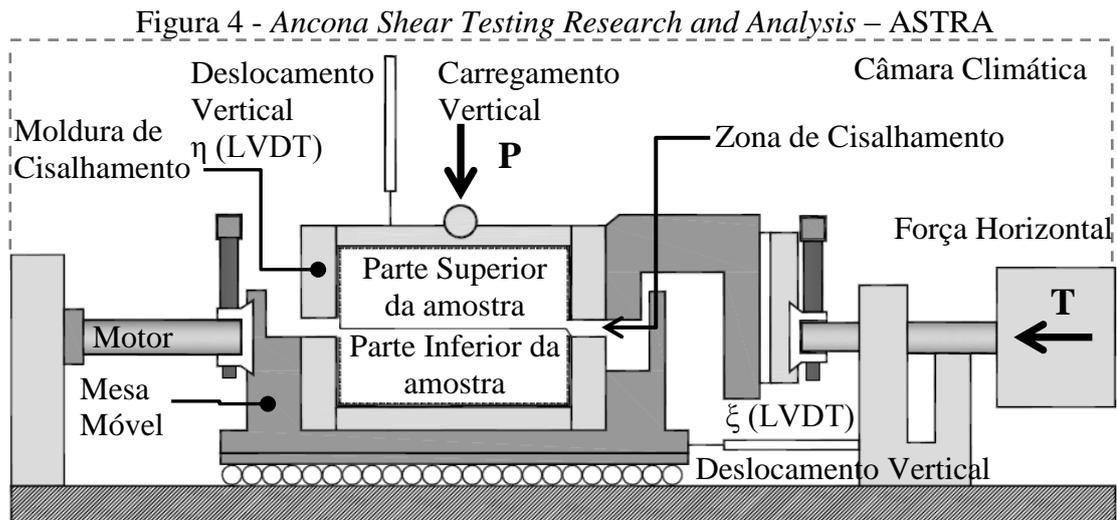
Torquato e Silva *et al.* (2015), investigou a influência da referida aderência sobre a resposta estrutural de pavimentos asfálticos quando submetidos a um carregamento mecânico. Simulou a aderência entre todas as camadas do pavimento com o programa SisPav utilizando as propriedades mecánísticas dos materiais, investigados em laboratório, provenientes de um trecho monitorado (300 metros) da BR-222 no estado do Ceará. Esse autor verificou que Para ambos os parâmetros, deflexão e tensão vertical no topo do subleito, o descolamento entre as camadas provocou um aumento significativo, que reduz a vida útil do pavimento e facilita o aparecimento de afundamentos de trilha de roda e trincas por fadiga.

2.7.2 Metodologias para avaliação da aderência

Guimarães (2013) cita que, na literatura internacional, a aderência é avaliada a partir da ruptura da camada de ligação por ensaios de cisalhamento direto ou torque, a uma taxa de carregamento constante ou a uma taxa de deslocamento constante (carregamentos monotônicos). Com menor frequência, são também relatados ensaios de arrancamento (com aplicação de uma força de tração direta para separação das duas camadas).

Entre as principais metodologias utilizadas nos ensaios de cisalhamento podem ser citadas: o ensaio com o *Ancona Shear Testing Research and Analysis (ASTRA)*, semelhante ao ensaio de

cisalhamento direto (Figura 4) (CANESTRARI *et al.*, 2005; SANTAGATA *et al.*, 2009). No ensaio, a amostra é colocada entre duas meias caixas com uma zona de cisalhamento intercalar no centro. São aplicadas cargas normal e horizontal enquanto, durante o ensaio, as forças de deslocamento horizontal e vertical são registradas.



Fonte: Adaptado de (CANESTRARI *et al.*, 2005; SANTAGATA *et al.*, 2009)

Para avaliar a aderência de uma emulsão de óleo de xisto para fins de aplicação em serviços de imprimação betuminosa e compará-la com os resultados obtidos com o CM-30, Ramalho (2011) fez uso do DIPEA (Dispositivo Portátil para Ensaio de Aderência) adaptado por Pereira (2002).

Esse ensaio de arrancamento, conforme apresentado na Figura 5, é constituído de: (5a) um disco de aço que deve ser colado à superfície que se deseja ensaiar, (5b) uma cola que é espalhada uniformemente para formar um filme fino, aguardando-se secar completamente antes de fazer o arrancamento e (5c) e (5d) um torquímetro que é acoplado ao disco, de onde se extrai a leitura do torque máximo antes do arrancamento.

Figura 5 - Ensaio de aderência com o equipamento DIPEA adaptado de Pereira (2002)



(5a)



(5b)



(5c)



(5d)

Fonte: Ramalho (2011)

Já Guimarães (2013) avaliou a influência da aplicação de mantas geotêxteis entre camadas de revestimentos asfálticos quanto à aderência na sua interface, variando a taxa aplicada, o tipo de emulsão e a superfície de contato entre as camadas. Para tanto, a autora utilizou o ensaio de cisalhamento direto *Leutner* para medir a aderência entre essas camadas, utilizando amostras produzidas em laboratório e extraídas de pistas experimentais (ver Figura 6).

Figura 6 - Detalhes do ensaio de cisalhamento direto *Leutner*.



(6a) - CP antes do ensaio.

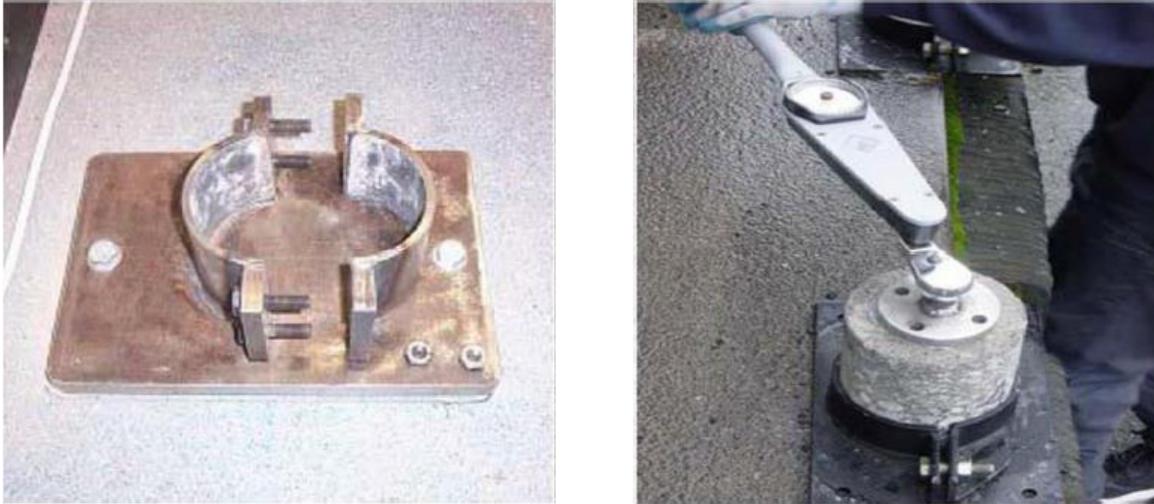


(6b) - CP após o ensaio.

Fonte: Guimarães (2013)

Tashman *et al.* (2006), ao investigar a aderência entre a base imprimada e o revestimento, fizeram uso do ensaio conhecido como *Torque Bond Test* que foi originalmente desenvolvido na Suécia para avaliar a interface da base com a camada de revestimento (WALSH *et al.*, 2001). Esse ensaio foi adotado no Reino Unido para avaliar a interface entre uma camada de revestimento existente e uma nova camada de revestimento de espessura fina. No ensaio, um CP é extraído de modo a ultrapassar a zona de interface (ROFFE e CHAIGNON, 2002). Em seguida, a parte do CP localizada abaixo da interface é colocada em uma unidade de fixação Figura (7a), então se cola um disco de aço na parte superior do CP, acopla-se uma chave de torque manual onde é aplicado um torque até que ocorra sua ruptura, anotando-se o valor do toque máximo medido no momento da ruptura. Essa força de rompimento é utilizada para calcular a resistência ao cisalhamento da interface entre as camadas Figura (7b). Esse teste de ligação do torque em laboratório é executado a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Figura 7 - Detalhe do ensaio: *Torque Bond Tester*



(7a)

(7b)

Fonte: Tashman *et al.* (2006)

Sendo assim, verifica-se que o *Torque Bond Tester* avalia a força de ligação de interface entre camadas betuminosas onde é aplicada uma torção de cisalhamento até que haja a falha. A força do torque necessário para a falha indica a força de aderência da camada avaliada. A resistência de união entre as camadas é calculada utilizando-se a Equação 1.

$$\tau = \frac{12M.10^6}{\pi .D^3} \quad (1)$$

Onde: τ = força de ligação interfacial (kPa); M = torque máximo até a ruptura (N.m);
D = diâmetro do corpo de prova (mm).

2.7.3 *Desgaste superficial*

Em serviços de pavimentação, após a execução da imprimção betuminosa, existe um período antes da execução do revestimento onde o trecho é liberado para o tráfego sob a restrição de

carga e velocidade dos veículos. Para 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 vistos nos subitens que se seguem.

2.7.3.1 Adaptação do ensaio LWT

Duque Neto (2004) utilizou o mesmo equipamento LWT da norma aplicada ao microrrevestimento com adoção das seguintes modificações:

- 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;
- foi utilizada uma base de fixação do molde;
- 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;
- foi feita a compactação do solo dentro do molde de forma percussiva com o uso de um soquete de compactação Marshall;
- o ensaio de adesão de areia não se aplicou à técnica da imprimação e, portanto não foi utilizada no caso do uso do LWT.

A moldagem das placas se deu com o solo na umidade ótima, que após 15 minutos foram imprimadas, pois de acordo com Castro (2003) a influência da molhagem prévia ou 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 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. Para simular a cura de campo as amostras foram submetidas à secagem em estufas por 48 horas à temperatura de 50°C.

Foram criadas ainda 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.

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

Fonte: Duque Neto (2004)

2.7.3.2 Adaptação do ensaio WTAT

O ensaio WTAT avalia o desgaste do material asfáltico quando submetido à ação do tráfego. 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:

- 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;
- foi usado um soquete Marshall para a compactação;
- não foi utilizado o ensaio de cone no caso da avaliação da imprimação;

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

A moldagem 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, 6 e 7) relacionando à atribuição de notas a observações visuais quanto ao arrancamento, presença ou não de exsudação e desgaste. Para tanto, o autor considerou conceitos de aprovação (muito bom e bom) ou de reprovação (ruim e péssimo) a partir do ensaio WTAT.

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 - Atribuições para a amostra no ensaio WTAT – camada antipó

Notas	Observações visuais	Perda por Abrasão (%)	Deslocamento (mm)
10	Arrancamento de até 20% e ausência de exsudação	< 30	< 2,0
8	Arrancamento de 20% a 50% e pequena exsudação	30 a 50	2,0 a 3,0
5	Arrancamento de 50% a 80% e/ou exsudação	50 a 80	3,0 a 4,0
0	Arrancamento maior que 80% e/ou exsudação	> 80	> 4,0

Fonte: Duque Neto (2004)

Tabela 7 - Conceitos para qualificação do ensaio WTAT

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

Fonte: Duque Neto (2004)

2.8 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de 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, considera-se muito importante que parâmetros como, coesão, adesão e desgaste superficial 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 apresentada a metodologia selecionada para a avaliação de tais parâmetros e materiais.

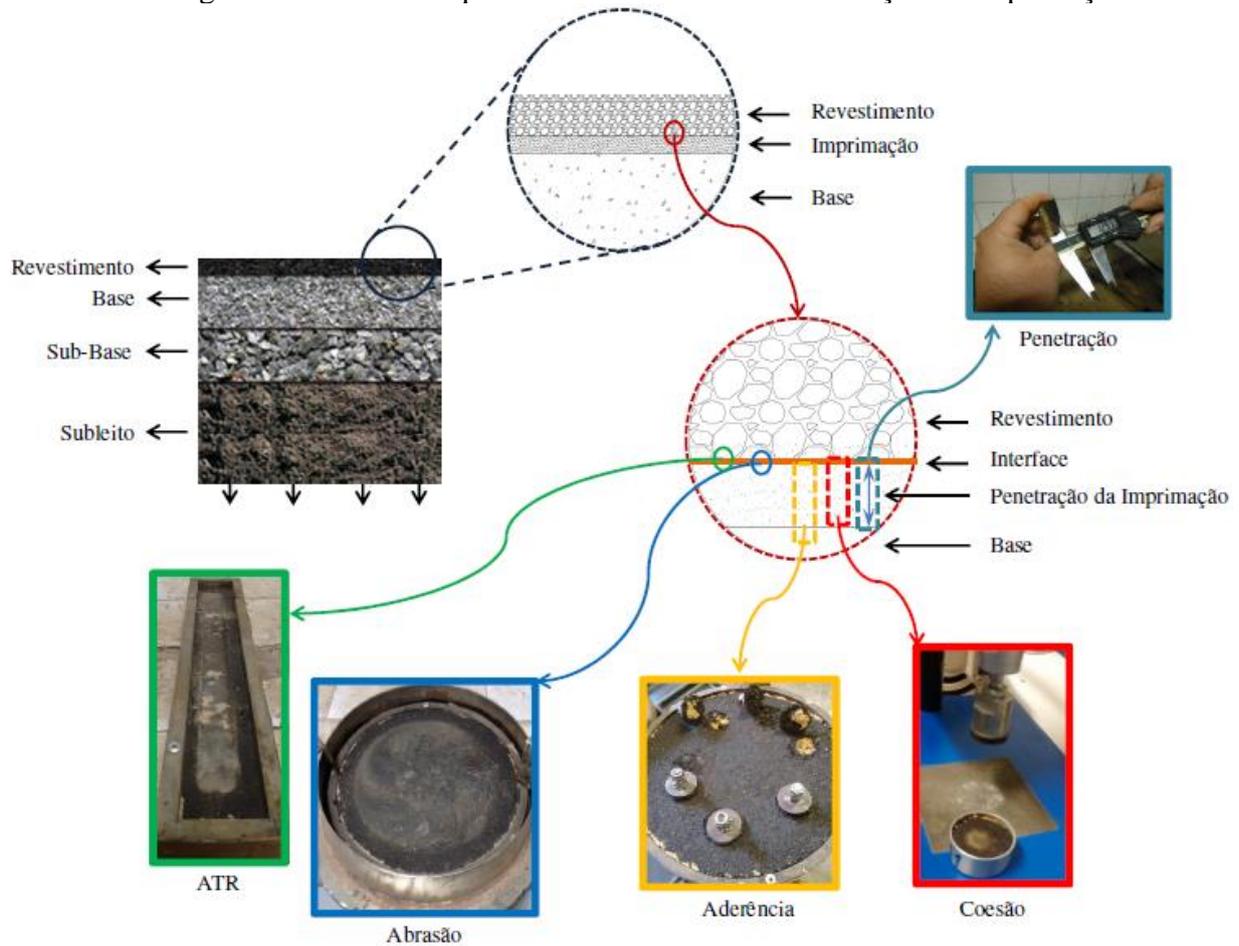
CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se a descrição dos materiais empregados nesta pesquisa, o programa experimental e os respectivos métodos para a realização dos experimentos. Para compreender melhor a interação solo/ligante asfáltico, foi caracterizado, classificado e ensaiado mecanicamente 01 solo típico de RBVTs do estado do Ceará e para imprimação foram investigados 01 ligante alternativo, 03 ligantes comerciais e 01 ligante comercial de referência do tipo CM-30. Esses materiais foram testados em laboratório por meio dos ensaios de penetração da imprimação, coesão, aderência e desgaste superficial, para a avaliação da viabilidade da substituição do ligante tradicional de referência por um ligante alternativo em serviços de imprimação betuminosa de RBVTs. A Figura 8 mostra um resumo esquemático dos ensaios realizados para a avaliação da imprimação.

Figura 8 - Resumo Esquemático dos Ensaios de Avaliação da Imprimação



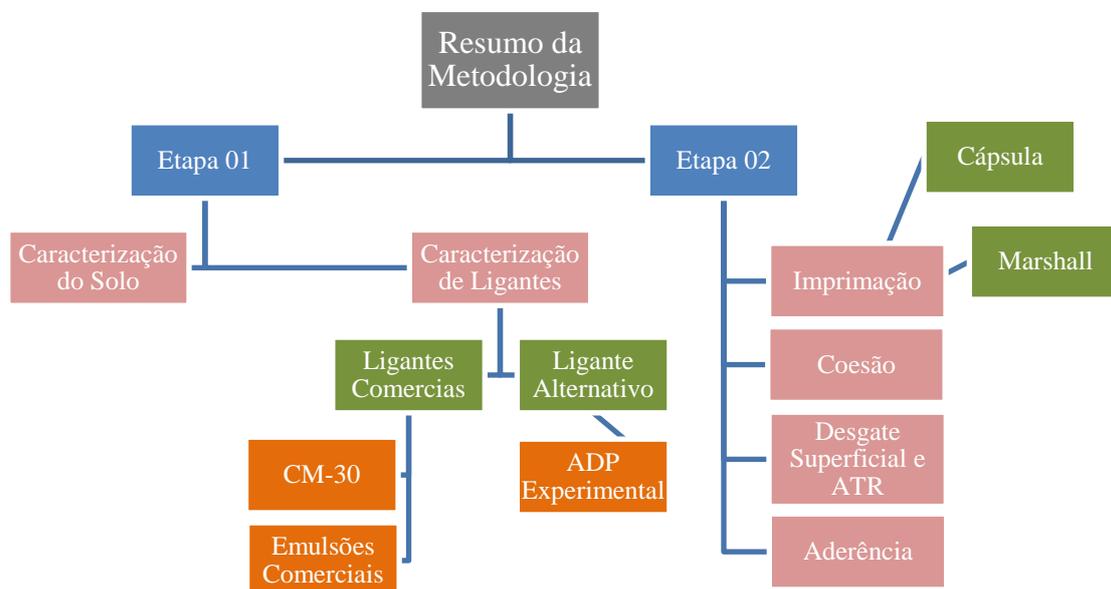
Fonte: Autor (2017)

A metodologia resumida empregada para o alcance dos objetivos desta pesquisa consistiu na realização das seguintes atividades:

- a) revisão bibliográfica sobre os tipos de materiais alternativos utilizados em serviços de imprimação betuminosa dos pavimentos e sobre quais as técnicas utilizadas para avaliação do desempenho da imprimação em laboratório;
- b) caracterização geotécnica e mecânica de um solo, frequentemente adotado em RBVTs no estado do Ceará;

- c) avaliação do comportamento quanto à imprimação, coesão, aderência, ATR e desgaste superficial dos 05 ligantes adotados nesta pesquisa aplicados na camada de base de RBVTs;
- d) análises dos resultados e indicação do ligante alternativo com desempenho similar e/ou superior ao ligante tradicional. A Figura 9 apresenta o resumo da metodologia empregada na fase experimental.

Figura 9 - Resumo da Metodologia



Fonte: Autor (2017)

3.2 Caracterização do solo

Foi coletado um solo, de característica arenosa, proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). A Tabela 8 apresenta a localização geográfica do solo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 8 - Localização geográfica do solo coletado

Amostra	Posição geográfica
01	3°44'27,00" S e 38°45'00,10" O

Fonte: Almeida (2013)

A Figura 10 mostra a localização geográfica e o aspecto visual da amostra, na época da coleta. Esse solo foi escolhido por ter sido utilizado nas obras de duplicação da BR 020 e do anel viário que liga as BR 116 e BR 222, que saem de Fortaleza, pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte) para base de pavimento. Esse material foi submetido aos ensaios indicados na Tabela 9.

Figura 10 - Localização geográfica e aspecto visual do solo coletado.



Fonte: GOOGLE EARTH (2013)



Fonte: Almeida (2013)

Tabela 9 - Ensaios e normas empregados para identificar o comportamento do solo coletado

Ensaios	Normas
Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização	DNER-ME 041/1994
Solos – Análise Granulométrica por Sedimentação	DNER-ME 051/1994
Análise Granulométrica por Peneiramento	DNER-ME 080/1994
Solos – Determinação do Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/1994
Solos – Determinação da Densidade Real	DNER-ME 093/1994
Solos – Determinação do Limite de Liquidez	DNER-ME 122/1994
Solos – Compactação no Cilindro Proctor	DNER-ME 162/1994
Solos – CBR e Expansão	DNER-ME 049/1994
Solos – Módulo de Resiliência	DNIT-ME 134/2010

Fonte: Autor (2017)

3.3 Materiais betuminosos

Conforme informado anteriormente, foram investigados 5 ligantes (01 comercial de referência, 01 alternativo e 03 comerciais) que foram submetidos aos ensaios de viscosidade Saybolt-Furol (ASTM E102/2009) e Ponto de Fulgor (ASTM D92/2005). Apresentam-se a seguir as principais características desses ligantes.

3.3.1 *Ligantes comerciais*

O ligante comercial betuminoso de referência é o Asfalto Diluído de Cura Média (CM-30), nomeado neste trabalho com as letras LR (Ligante de Referência), sendo escolhido por ser, no momento, o material tradicionalmente utilizado e o único material asfáltico comercialmente disponível para imprimação de bases granulares do estado do Ceará.

Foram também testadas 03 emulsões especiais comerciais para imprimação já em uso em serviços de imprimação no Brasil. As emulsões foram nomeadas de LC 01, LC 02 e LC 03. As empresas foram resguardadas por motivo de segurança de informação industrial. Foi realizada ainda a tentativa de produção de uma emulsão a base de óleo LCC, que é um líquido obtido a partir da extração mecânica e/ou solvente da casca da castanha de caju e largamente utilizado na indústria. Uma das empresas, que cedeu uma das emulsões para imprimação, realizou um teste para tentar produzir uma emulsão a partir do LCC, mas devido à alta acidez desse líquido os emulsificantes usualmente utilizados não conseguiram interagir com o LCC resultando na instabilidade da emulsão, sendo assim, não foi possível sintetizá-la.

3.3.2 *Ligante alternativo*

O ligante alternativo nomeado de LA, desenvolvido nesta pesquisa, é composto da mistura de CAP com D-limoneno, óleo vegetal obtido a partir de um processo de destilação por arraste de vapor das cascas de frutas cítricas. Esse produto foi introduzido nesta pesquisa após ser utilizado no LMP como um solvente de limpeza do laboratório, por possuir um odor mais agradável frente ao querosene e ao óleo diesel que eram utilizados antes para esse fim.

O D-limoneno é muito utilizado na indústria cosmética, de alimentos e de limpeza. Por possuir um aroma agradável é utilizado como aromatizante de vários produtos, sua extração é feita das cascas e do bagaço de frutas cítricas (laranja, limão e tangerina) com um rendimento médio de 1 litro de óleo para cada 300 kg de bagaço processado. Segundo a CitrusBR (2017), no Brasil, a produção de D-limoneno exportada pelo cinturão citrícula de São Paulo e Minas Gerais, no ano de 2016 foi de 312 toneladas e em 2017 até abril foram exportadas 188 toneladas do produto. No entanto, como não foram encontrados dados de consumo interno do produto estima-se que pela produção de laranjas destinadas a produção de suco de laranja pela indústria na safra 2015/2016 que foi de 9.617 mil ton daria para produzir cerca de 34.962 mil ton de D-limoneno (CITRUSB, 2017). Fazendo ainda um rápido cálculo sobre a quantidade de ligante que poderia ser gerada a partir dessa disponibilidade viu-se que poderiam ser produzidos cerca de 17.481 mil ton de ligante para imprimação. Com essa quantidade seria possível imprimarna taxa de 1,0 L/m² 2,5 milhoes de kms de rodovias , resultando em quase uma vez e meia a malha viária brasileira em extensão.

Para tanto, verificou-se que esse produto além de diluir facilmente o asfalto poderia compor um produto final com fins de aplicação em pavimentação podendo vir a substituir outros solventes na diluição do asfalto, mas que mantivesse sua qualidade. Assim, foram feitos alguns testes para desenvolver um produto que pudesse ser aplicado em serviço de imprimação betuminosa de rodovias, conforme também pode ser visto na qualificação de doutorado de Gondim (2015). Essa autora utilizou o D-limoneno para diluir um CAP modificado com a seiva de Aveloz na proporção 52/48% para produzir um ADP alternativo possível de ser utilizado em serviços de imprimação.

O D-limoneno foi utilizado então para diluir o CAP e foi empregado em substituição ao querosene. Essa substituição visou reduzir os compostos orgânicos voláteis e minimizar os prejuízos ao meio ambiente, como por exemplo: a evaporação do solvente (querosene) ao meio ambiente que contribui para o efeito estufa e a contaminação do solo e dos recursos hídricos devido o seu escoamento.

A modificação foi feita na proporção de 50% de CAP + 50% de D-limoneno. Essa proporção foi escolhida por ser aproximadamente a mesma proporção de CAP e solvente definida para os ADPs. O CAP 50/70 foi fornecido pela LUBNOR e o D-limoneno foi adquirido no mercado ao preço de R\$ 18,00 o litro, enquanto o preço do litro de querosene é encontrado por R\$ 16,00. Para o processo de preparo do ADP alternativo, o CAP foi pesado e colocado em estufa até atingir a temperatura de 70°C, sendo esse aquecimento necessário para melhor interação dos produtos. Já o D-limoneno, Figura (11a), foi misturado ao CAP e posteriormente os materiais foram adicionados em um misturador (modelo IKA RW20 DZM

à 500 rpm) por 30 minutos à temperatura de 75°C, Figura (11b), essa temperatura mais baixa foi escolhida para reduzir a volatilização do D-limoneno durante a misturação.

Figura 11 - Produção do ADP alternativo CAP/D-limoneno (LA)



(11a) D-limoneno

Fonte: Autor (2017)



(11b) Misturação

3.4 Descrição dos ensaios de imprimação

3.4.1 Procedimentos do ensaio de imprimação simplificado

A penetração do ligante betuminoso é apenas um dos parâmetros que devem ser considerados para qualificar um serviço de imprimação. Por esse motivo adotou-se, de acordo com a literatura (DANTAS, 1959; VILLIBOR *et al.*, 1989; CASTRO, 2003; DUQUE NETO, 2004), como satisfatório penetrações que ficaram entre 4,0 e 13,0 mm.

Para a avaliação prévia dos ligantes (comerciais e alternativos) utilizáveis para imprimação na base adotada nesta pesquisa, foi utilizado o método simplificado de laboratório, intitulado Método da Cápsula (ALMEIDA *et al.*, 2014). Esse método tem o objetivo de avaliar a penetração da imprimação betuminosa com menor dispêndio de materiais. Para tanto, são moldados corpos de prova em cápsulas de 43,0 mm de diâmetro e 22,0 mm de altura e sua compactação é realizada utilizando-se um coesímetro (Figura 12).

Figura 12 - Detalhes da moldagem do solo nas cápsulas



Fonte: Almeida *et al.*(2014)

Tal procedimento foi motivado pela economia de material e de tempo, além da facilidade de operação. No método Marshall, por exemplo, usa-se cerca de 1,0 kg de amostra para cada cilindro moldado, utilizando um soquete de 4,5 kg, aproximadamente, para a compactação, o que para análises preliminares gera um gasto maior de material. Já para moldagem de um solo em uma cápsula, utiliza-se 45,0 g de material em média. Essa diferença fica mais visível quando são comparados os dois moldes (Figura 13).

Figura 13 - Comparação entre o cilindro Marshall e a Cápsula



Fonte: Almeida (2013)

Em resumo foi utilizado o seguinte procedimento na realização do ensaio pelo método da cápsula:

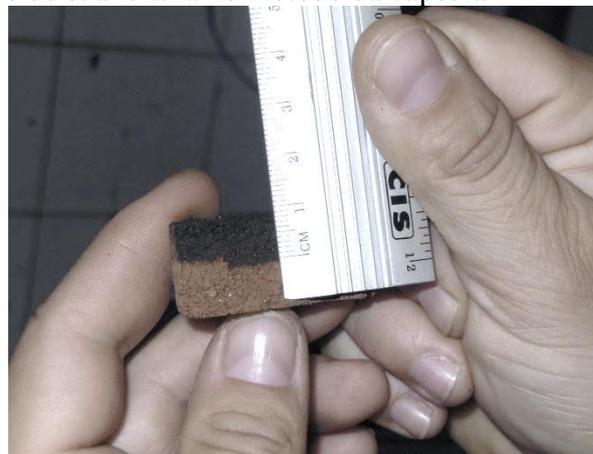
- a) homogeneizou-se o solo na umidade desejada e acondicionou-se em saco plástico;
- b) retirou-se três cápsulas de solo para verificar se a umidade desejada foi atingida;
- c) moldaram-se CPs na umidade ótima ($W_{ót}$), na umidade 2% acima da ótima ($W_{ót+2}$) e na umidade 2% abaixo da ótima ($W_{ót-2}$);
- d) pesaram-se amostras de 50,0 g, em média, de solo preparado na umidade desejada para moldar cada cápsula;
- e) aplicou-se, com uso de um coesímetro, uma torção de 40,0 kgf.cm medidos com uso do torquímetro manual;
- f) verificou-se o grau de compactação do CP moldado;
- g) aguardou-se, em média, 24 horas para que o CP curasse antes da imprimação;
- h) aplicou-se uma irrigação na taxa de 0,5 L/m² de água visando a desobstrução dos capilares da base;
- i) realizou-se o ensaio de imprimação, após 15 min da irrigação prévia, em 03 taxas para cada CP (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²);

- j) aguardou-se a cura por um período de 24 horas para o rompimento e verificação da penetração do ligante (Figuras 14a e 14b).

Figura 14 - Verificação da penetração e de sua leitura no método da cápsula



(14a) CP imprimado partido após a cura
Fonte: Autor (2017)



(14b) Leitura da penetração do ligante

3.4.2 Procedimentos de imprimação com o ligante de referência (LR) do tipo CM-30

Para fins de controle, o ensaio de imprimação foi realizado com o CM-30 seguindo o seguinte procedimento:

- aplicou-se o ligante após aquecê-lo a 50°C, com a finalidade de atingir a faixa de viscosidade recomendada para espalhamento, 20 a 60 segundos de Saybolt-Furol, recomendada pela especificação de serviço do DNIT 144/2014;
- compactaram-se as cápsulas com solo nas condições Wót, Wót+2 e Wót-2 e aguardou-se que esses materiais atingissem 50% das respectivas umidades de moldagem;
- executou-se a varrição da superfície para a retirada de material solto existente;
- aplicou-se em seguida a irrigação prévia com taxa 0,5 L/m² de água;
- aplicou-se o CM-30, após 15 min da irrigação prévia, nas taxas de 0,8, 1,0 e 1,2 L/m²;

- f) deixou-se os CPs em processo de cura de aproximadamente 24 horas. As Figuras 15a e 15b exemplificam esse processo;
- g) romperam-se os CPs para verificação da penetração após a cura da base.

Figura 15 - Procedimentos de imprimação com o CM-30



(15a) Base compactada

(15b) Imprimação do solo com CM-30

Fonte: Autor (2017)

3.4.3 *Procedimentos de imprimação com as emulsões comerciais e o ligante alternativo*

Para o teste inicial das emulsões comerciais e o ligante alternativo adotou-se o procedimento a seguir:

- a) compactou-se cápsulas com solo na Wót, Wót+2 e Wót-2, aguardando-se que esses materiais atingissem 50% das respectivas umidades;
- b) executou-se a varrição da superfície para a retirada de material solto;
- c) realizou-se a irrigação prévia da base, com taxa 0,5 L/m² de água para todos os ligantes, para a desobstrução da capilaridade superficial antes da aplicação dos produtos para imprimação;
- d) aplicaram-se o ligante alternativo e as emulsões comerciais na temperatura ambiente, após 15 min da irrigação prévia, nas 03 taxas investigadas (0,8, 1,0 e 1,2 L/m³);

- e) aguardou-se a cura dos CPs por aproximadamente 24 horas;
- f) romperam-se os CPs para verificação da penetração após a cura da base.

Esse procedimento de laboratório foi adotado com base nos procedimentos de campo, observando-se as principais variáveis relativas à execução da imprimação como: umidade de moldagem, taxa de aplicação e tempo de cura do ligante a fim de proporcionar maior controle nos ensaios.

Observa-se que na aplicação de campo, para melhorar a qualidade do serviço não se deve tráfegar sobre a superfície imprimada até que haja penetração completa do material sobre a base. A cura do ligante depende do tipo de base, mas esse tempo pode variar de 2 horas até 10 horas para a completa secagem da base imprimada (BETUNEL, 2015).

Conforme USACE (1999), o processo de cura das emulsões é dependente da evaporação da água, podendo ser lento ou paralisado sobre as condições de baixas temperaturas e altas umidades, enquanto os asfaltos diluídos não são tão dependentes das condições do tempo. Em tempo frio, ainda segundo esse órgão, os asfaltos diluídos de cura rápida têm melhor desempenho do que os de curas média e lenta.

Sabendo que a cura do ligante na base imprimada é um fator preponderante para o bom desempenho do pavimento, Rabêlo (2006) verificou o efeito do tempo de aplicação do ligante sobre a penetração, realizando a ruptura de CPs com 16, 24 e 72 horas depois da aplicação do ligante betuminoso em uma base compactada na Wót-2 e à taxa de 1,0 L/m². Contudo, esse autor observou que após 16 horas da aplicação, pareceu haver uma estabilização da

penetração na base, muito embora essa parada não signifique que o ligante tenha curado totalmente. Esse fato já havia também sido alertado por VILLIBOR *et al.* (1989) que recomendam a espera da secagem e endurecimento da superfície imprimada, condição esta que ocorre depois da completa cura do ligante asfáltico.

3.5 Coesão da base imprimada

A fim de medir a coesão superficial da base imprimada ainda nos testes preliminares, após as medidas da penetração foi realizado o ensaio de cisalhamento por torção, utilizando-se o coesímetro, geralmente usado para verificação da cura de lamas asfálticas. Após a cura da base imprimada (24 horas em média), colocou-se a cápsula no coesímetro e aplicou-se um torque usando um torquímetro acoplado ao eixo do êmbolo do coesímetro (Figura 16a), girando-o a velocidade constante até o momento em que ocorre a ruptura da camada imprimada. Nesse momento verificou-se o torque máximo medido. Na Figura 16b observa-se a base rompida após o ensaio.

Entendeu-se que através desse ensaio foi possível medir o acréscimo da coesão superficial fornecida pela aplicação do ligante betuminoso, onde os valores encontrados variaram para cada tipo de ligante utilizado. Além da avaliação dos dados isolados de coesão por meio do valor máximo de torque, esses foram correlacionados com a penetração. Foi realizada ainda a verificação da evolução da resistência ao cisalhamento oferecida pela base imprimada até seu rompimento, medindo-se a variação da resistência pela deformação angular. Para entender melhor em que momento ocorre a ruptura da camada, o ensaio foi realizado observando-se o

ângulo de ruptura da camada que foi o momento onde o valor do torque medido parou de crescer.

Figura 16 - Avaliação da coesão superficial com o coesímetro



(16a) Torquímetro aclopado ao coesímetro

Fonte: Autor (2017)



(16b) Base rompida

3.6 Aderência da base imprimada

Para avaliar a aderência da camada imprimada com o revestimento e a fim de estudar essa interface em diferentes taxas de aplicação, foi realizado o ensaio de aderência conhecido como DIPEA. Esse ensaio foi adaptado por PEREIRA (2002) e utilizado por RAMALHO (2011), conforme relatado no Capítulo 2 (ver Figura 5). Esse método foi escolhido tendo em vista as finas espessuras conseguidas pela penetração da imprimação que devem variar de 4,0 a 13,0 mm para serem consideradas adequadas.

Entendeu-se que esse método conseguiu mensurar 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.

Para tanto, tendo em vista a importância desse teste na seleção de ligantes através da penetração e buscando utilizar os equipamentos disponíveis no LMP, foram realizadas algumas adaptações. Inicialmente, verificou-se que a espessura das placas a serem moldadas deveria permitir a penetração do ligante a fim de oferecer coesão à base para viabilizar a execução dos ensaios.

Assim, o molde foi confeccionado com espessura de 25,0 mm de espessura, possibilitando que o CP atingisse 22,0 mm de espessura. Essa espessura se mostrou suficiente, tanto para que os ligantes penetrassem, bem como para oferecer estabilidade para realização dos ensaios de aderência, por meio de arrancamentos.

A compactação da placa para avaliação da aderência e do desgaste superficial foi realizada por meio de um soquete Marshall manual, foram aplicados 13 golpes em uma única camada, calculada a partir da espessura desejada (22,0 mm) para uma energia de compactação intermediária (Figura 17). Para a realização do processo da compactação com o soquete Marshall adotou-se que cada porção de solo a ser compactada teria ao final uma espessura de 22,0 mm, calculou-se então a quantidade de golpes a partir da Equação 2.

$$E_c = \frac{n \cdot P \cdot H}{V} \cdot N \quad (2)$$

Onde:

E_c : energia de compactação [13,38 kg x cm/cm³, para a energia intermediária];

P: peso do soquete [4,536 kg];

H: altura de queda [45,7 cm];

N: número de camadas;

n: número de golpes; e

V: volume do corpo de prova [$V = 157,0 \text{ cm}^3$].

Substituindo-se os valores correspondentes à energia de compactação intermediária (E_c), o peso (P), a altura de queda do soquete (H), o volume do cilindro (V) e o número de camadas (N) na equação 2, obtém-se 10,4 para o número de golpes (n). Essa quantidade de golpes fornece ao corpo de prova a energia necessária para reproduzir a energia de compactação utilizada no cilindro Proctor. Ressalta-se que esse valor foi arredondado para 10 golpes.

Figura 17 - Compactação das placas para o ensaio de aderência e WTAT



Fonte: Autor (2017)

Assim, foram seguidos os seguintes passos:

- a) moldaram-se corpos de prova na forma de placas circulares;

- b) aguardou-se por 48 horas, em média, para que houvesse a perda de 50% da umidade de moldagem;
- c) imprimaram-se os CPs após 48 horas da moldagem;
- d) aguardou-se a cura dos mesmos que durou em média 24 horas;
- e) colaram-se os discos de arrancamento com cola epóxi e aguardou-se a secagem por 30 minutos;
- f) acoplou-se o torquímetro aplicando-se uma torção até o rompimento da camada anotando-se o torque máximo lido no momento da ruptura da camada.

A Figura 18a mostra os discos arrancados após o ensaio, na Figura 18b verifica-se o detalhe da porção da base arrancada e, por fim, a Figura 18c apresenta a placa rompida para medição da penetração.

Figura 18 - Ensaio de aderência por meio da resistência ao arrancamento da base imprimada



(18a) discos arrancados

(18b) porção da base arrancada

(18c) penetração medida

Fonte: Autor (2017)

Por falta de valores comparativos para avaliar a aderência da camada imprimada de pavimentos asfálticos, 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 são da ordem de 0,2 MPa segundo a NBR 13528 (2010).

3.7 Ensaios de desgaste superficial

Para verificação da durabilidade da camada imprimada, simulando o tráfego quando liberado antes da aplicação do revestimento asfáltico, foi avaliado o comportamento da camada imprimada submetida a esse desgaste. 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. 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.

Já para o ensaio WTAT foram feitas 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. As características da peça de abrasão foram mantidas.

Os ensaios de desgaste WTAT (Figura 19a) e LWT (Figura 19b) foram realizados com base em Duque Neto *et al.* (2004) e utilizados por Vasconcelos (2013) para a confecção de amostras, a fim de criar uma camada de solo com espessura semelhante à superfície de uma base de pavimento de campo.

Figura 19 - Equipamentos para avaliação do desgaste superficial



(19a) WTAT

Fonte: Autor (2017)



(19b) LWT

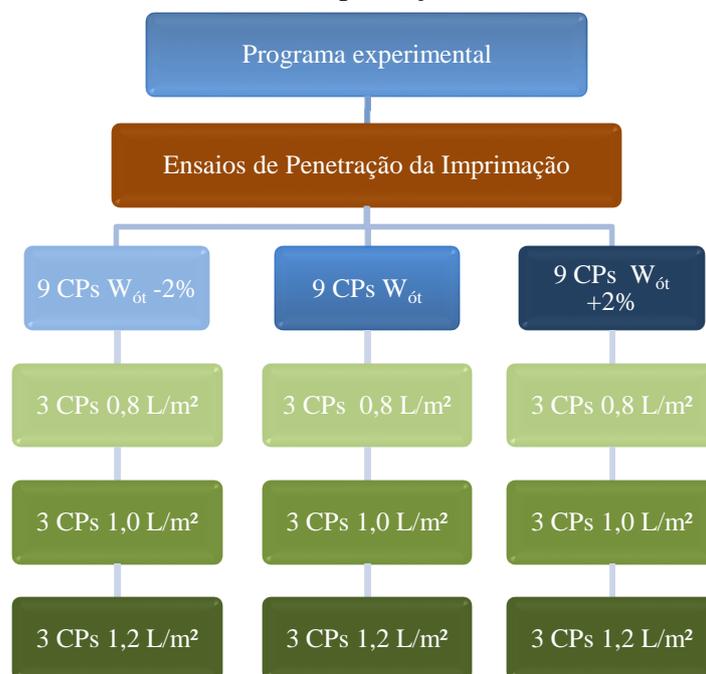
Para o LWT foram confeccionados moldes de 25,0 mm de altura, 50,0 mm de largura e 381,0 mm de comprimento. Para o ensaio WTAT foram usados moldes de 300,0 mm de diâmetro e 25,0 mm de altura (DUQUE NETO *et al.*, 2004). As condições de carregamento, velocidades do equipamento e tipo de superfície de contato foram mantidas conforme os ensaios padronizados pela ABNT (NBR 14746, 2014 e NBR 14841, 2015).

Os métodos dos ensaios simulam a durabilidade da base imprimada quando a mesma está sujeita à ação do tráfego, quando esse é liberado antes da aplicação do revestimento. Considera-se que, se a base imprimada possuir uma boa interação com o ligante, proporcionando boa resistência ao desgaste, acredita-se que a coesão da base estará satisfeita e o desgaste será insignificante.

3.8 Considerações finais

Na Figura 20 apresenta-se um resumo do programa experimental desta pesquisa para avaliar a penetração da imprimação betuminosa dos ligantes testados com o método da Cápsula e no método Marshall. Para a análise das amostras de ligantes, ao todo, foram moldados: (i) 135 cápsulas para avaliação da penetração e coesão e 108 CPs Marshall para avaliação da penetração; (ii) 48 placas circulares de WTAT; (iii) 48 placas de LWT para investigação do desgaste e ATR; (iv) 24 placas no molde do WTAT para realização do ensaio de aderência por meio de arrancamento, sendo três CPs por teor de umidade ($W_{ót}$, $W_{ót+2}$ e $W_{ót-2}$) para cada taxa de imprimação (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²).

Figura 20 - Esquema do programa experimental adotado para avaliar a penetração da imprimação



Fonte: Autor (2017)

Resumidamente, neste capítulo foram apresentados os materiais, o programa experimental utilizado, bem como os detalhes dos procedimentos dos ensaios de penetração, coesão, adaptação dos ensaios de aderência, e desgaste superficial. Foi possível verificar que mesmo para os ensaios já estabelecidos foram necessárias algumas adaptações, tais como espessura das amostras e ensaio realizado sem a presença de água, pois como os CPs ensaiados possuem espessuras esbeltas, tais modificações foram essenciais para garantir o sucesso dos ensaios. No ensaio de aderência por meio de arrancamentos foi necessário, por exemplo, a confecção de discos menores para atender ao limite de torque oferecido pelo torquímetro disponível. No capítulo que se segue serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos a partir da metodologia aqui estabelecida.

CAPÍTULO 4

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de 5 ligantes utilizados em um solo aplicável à camada de base de RBVTs. Inicialmente, são apresentados os resultados da caracterização e o comportamento mecânico do solo (densidade real, granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, classificação AASHTO, compactação, CBR e MR), além da caracterização dos ligantes (penetração, viscosidade e Ponto de Fulgor). Em seguida, apresenta-se o comportamento dos ligantes investigados nesta pesquisa para o solo quanto à penetração, coesão, aderência e desgaste superficial.

Por fim, analisam-se os principais fatores que interferem no comportamento desses ligantes, tais como: a umidade de compactação, a massa específica aparente seca, o teor de umidade, a taxa, o tipo e o tempo de cura do ligante.

4.2 Resultados da caracterização do solo

Os resultados dos ensaios de granulometria, índices físicos, densidade e a classificação AASHTO do solo estudado são apresentados na Tabela 10. Percebe-se que a amostra do solo possui uma granulometria fina com 89% das partículas passantes na peneira de abertura nominal igual a 2,0 mm.

Tabela 10 - Resultados da caracterização do solo

Parâmetros	Resultados	
Granulometria	2"	100%
	1"	100%
	3/8"	100%
	Nº 4	99%
	Nº 10	89%
	Nº 40	58%
	Nº 200	36%
% < 0,05mm	25%	
% < 0,002mm	16%	
Densidade Real	2,560 g/cm ³	
IP	NP	
LL	NL	
AASHTO	A-2-4	

Fonte: Autor (2017)

O resultado da densidade real desse solo foi de 2,560 g/cm³. Rabêlo (2006) cita que os baixos valores encontrados das densidades nos solos do Ceará podem ser justificados pela predominância de minerais secundários, resultantes da fragmentação de rochas por agentes químicos, natural dos siltes finos e das argilas. Barroso (2002) mostrou que os resultados dessas densidades para solos da RMF variam de 2,580 g/cm³ a 2,660 g/cm³.

4.3 Propriedades mecânicas do solo

Após o ensaio de compactação do solo, encontrou-se a umidade ótima de 9,2% e massa específica seca máxima de 1.728 g/cm³. Verificou-se que o solo apresentou um baixo valor de expansão (0,05%), ficando dentro do limite estabelecido pelo DER/CE, menor que 0,5%, mostrando que esse material pode ser aplicado em camadas granulares de pavimentos rodoviários. O valor de CBR (39,5%) encontrado indica que esse solo pode ser utilizado como sub-base ou como base de RBVTs, onde são esperadas menores solicitações de tráfego (SENÇO, 2001).

Na Tabela 11 é apresentado o resultado do MR médio, bem como da equação do modelo composto que leva em consideração as tensões, confinante e desvio, simultaneamente. Apresenta também o coeficiente de determinação do solo estudado. Nota-se que para o solo utilizado quando na Wót seu R² foi de 81%, sendo esse o maior coeficiente obtido dentre os cinco modelos testados por Bastos (2013) que também usou esse mesmo solo em sua pesquisa de mestrado.

Tabela 11 - Resultados do MR do solo investigado nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2

Solo	Umidades	M _R (MPa)	R ²	MR _{Médio}
01	Wót-2	$455 \cdot \sigma_3^{0,437} \cdot \sigma_d^{-0,400}$	72%	328
	Wót	$680 \cdot \sigma_3^{0,460} \cdot \sigma_d^{-0,209}$	81%	298
	Wót+2	$728 \cdot \sigma_3^{0,493} \cdot \sigma_d^{-0,194}$	84%	230

Fonte: Adaptado de Bastos (2013)

Segundo Souza Junior (2005) e Bastos (2013), com a avaliação de alguns modelos matemáticos é possível destacar a boa representatividade do MR pelo modelo composto que tem representado bem o comportamento de solos do estado do Ceará.

4.4 Caracterização dos materiais betuminosos

Os ensaios no ADP CM-30 foram realizados no laboratório do fabricante (Petrobras/LUBNOR) que cedeu o referido ligante. Esses resultados estão apresentados na Tabela 12. Pode-se observar que esse ADP atende a todos os requisitos da norma DNIT 128/2010, sendo apropriado para aplicação em serviços de imprimação. Na Tabela 13 são apresentados os resultados das emulsões comerciais utilizadas.

Tabela 12 - Resultados da caracterização do ligante CM-30

Características	Métodos	Especificação	CM-30
Viscosidade Cinemática a 60°C, cSt	D 2170	30 a 60	55,4
Ponto de Fulgor (°C)	D 3143	> 38	41
Destilado a 225°C (% volume)	D 402	< 25	19,5
Destilado a 260°C (% volume)	D 402	40 a 70	50
Destilado a 316°C (% volume)	D 402	75 a 93	82,9
Resíduo a 360°C por diferença (% volume)	D 402	> 50	59
Água por destilação (% volume)	D 95	< 0,2	<0,05
Viscosidade a 60°C no resíduo da destilação	D 2171	300 a 1200	695
Solub. no Tricloroetileno no resíduo da destilação (%)	D 2042	> 99	100
Ductibilidade 15,5°C no resíduo da destilação (cm)	D 113	> 100	150

Fonte: AB-UM/LUBNOR (2015)

Tabela 13 - Resultados da caracterização das emulsões comerciais

Características	Métodos	Limites	LC 01	LC 02	LC 03
Viscosidade Saybolt-Furol à 25°C,ssf	NBR 14491	Máx 90	12	< 90	< 90
Resíduo por Evaporação, % peso	NBR 14376	Mín 20	51	> 20	> 20
Peneiramento, 0,84 mm, % em peso	NBR 14393	Máx 0,1	0,01	< 0,1	< 0,1
Sedimentação, 5 dias, % peso	NBR 6570	Máx 10	2	< 10	< 10
Destilação - solvente destilado, % vol	NBR 6568	Máx 15	0	< 15	< 15
Ph	NBR 6299	Máx 8	3,9	< 8	< 8

Fonte: Autor (2017)

O LA (Ligante Alternativo) apresentou viscosidade Saybolt Furol, de valor 80ssf a 25°C, atendendo à NBR 14950 (2003). O Ponto de Fulgor foi de 55°C, mostrando-se vantajoso em relação ao ligante de referência que apresentou Ponto de Fulgor de 41°C, embora ambos estejam acima do limite mínimo determinado pela resolução ANP N° 30 de 09.10.2007. De maneira semelhante, as amostras LC 01, LC 02 e LC 03 atenderam a todas as características indicadas pelos métodos citados na Tabela 13.

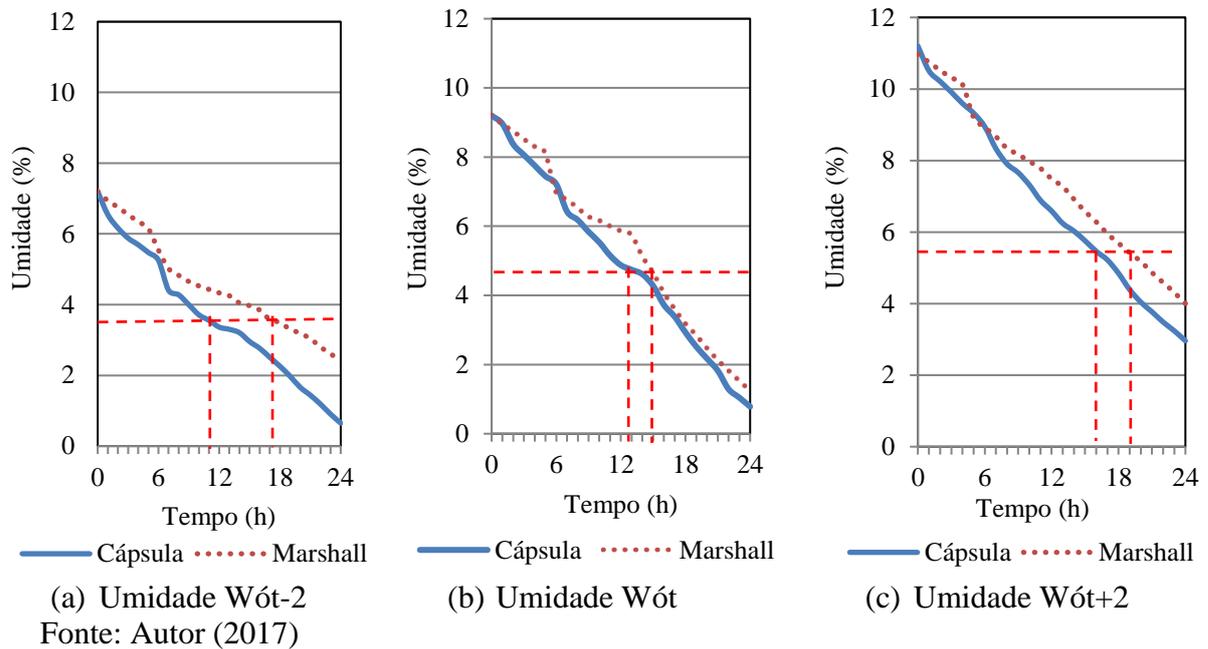
4.5 Ensaio de penetração da imprimação betuminosa

4.5.1 Avaliação do tempo da perda de umidade

Quanto à metodologia de aplicação das amostras LC 01 e LC 02, foi indicado ser dispensável a irrigação prévia. Observa-se que a supressão dessa etapa pode ser uma opção adequada para a atual crise hídrica do estado do Ceará, onde a escassez de água compromete as obras de infraestrutura. Sabe-se que para a aplicação da irrigação à taxa de 0,5 L/m² em uma via com plataforma de 7 metros, necessita-se em torno de 3.500 litros de água para a irrigação de 1 km de via. Entretanto, para manter uniformidade no procedimento, todos os CPs receberam a irrigação prévia. Assim, todos os CPs foram irrigados à taxa de 0,5 L/m² de água antes da aplicação dos ligantes, que se deu após 15 minutos da irrigação prévia.

Dessa forma, tornou-se imperativo avaliar o tempo de perda da umidade de moldagem das amostras moldadas na cápsula e no Marshall (Figura 21), pois a irrigação prévia é aplicada após a perda de 50% dessa umidade. Os resultados foram encontrados a partir da média de três CPs para o método Marshall e de nove para o método da Cápsula, sendo que todas foram submetidas à secagem na mesma condição ambiente (em torno de 28°C). Acredita-se que a quantidade de solo e a área superficial do CP foi um fator determinante para que a perda da umidade de moldagem fosse mais rápida na cápsula (40 g) do que no Marshall (1000 g), pois à medida que a espessura do CP diminui tem-se uma redução do caminho percorrido pela água contida no solo, favorecendo a perda de água para o ambiente. Verificou-se ainda que a compactação do solo na cápsula atingiu um grau de compactação máximo de 90%, mostrando que a massa específica também contribui para uma perda mais rápida da umidade.

Figura 21 - Perda da umidade de moldagem - Cápsula \times Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)



Na Figura 21, observou-se que para a amostra moldada na cápsula, a perda de 50% da umidade de moldagem aconteceu em menos tempo independentemente da variação da umidade de moldagem. Para a condição Wót-2, a perda ocorreu 11 h após a moldagem; e para a amostra moldada no Marshall, esse tempo foi maior, cerca de 17 h, sendo essa a maior diferença encontrada na avaliação do tempo de perda de umidade. Para a umidade ótima (Wót) na cápsula, a perda ocorreu 13 h após a moldagem, já no Marshall esse tempo foi bem próximo, cerca de 15 h. Já para a condição Wót+2, essa diferença voltou a aumentar, cerca de 16h na cápsula e 19 h no CP moldado no cilindro Marshall. De todo modo, recomenda-se o emprego das 24 h de secagem da base para recebimento da imprimação, tendo em vista que o tempo de cura também vai depender do tipo de material a ser ensaiado. Para materiais mais argilosos, há tendência da perda de umidade ser mais lenta com o passar do tempo.

4.5.2 Comparação do método da Cápsula × Marshall para penetração da imprimação

Após a avaliação do tempo de perda da umidade das amostras moldadas na cápsula e no Marshall, avaliou-se a penetração da imprimação pelo método da cápsula (ALMEIDA *et al.*, 2014) que tem como objetivo a seleção de ligantes sem que haja dispêndio excessivo de materiais e pelo cilindro Marshall modificado (RABÊLO, 2006) como forma de validar a metodologia simplificada (Figuras de 23 a 27). Na Figura 22 é apresentado um resumo dos resultados de penetração de todos os ligantes testados com o método simplificado e com o método Marshall e seus respectivos desvios.

Figura 22 - Resumo dos resultados de penetração na Cápsula e no Marshall

Ligantes	Taxas (L/m ²)	Cápsula (mm)			Marshall (mm)		
		Wót-2	Wót	Wót+2	Wót-2	Wót	Wót+2
LR	0,8	5,4	5,0	1,1	5,7	5,7	0,0
	Desvio	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0
	1,0	8,3	7,4	1,0	7,6	4,5	0,3
	Desvio	1,6	1,3	0,4	0,2	0,1	0,0
	1,2	6,8	5,2	0,8	7,2	5,3	0,0
	Desvio	0,4	0,3	0,5	0,2	0,1	0,0
LA	0,8	6,6	6,1	8,5	7,0	5,6	2,3
	Desvio	1,0	0,9	1,8	0,2	0,1	0,1
	1,0	6,8	4,4	6,0	7,9	5,1	2,1
	Desvio	0,8	2,1	1,6	1,0	0,3	1,1
	1,2	8,8	7,7	3,4	9,8	7,3	2,0
	Desvio	0,8	0,9	1,4	0,5	0,1	0,2
LC01	0,8	3,7	3,9	0,9	4,9	2,7	2,2
	Desvio	0,5	0,7	0,1	0,1	0,2	0,1
	1,0	5,4	4,2	0,9	5,1	1,0	0,9
	Desvio	1,6	2,1	0,4	0,8	0,8	0,2
	1,2	6,3	5,1	2,0	6,0	3,5	0,8
	Desvio	0,7	0,5	0,4	0,6	0,1	0,1
LC02	0,8	1,4	0,8	1,1	2,1	0,8	0,0
	Desvio	0,4	0,3	0,1	0,2	0,2	0,0
	1,0	4,1	4,7	0,4	1,8	0,8	0,3
	Desvio	0,6	1,3	0,4	0,1	0,4	0,2
	1,2	1,1	1,0	1,9	2,4	0,0	0,0
	Desvio	0,2	0,3	0,4	0,1	0,4	0,1

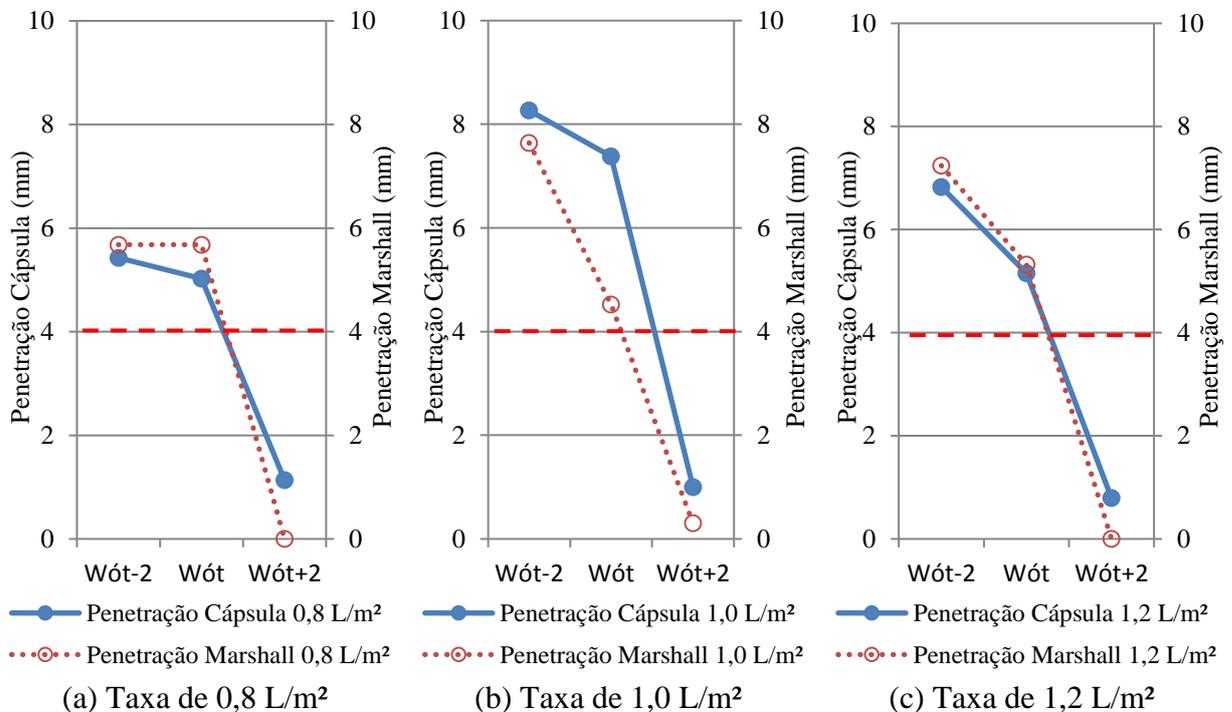
LC03	0,8	2,5	1,0	0,3	1,8	0,3	0,0
	Desvio	0,3	0,6	0,5	0,1	0,0	0,2
	1,0	3,5	0,5	0,7	1,1	0,0	0,1
	Desvio	0,1	0,5	0,3	0,1	0,3	0,3
	1,2	3,6	2,1	1,2	1,0	0,0	0,0
Desvio	0,9	0,5	0,7	0,1	0,0	0,0	0,1

Fonte: Autor (2017)

4.5.2.1 Resultados para o LR (Ligante de referência)

Na Figura 23 são apresentados os resultados para o LR nas taxas de aplicação 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót, Wót+2). Verificou-se que as penetrações medidas no método da Cápsula ficaram próximas dos encontrados no método Marshall, atestando que para esse ligante o método simplificado atendeu ao propósito de verificar a penetração com menos gasto de tempo e material.

Figura 23 - Penetração do LR - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

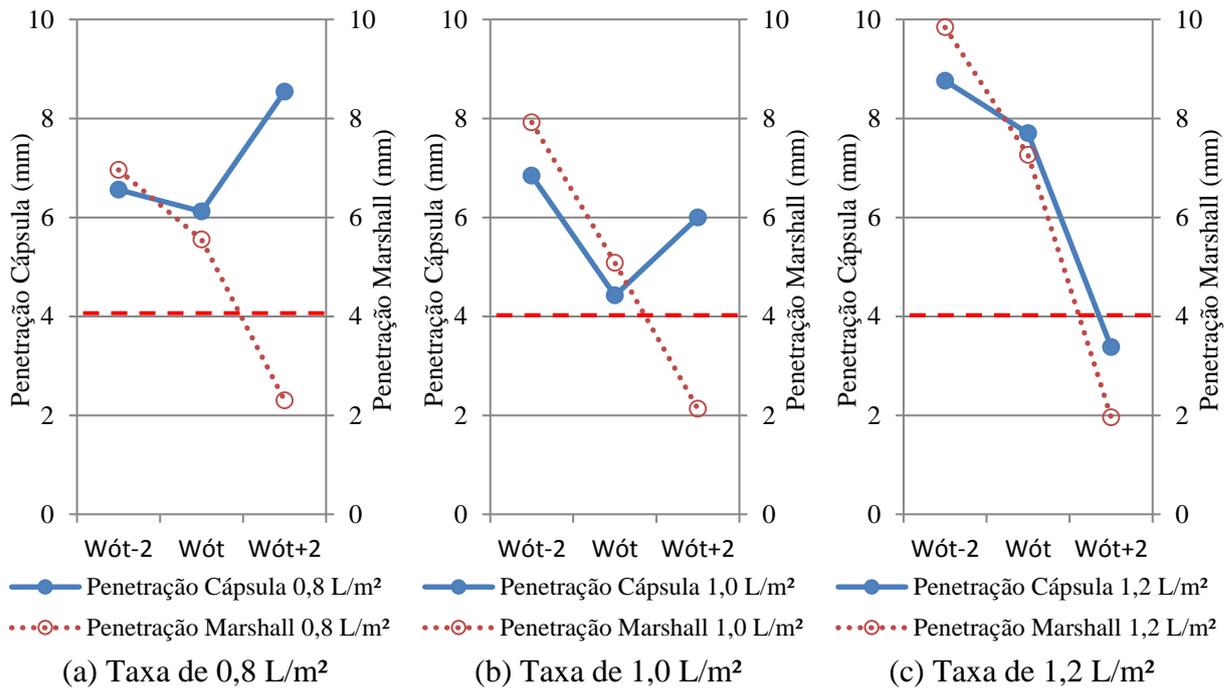


Fonte: Autor (2017)

4.5.2.2 Resultados para o LA (Ligante alternativo)

Na Figura 24 são apresentados os resultados para o LA nas taxas de aplicação 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót, Wót+2). Verificou-se que para o LA as penetrações obtidas nas condições de umidade Wót-2 e Wót seguiram a mesma tendência de decréscimo. Muito embora para as taxas 0,8 e 1,0 L/m² na condição de base mais úmida (Wót+2) as penetrações foram contrárias. Acredita-se que a penetração no método da Cápsula tenha sido maior, pelo fato do grau de compactação ter atingido 90%, fato que causa uma penetração levemente maior na Cápsula para a maioria das verificações, o que já era esperado.

Figura 24 - Penetração do LA - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

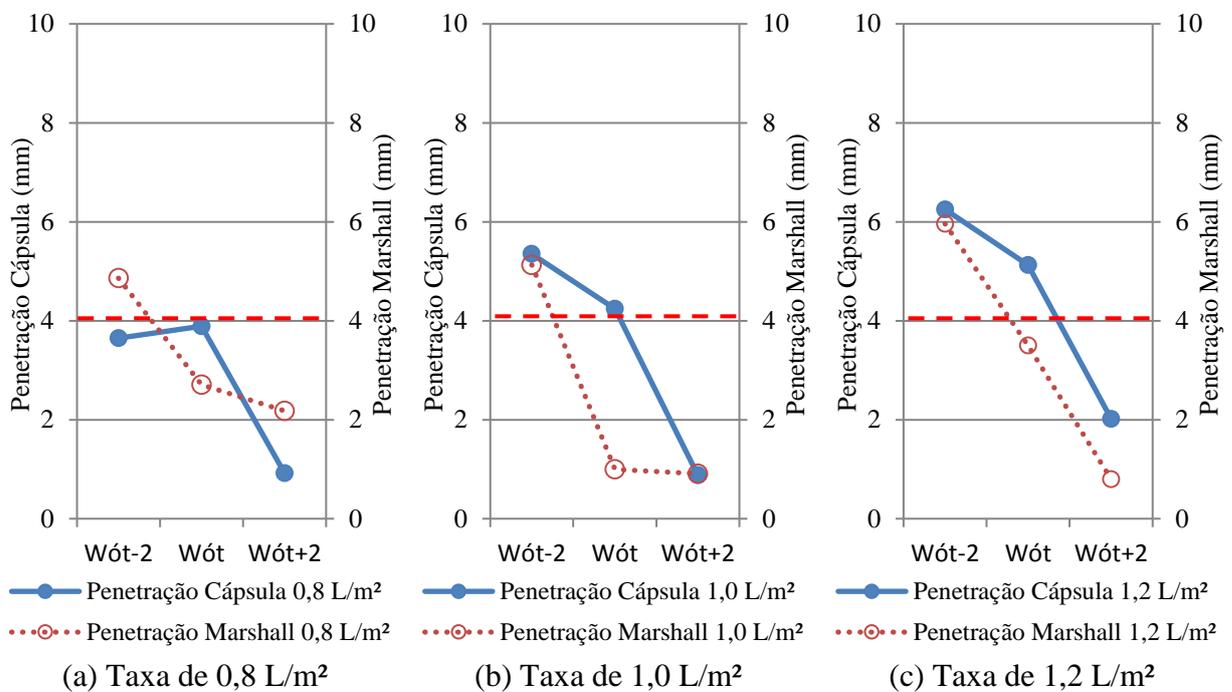


Fonte: Autor (2017)

4.5.2.3 Resultados para o LC 01 (Ligante comercial 01)

Na Figura 25 são apresentados os resultados para o LC 01 nas taxas de aplicação 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót, Wót+2). Verificou-se que para o LC 01 as penetrações seguiram a mesma tendência tanto na Cápsula quanto no Marshall que foi de apresentar penetrações maiores quando da base mais seca e com valores próximos, no entanto com penetrações menores onde a base esteve mais úmida, mostrando que o método simplificado apresenta bons resultados com diferentes ligantes.

Figura 25 - Penetração do LC 01 - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)



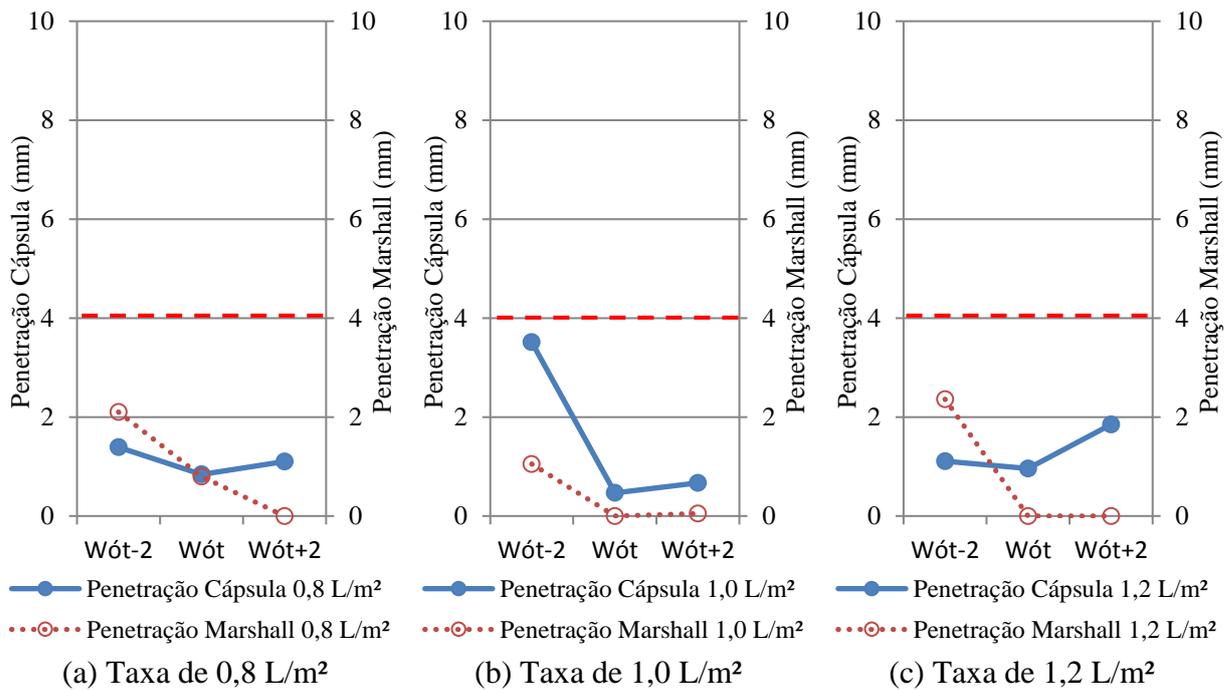
Fonte: Autor (2017)

4.5.2.4 Resultados para o LC 02 (Ligante comercial 02)

Na Figura 26 são apresentados os resultados para o LC 02 nas taxas de aplicação 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót, Wót+2). Verificou-se que para esse ligante os resultados obtidos pelos dois métodos ficaram muito próximos atestando mais uma vez que o

método simplificado de verificação da penetração se mostra uma opção mais rápida para a seleção de novos ligantes e/ou testes em diferentes bases granulares de solos finos.

Figura 26 - Penetração do LC 02 - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

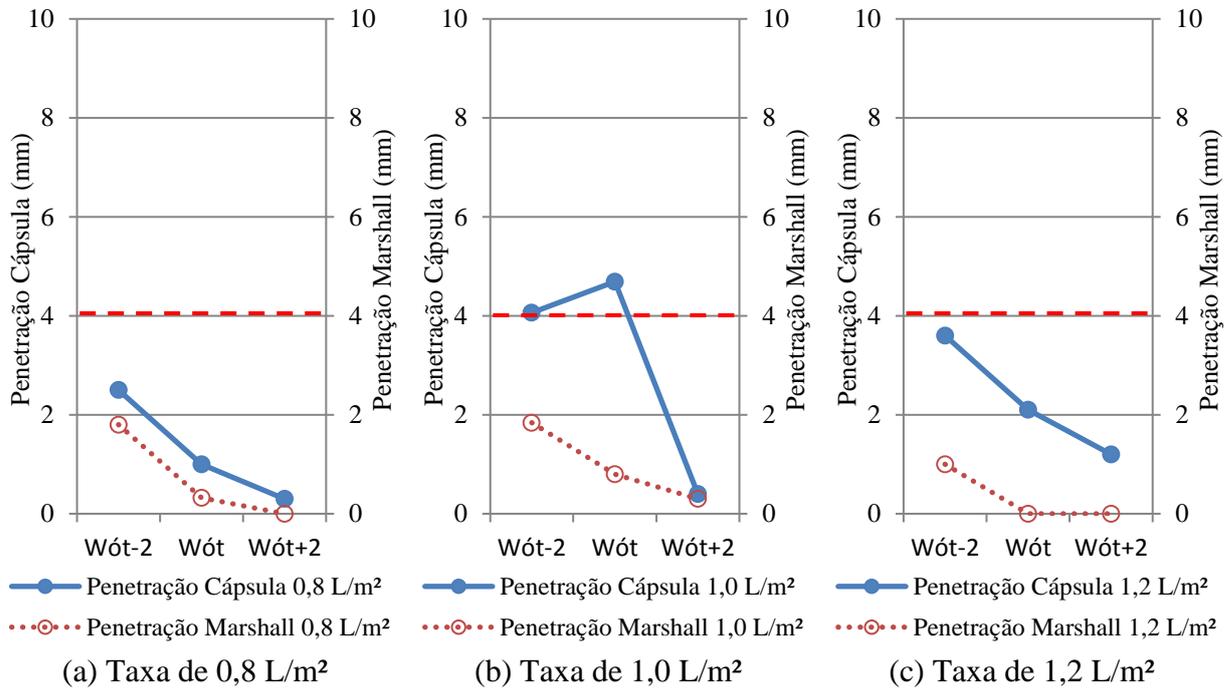


Fonte: Autor (2017)

4.5.2.5 Resultados para o LC 03 (Ligante comercial 03)

Na Figura 27 são apresentados os resultados para o LC 03 nas taxas de aplicação 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót, Wót+2). Por ambos os métodos, verificou-se que para esse ligante os resultados obtidos ficaram muito próximos na umidade Wót-2, mas com valores de penetração mais afastados quando a base estava na umidade Wót e Wót+2. Observou-se que as penetrações foram maiores no método da Cápsula, situação já esperada, mas que quando se leva em conta o desvio padrão os valores medidos tornam-se próximos.

Figura 27 - Penetração do LC 03 - Cápsula × Marshall nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)



Fonte: Autor (2016)

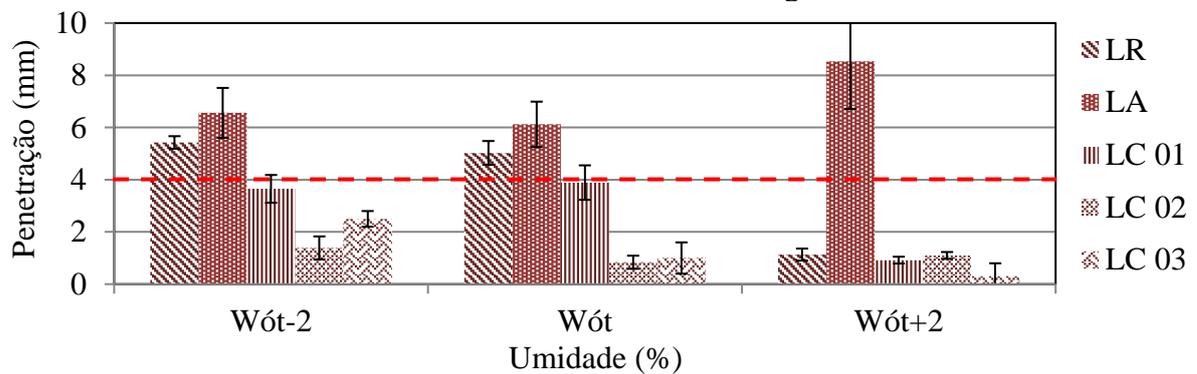
Diante dos dados apresentados verifica-se que a tendência dos resultados com a Cápsula e com o Marshall se mostrou muito próxima em todos os ligantes testados. Entretanto, o método da Cápsula se mostrou um método excelente para diminuir os esforços de laboratório, pois se utiliza de uma quantidade de material muito pequena, 40g em vez de 1000g do Marshall. Apesar da sua compactação não chegar a 100% pode-se afirmar que esse método pode ser empregado como um método expedito para seleção preliminar de ligantes para emprego em serviços de imprimação betuminosa de rodovias.

4.5.3 Avaliação da umidade de compactação e da taxa de ligante

Posteriormente, com as amostras que atenderam aos requisitos definidos pela literatura quanto à penetração, foram realizados ensaios de coesão, aderência e desgaste superficial. Assim, nas Figuras 28, 29 e 30 são apresentados os resultados de penetração da imprimação, pelo método

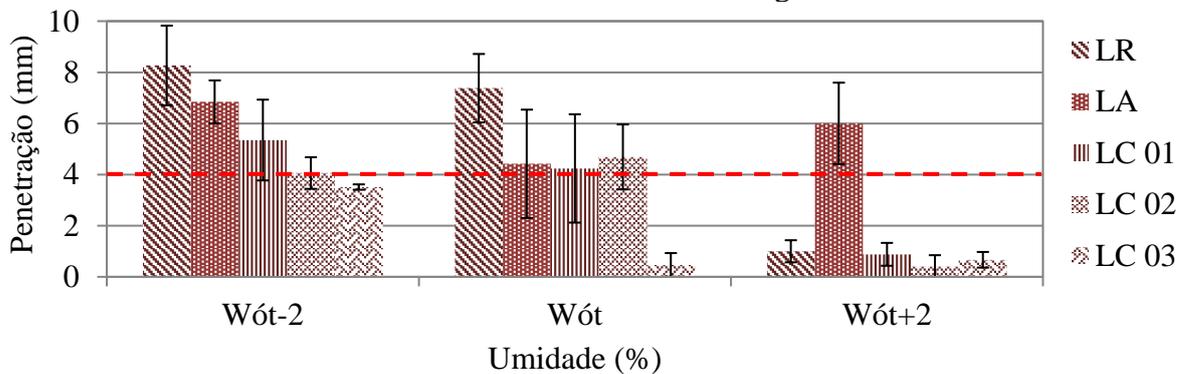
da cápsula, em diferentes umidades de compactação e em diferentes taxas (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²) para todos os ligantes testados. Foi determinado ainda o desvio padrão dos resultados obtidos indicados pela barra de variação exposta no topo dos gráficos apresentados nas Figuras 28, 29 e 30.

Figura 28 - Penetração obtida pelo método da Cápsula de todos os ligantes na taxa de 0,8 L/m² nas três umidades de moldagem



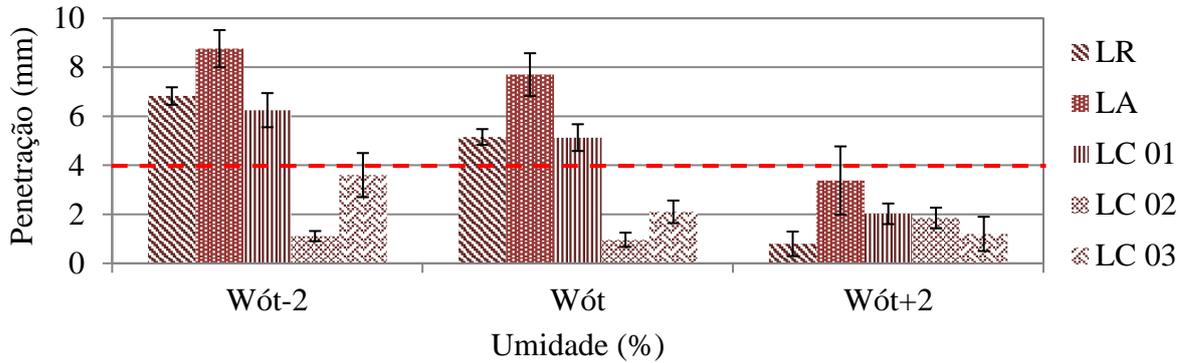
Fonte: Autor (2017)

Figura 29 - Penetração obtida pelo método da Cápsula de todos os ligantes na taxa de 1,0 L/m² nas três umidades de moldagem



Fonte: Autor (2017)

Figura 30 - Penetração obtida pelo método da Cápsula de todos os ligantes na taxa de 1,2 L/m² nas três umidades de moldagem



Fonte: Autor (2017)

Pelas Figuras 28, 29 e 30, percebe-se que, no geral, as medidas das penetrações tenderam à redução com o aumento do teor de umidade de moldagem (exceto para a amostra LA nas taxas 0,8 e 1,0 L/m²), mesmo levando em conta o desvio padrão.

Essa tendência é exemplificada pela Figura 31 que mostra a variação da penetração a partir de cada umidade de moldagem para o LA. Segundo Rabêlo (2006), essa tendência pode ser ainda mais sentida em solos de textura mais fechada e, portanto, mais finos. Os resultados apresentados nas Figuras 28, 29 e 30 mostram ainda que, de forma geral, a penetração do ligante na camada de base é mais influenciada pelo teor de umidade do que pela taxa de aplicação do ligante.

Figura 31 - Representação gráfica da penetração do LA à taxa de 1,2 L/m² e nas três umidades de moldagem



Fonte: Autor (2017)

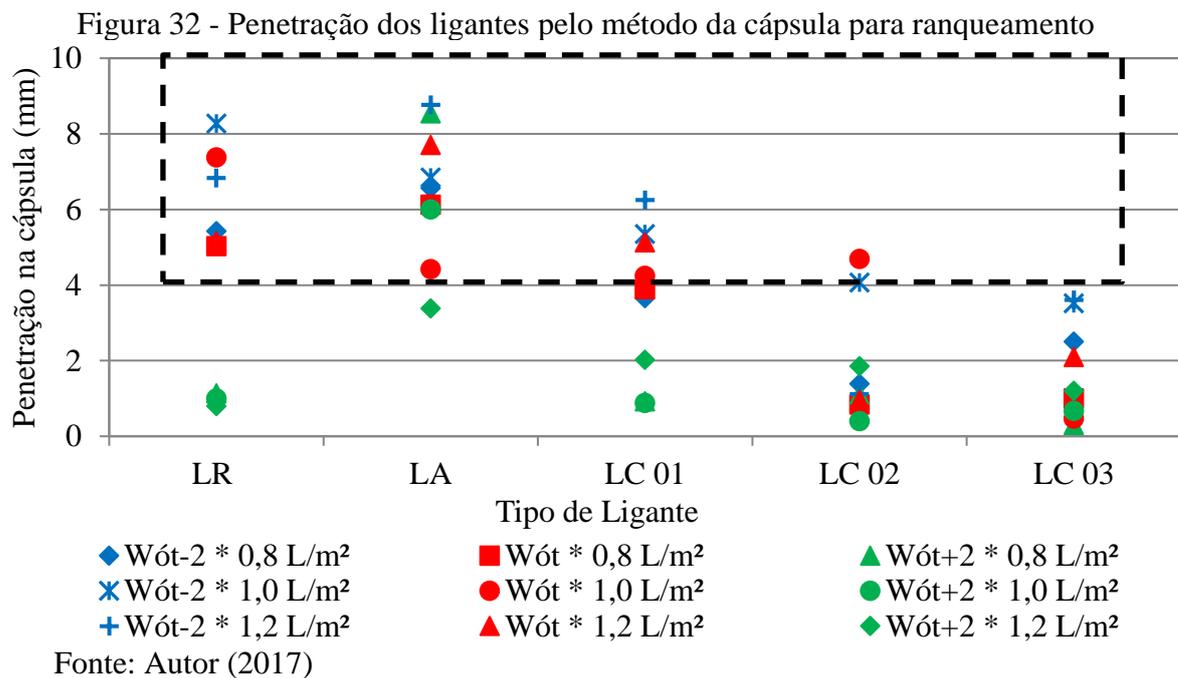
Os resultados encontrados reforçam a afirmação de Villibor *et al.* (1989), de que com o aumento substancial do teor de umidade da base, antes da imprimação, poderá ocorrer uma penetração mínima ou não ocorrer penetração. Pode-se então dizer que dos ligantes testados apenas o ligante LC 03, independente da umidade de moldagem, mostrou resultados de penetração abaixo de 4,0 mm de espessura, limite mínimo indicado como satisfatório pela literatura (VILLIBOR, 1981; VILLIBOR *et al.*, 1989; CASTRO, 2003; DUQUE NETO, 2004; RABÊLO, 2006).

Verificou-se que o ligante LC 03 apresentou valores baixos de penetração em todas as umidades e taxas, e que o resultado de penetração nessa amostra foi mais susceptível à variação de umidade do que com a variação da taxa (Figura 32).

Em face dos resultados apresentados neste item, pode-se afirmar que no estado do Ceará há tendência das bases serem compactadas com umidades abaixo da ótima, tendo em vista as altas taxas de evaporação oriundas de um clima mais quente. Sendo assim, observa-se, de uma forma geral, que os ligantes LR, LA e LC 01 obtiveram resultados de penetração adequados, de no mínimo 4,0 mm, para os teores de umidade ótima e abaixo da ótima em quase todas as taxas de ligantes testadas.

4.5.4 Ranqueamento dos ligantes testados

A Figura 32 apresenta o ranqueamento de todos os ligantes (LR, LA, LC 01, LC 02 e LC 03) submetidos às umidades ($W_{ót-2}$, $W_{ót}$ e $W_{ót+2}$) sob as diferentes taxas (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²) pelo método da cápsula.



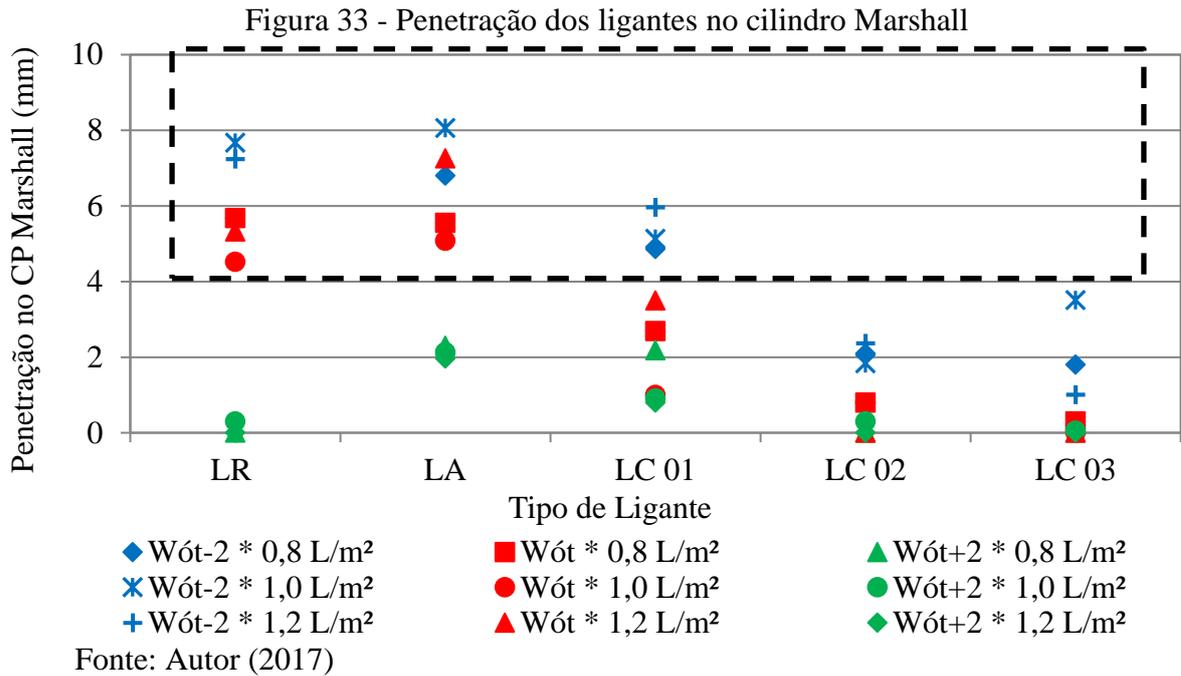
Verifica-se que, nas amostras moldadas na $W_{ót+2}$, quase todos os ligantes testados, inclusive o ligante de referência (CM-30), apresentaram penetrações menores que o limite mínimo de 4,0 mm, descrito na literatura como satisfatório. Excetuando-se o LA que mostrou um comportamento adequado mesmo quando a base esteve mais úmida para as taxas de 0,8 e 1,0 L/m².

De acordo com o ranqueamento da Figura 32 é possível perceber que o LR não apresenta penetração mínima (4,0 mm) na umidade 2% acima da ótima em nenhuma das taxas

investigadas. Entretanto, nas outras umidades (Wót-2 e Wót) pode-se indicar como adequada a taxa de 0,8 L/m² para que a penetração mínima seja atingida. Já o LA ficou abaixo de 4,0 mm apenas na taxa de 1,2 L/m² na umidade Wót+2. Esse resultado mostra que o LA é o material mais versátil, dentre as amostras investigadas, sendo o que apresenta o melhor comportamento quanto à penetração sob as diversas condições de umidades e de taxas. Pode-se indicar ainda a taxa de 0,8 L/m² como adequada para que o ligante LA apresente uma penetração satisfatória

Nesse ranque é possível perceber também que o LC 01 só apresentou um comportamento adequado nas umidades Wót e Wót-2 e a partir da taxa de 1,0 L/m² com penetração maior que 4,0 mm. Já o LC 02 só apresentou um comportamento adequado nas umidades Wót e Wót-2 e em uma única taxa (1,0 L/m²), mostrando-se extremamente suscetível à variação da taxa de ligante na imprimação. Por fim, neste teste, o LC 03 apresentou o pior comportamento, não penetrando 4,0 mm em nenhuma condição.

Foi realizado ainda o ensaio de imprimação no cilindro Marshall modificado. Assim foi possível confirmar a tendência dos ligantes testados no método da cápsula. Nesse experimento verificou-se que as penetrações ficaram abaixo do limite de 4,0 mm para todas as amostras imprimadas na condição mais úmida (Wót+2). As amostras LA e o LR tiveram os melhores resultados de penetração (> 4,0 mm), seguidos pelo LC 01 que apresentou menores penetrações, mas atingindo o limite mínimo de 4,0 mm na umidade 2% abaixo da ótima; e os ligantes LC 02 e LC 03 apresentaram-se inadequados em todas as umidades e taxas de aplicação, mostrando resultados de penetração abaixo de 4,0 mm (Figura 33).

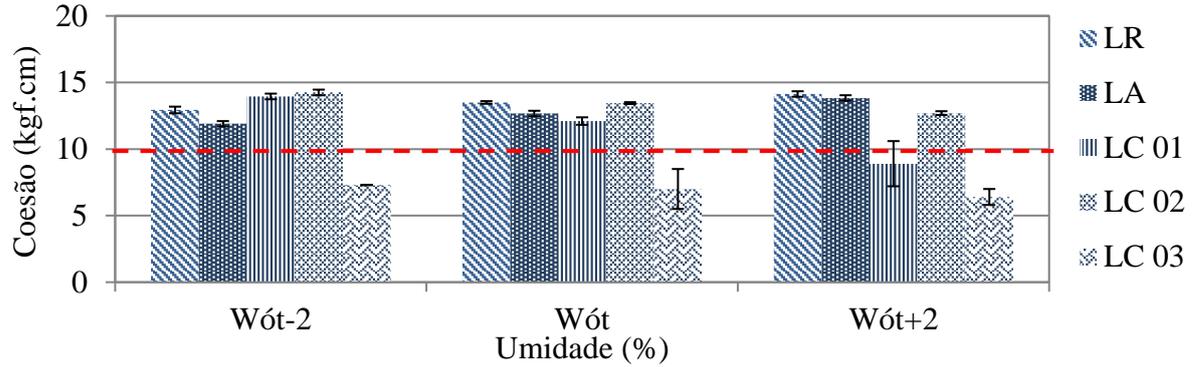


4.6 Coesão da base imprimada

4.6.1 Resultados dos ensaios de coesão

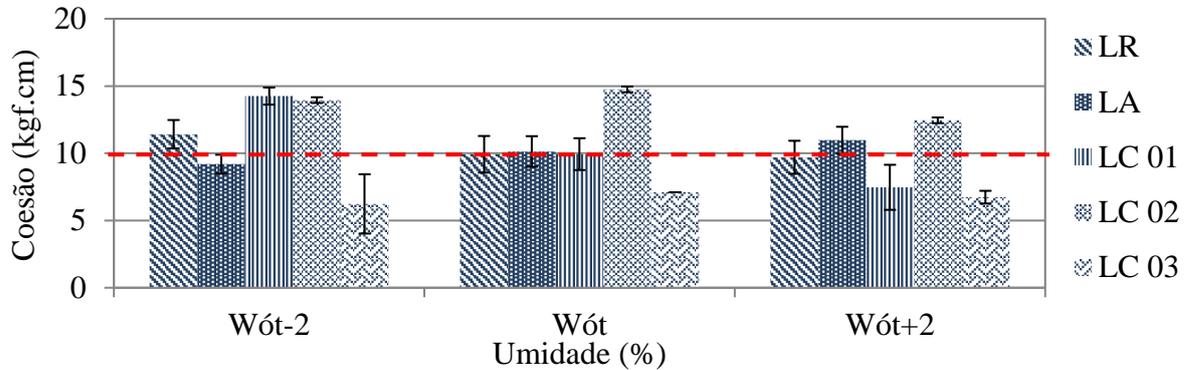
Nas Figuras 34 a 36 são apresentados os resultados dos ensaios de coesão realizados com todos os ligantes deste trabalho nas taxas de 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² a uma temperatura ambiente de 25°C em média. Para cada taxa variou-se a umidade de moldagem do solo em $\pm 2\%$ da umidade ótima. A partir dos dados apresentados, verifica-se pouca variação dos valores de coesão entre as amostras, exceto para a amostra LC 03 que apresentou uma redução da coesão em função da taxa de ligante. Além disso, observou-se a presença de exsudação na superfície dos CPs imprimados com esse ligante.

Figura 34 - Coesão das amostras na taxa de 0,8 L/m² nas três umidades de moldagem



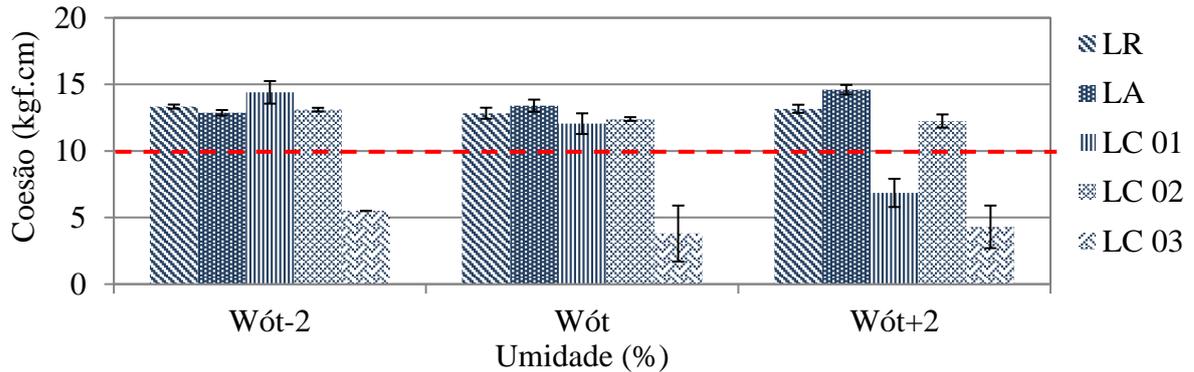
Fonte: Autor (2017)

Figura 35 - Coesão das amostras na taxa de 1,0 L/m² nas três umidades de moldagem



Fonte: Autor (2017)

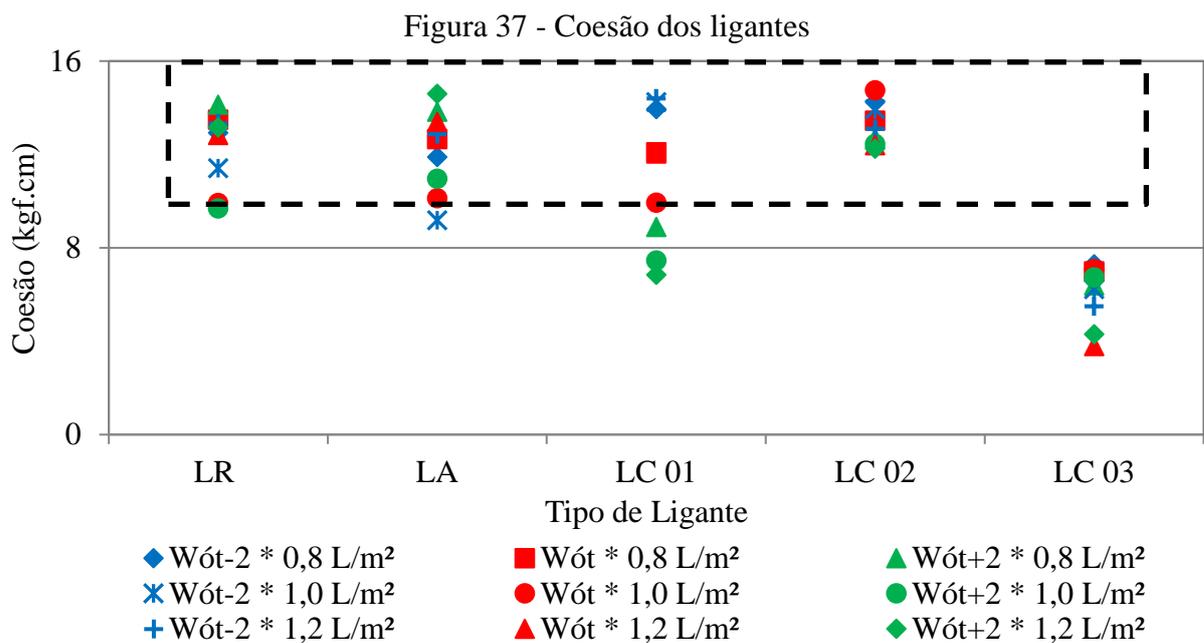
Figura 36 - Coesão das amostras na taxa de 1,2 L/m² nas três umidades de moldagem



Fonte: Autor (2017)

Nos ligantes CM-30, LA, LC 01 e LC 02, na Wót, os resultados foram próximos (Figuras 34 a 36), variando de 10 a 15 kgf.cm. Entretanto, esses valores estão abaixo do valor preconizado pela norma ISSA (*International Slurry Surfacing Association*) TB-139 para avaliação da coesão de microrrevestimento asfáltico que é de no mínimo 20,0 kgf.cm para liberação do tráfego, indicando que a base imprimada pode não suportar um tráfego muito pesado, o que já era esperado.

A partir dos resultados de imprimação e coesão e da experiência laboratorial desta pesquisa sugere-se adotar o valor 10,0 kgf.cm para aceitação quanto à coesão da imprimação, pois esse valor é a metade do mínimo preconizado pela norma ISSA 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. Dessa forma, nas unidades Wót-2 e Wót, os ligantes LR, LA, LC 01 e LC 02 mostraram-se adequados (Figura 37). Destaca-se também que mais pesquisas são incentivadas para validar o valor sugerido nesta dissertação.



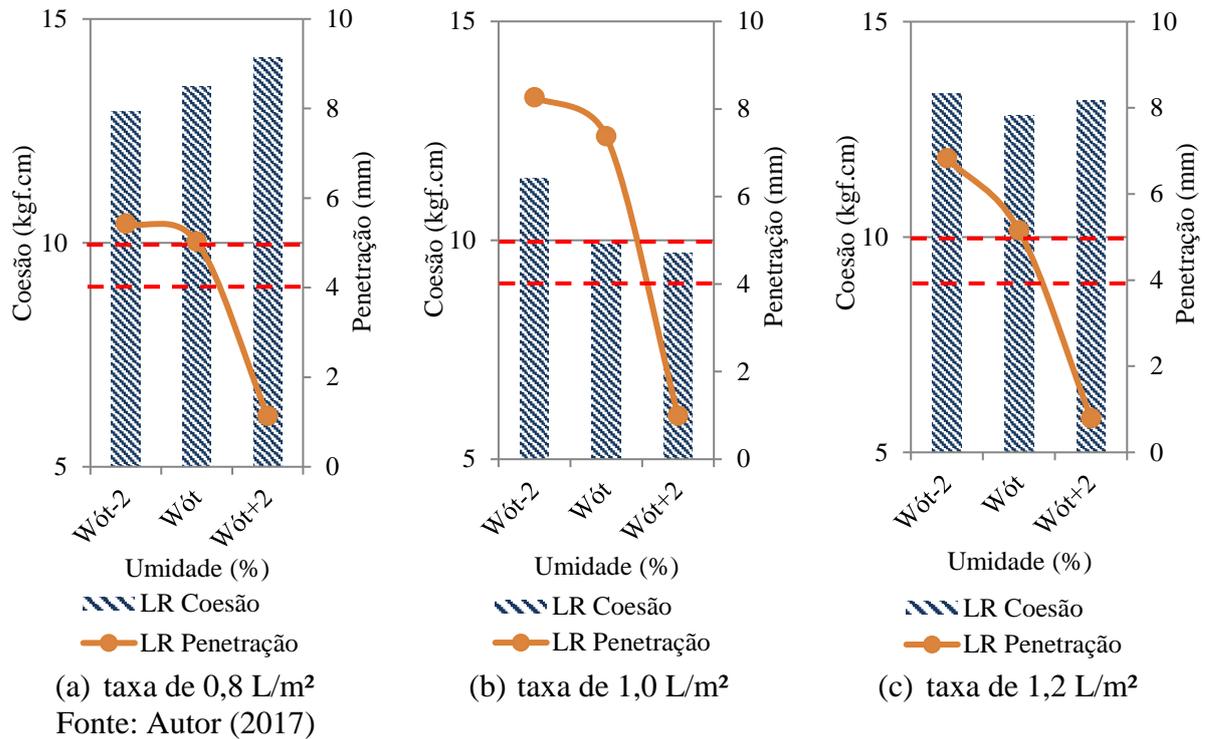
4.6.2 *Influência da penetração na coesão*

Partindo-se da hipótese de que somente o parâmetro da penetração não é o suficiente para selecionar materiais para analisar a qualidade da imprimação, avaliou-se a relação da penetração *versus* coesão de todos os ligantes (LR, LA, LC 01, LC 02 e LC 03) testados para as umidades $W_{ót-2}$, $W_{ót}$ e $W_{ót+2}$, e para as taxas de 0,8, 1,0 e 1,2 L/m². Destaque-se que todos os resultados de penetração deste subitem são relativos aqueles obtidos pelo método da Cápsula, pois esse, além de ser o que mais se assemelha ao método de medição da coesão de lamas asfálticas, proporcionou um número maior de amostras, que atestaram a repetibilidade do ensaio.

4.6.2.1 *Resultados para o LR (Ligante de referência)*

A Figura 38 apresenta os resultados do LR à luz da análise proposta de verificação do comportamento penetração *versus* coesão.

Figura 38 - Coesão × Penetração para o LR sob diferentes taxas de aplicação e umidades



Verificou-se que o LR apresentou uma tendência de redução da penetração à medida que o solo esteve mais úmido, ficando abaixo de 4,0 mm na umidade Wót+2. Já os resultados de coesão não apresentaram uma tendência, não sendo influenciada diretamente pela penetração. Ao combinar-se uma mesma taxa para cada umidade de moldagem, verificaram-se os seguintes resultados:

- para a taxa de 0,8 L/m² (Figura 38a), a coesão tendeu a crescer no mesmo sentido de crescimento da umidade de moldagem. Acredita-se que para essa taxa a formação do filme betuminoso residual contido na superfície do CP foi cada vez maior à medida que o solo encontrava-se mais úmido, mas sem excesso, favorecendo assim maiores valores de coesão;
- para a taxa de 1,0 L/m² (Figura 38b), a coesão cresceu à medida que o solo esteve mais seco. Acredita-se que com a taxa maior o limite do filme betuminoso residual foi ultrapassado a

partir da condição de moldagem Wót ocasionando o aparecimento de exsudação na superfície dos CPs elevando a redução da coesão superficial em algumas amostras;

- para a taxa de 1,2 L/m² (Figura 38c), a coesão apresentou resultados peculiares para cada unidade de moldagem. Na condição Wót-2, verificou-se uma coesão maior (13,3 kgf.cm) do que 10,0 kgf.cm, acredita-se que, para essa taxa, a base mais aberta (não preenchida com partículas de água) permitiu uma maior penetração do ligante, favorecendo uma coesão maior. Na condição Wót, com uma base mais fechada houve pontos de exsudação e com isso houve uma leve redução na coesão (12,8 kgf.cm), acredita-se que o excesso de ligante que se depositou na superfície do CP tenha contribuído para essa redução. Já na condição Wót+2, verificou-se novamente um aumento da coesão (13,2 kgf.cm), mas nada significativo, pois todos os valores ficaram acima do mínimo considerado como satisfatório (10,0 kgf.cm).

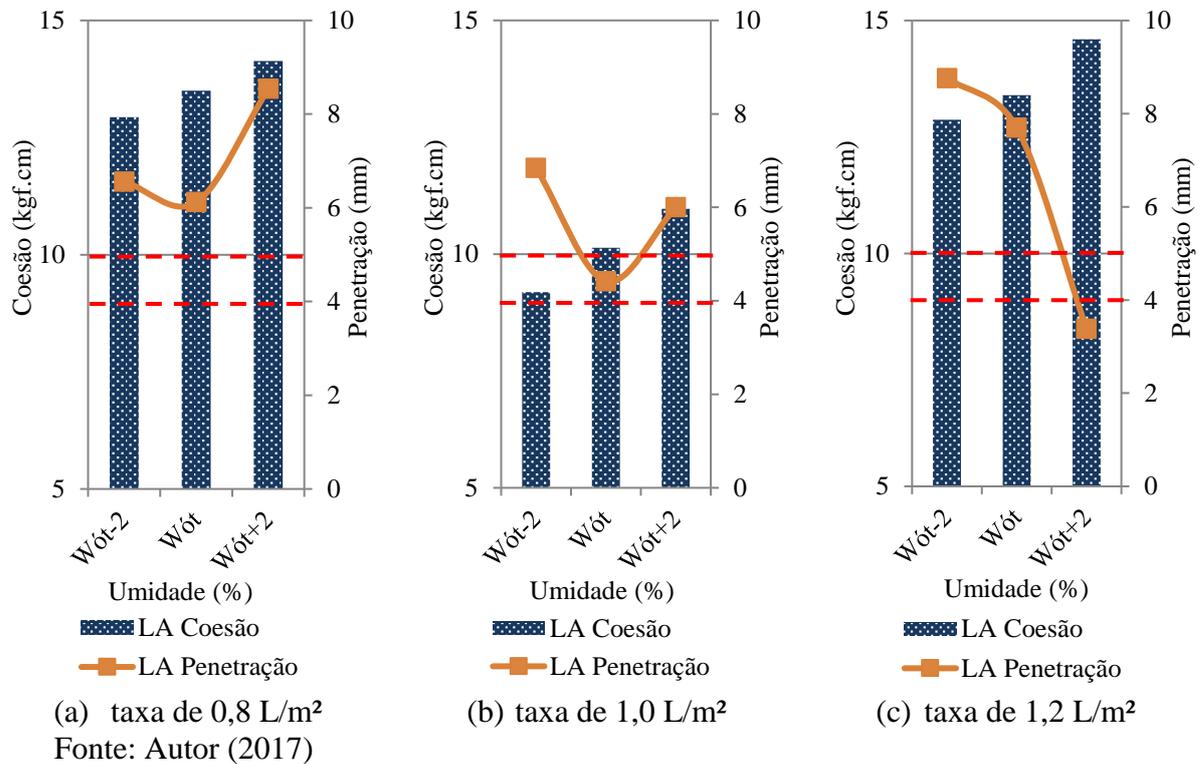
Verificou-se que para o LR as taxas de 0,8 e 1,2 L/m² apresentaram os melhores resultados relativos a coesão e a penetração quando essas encontravam-se nas umidades Wót-2 e Wót, no caso da penetração, com valores acima de 4 mm e quanto à coesão com valores maiores que 10,0 kgf.cm. Atestando que para esse ligante nas condições apresentadas a taxa de 0,8 e 1,2 L/m² seriam mais recomendadas.

Ao final das análises verificou-se a existência de um limite sensível que depende de um conjunto de fatores combinados que favorecem uma coesão aceitável. Para o LR destacam-se: a unidade de moldagem, a taxa e o tipo do ligante utilizado. Contudo esse ligante apresentou coesões consideradas aceitáveis com valores próximos ou acima de 10,0 kgf.cm.

4.6.2.2 Resultados para o LA (Ligante alternativo)

Para a amostra LA, os resultados da coesão apresentaram uma relação direta de dependência com a umidade de moldagem (Figura 39). Para estabelecer relações entre a penetração e a coesão foram feitas algumas combinações buscando um melhor entendimento do comportamento do ligante. Avaliou-se o efeito da variação da umidade de moldagem para cada taxa aplicada relacionando-a com os valores da coesão.

Figura 39 - Coesão × Penetração para o LA sob diferentes taxas de aplicação e umidades



Para a amostra LA, notou-se uma maior facilidade de penetração em condições de base mais secas e mais úmidas, porém na umidade ótima a penetração diminuiu, muito embora a tendência verificada na literatura seja de redução da penetração à medida que cresce a umidade de moldagem. Assim, observou-se:

- para a taxa de 0,8 L/m² (Figura 39a), verificou-se que o valor médio de coesão para as amostras na Wót-2 foi o menor de todos os valores medidos, e que essa coesão foi crescendo à medida que a umidade aumentou. Percebeu-se que a penetração não influenciou diretamente os resultados da coesão. Entretanto, o ligante residual na superfície do CP parece ter uma ligação direta com esse comportamento. Tal fato confirmou-se ao se comparar os valores de penetração (6,5 e 6,0 mm) e coesão (12,9 e 13,5 kgf.cm) obtidos, respectivamente, para as umidades de moldagem Wót-2 e Wót. Isso demonstra que não há necessidade de uma penetração muito grande para que se tenha uma coesão maior.

- para a taxa de 1,0 L/m² (Figura 39b), verificou-se que a coesão manteve a tendência de crescimento à medida que a umidade de moldagem aumentou. Quando se compara a coesão obtida para a taxa de 1,0 L/m² com a coesão para taxa de 0,8 L/m², verifica-se uma redução linear em todas as umidades. Acredita-se que essa redução se deu em função da diminuição da penetração do ligante com o aumento da taxa de aplicação, fazendo com que se formasse um filme betuminoso mais espesso na superfície do CP, diminuindo assim a coesão.

- para a taxa de 1,2 L/m² (Figura 39c), a coesão voltou a subir em relação à umidade de moldagem, e a penetração chegou a atingir valores maiores do que os encontrados com as outras taxas de aplicação nas condições Wót-2 e Wót, levando aos valores de coesão maiores do que os medidos em outras taxas.

Por fim, notou-se que o ligante LA mostrou um bom comportamento quanto à coesão (apenas com um dos valores de coesão ficando abaixo de 10,0 kgf.cm) independentemente da umidade de moldagem e da variação da taxa de aplicação para o solo utilizado. Para tanto, de

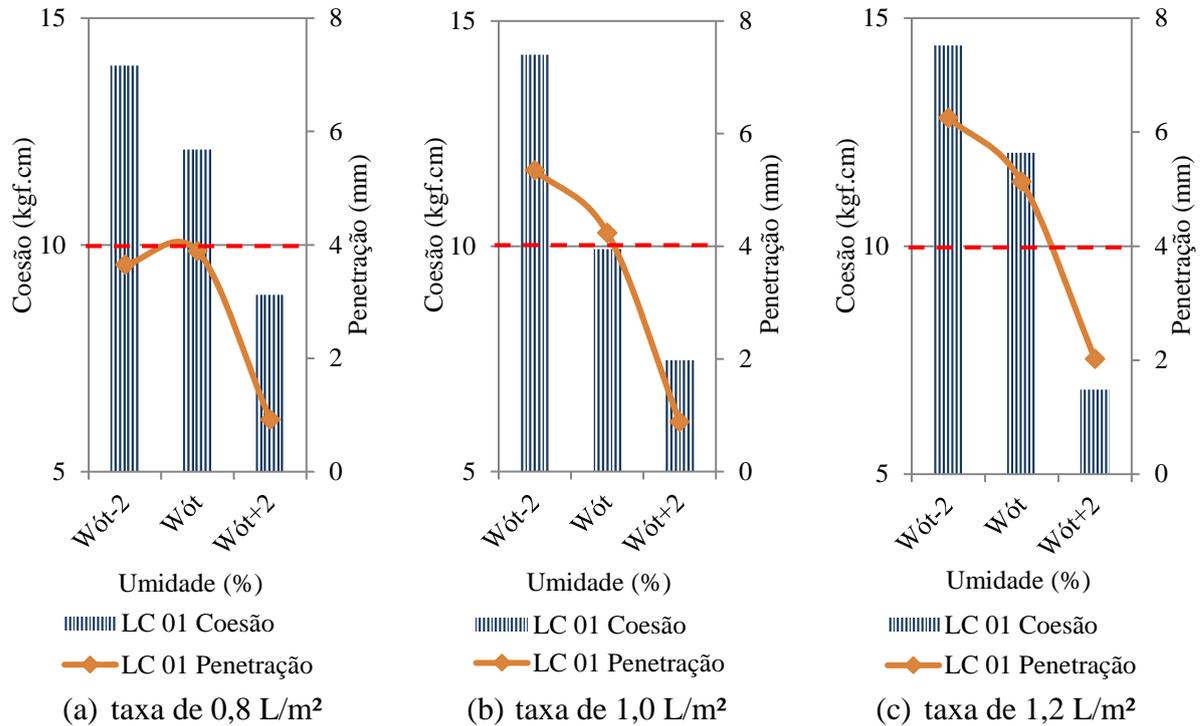
acordo com os resultados de penetração e coesão obtidos pode-se indicar a taxa de 0,8 L/m² como satisfatória para esse ligante.

4.6.2.3 *Resultados para o LC 01 (Ligante comercial 01)*

Os valores de coesão do LC 01 tenderam a cair com o aumento da umidade de moldagem, não apresentando influência com a variação da taxa de aplicação do ligante. O mesmo ocorreu para a penetração, mostrando que o ligante não é muito suscetível às variações de umidade de moldagem ou taxa de aplicação (Figura 40). Os valores de coesão na Wót+2 ficaram abaixo de 10,0 kgf.cm adotado como valor mínimo aceitável para um bom comportamento da base imprimada, independente da variação da taxa de aplicação.

Quanto aos valores de penetração, esses foram baixos, máximo de 6,0 mm, sendo abaixo das penetrações obtidas com o LR, e que esses resultados foram obtidos quando da aplicação de taxas mais altas (1,0 e 1,2 L/m²). Apesar disso, esses resultados seguiram um comportamento já verificado para bases mais secas que é de apresentar valores de penetração maiores do que os encontrados em bases mais úmidas. Verificou-se ainda que para a aplicação do LC 01 é necessário um maior controle da umidade da base, pois mesmo com a umidade variando dentro do limite estabelecido por norma ($\pm 2\%$) esse ligante apresentou resultados distintos.

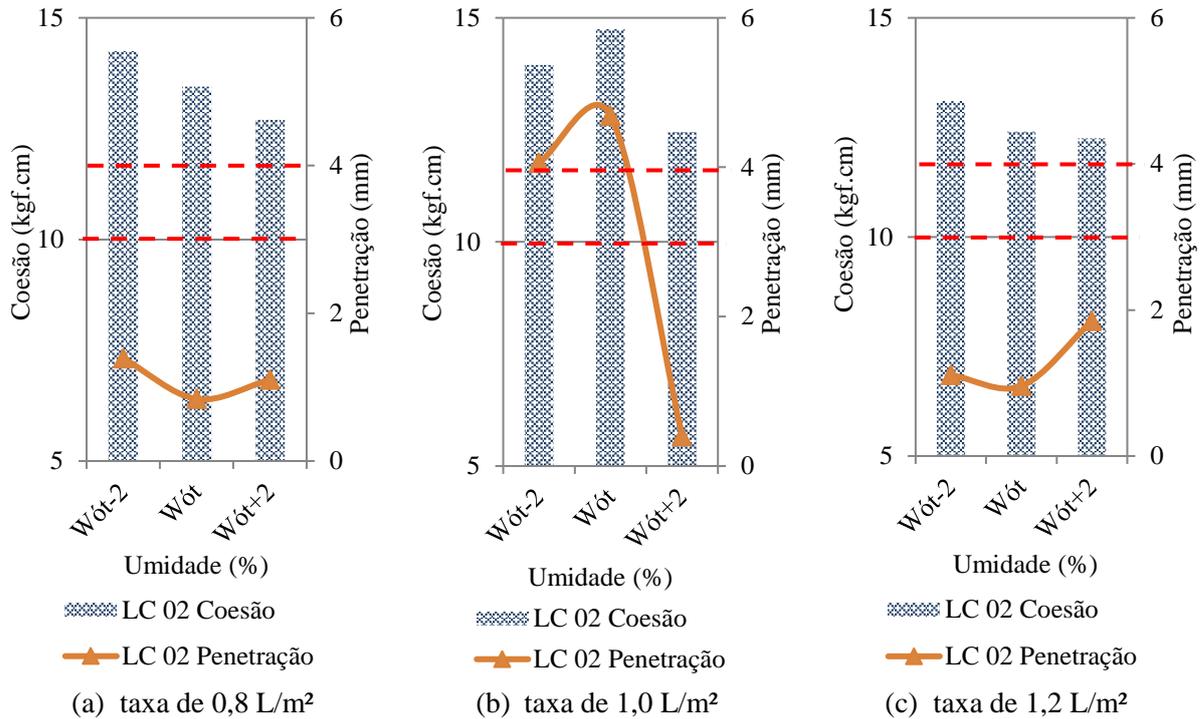
Figura 40 - Coesão × Penetração para o LC 01 sob diferentes taxas de aplicação e umidades



4.6.2.4 Resultados para o LC 02 (Ligante comercial 02)

O LC 02 apresentou baixos valores de penetração quando comparados com o limite mínimo de 4,0 mm citado na literatura como satisfatório. No entanto seus valores de coesão foram bem próximos dos encontrados com o LR (Figura 41) e todos acima do valor sugerido nessa pesquisa como aceitável para a coesão, de 10,0 kgf.cm. Acredita-se que o filme betuminoso que se depositou na superfície tenha contribuído positivamente para o aumento da coesão mesmo com baixas penetrações, chegando a valores acima de 12,0 kgf.cm com valores de penetração próximos de 1,0 mm. Vale salientar que mesmo com a baixa penetração do ligante a superfície não apresentou exsudação excessiva. Pode-se indicar que para esse ligante a taxa de 1,0 L/m² se mostrou mais apropriada para atender aos valores mínimos de penetração e coesão, 4,0 mm e 10,0 kgf.cm, respectivamente.

Figura 41 - Coesão × Penetração para o LC 02 sob diferentes taxas de aplicação e umidades



Fonte: Autor (2017)

4.6.2.5 Resultados para o LC 03 (Ligante comercial 03)

Foram ainda realizados os testes de coesão com a amostra de ligante LC 03 (Figura 42), porém esse ligante apresentou baixas penetrações (< 4,0 mm), com exsudação acentuada na superfície dos CPs, resultando também em baixos valores de coesão, entre 3,8 e 7,3 kgf.cm, ficando abaixo de 10,0 kgf.cm, sugerido como aceitável. Nesse caso a superfície apresentava uma película mais espessa de ligante, onde o êmbolo do coesímetro não encontrou resistência na camada imprimada (Figura 43).

Figura 42 - Coesão × Penetração para o LC 03 sob diferentes taxas de aplicação e umidades

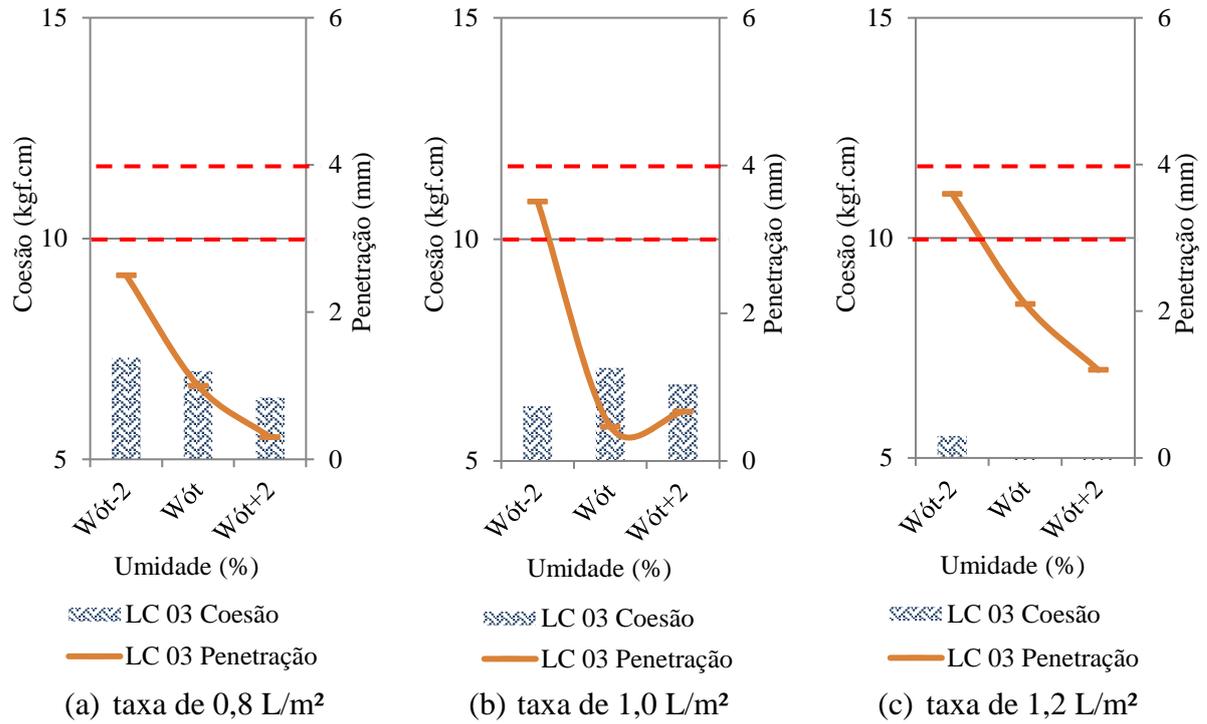


Figura 43 - Superfície do CP com exsudação para o ensaio de coesão com o ligante LC 03



Fonte: Autor (2017)

4.6.2.6 Análise geral da relação penetração × coesão para os ligantes testados

De forma geral, nota-se que a penetração não influenciou diretamente nos resultados da coesão. Por exemplo, ao se comparar os resultados do LR com o LC 01, aplicados na taxa de 1,0 L/m² e na W_{ót}, têm-se o mesmo resultado de coesão (aproximadamente 10,0 kgf.cm) para uma variação de penetração de 3,5 mm, dando indícios da não dependência do resultado da coesão com o da penetração. Essa tendência se repetiu para todos os ligantes testados.

No entanto, apesar da independência entre esses resultados, é possível perceber que o LC 03 também se mostrou inadequado quanto à coesão. Resultado também verificado no LC 01 na umidade 2% acima da ótima para diferentes taxas. Destaca-se também o bom desempenho do LC 02 quanto à coesão, o que não era esperado, tendo em vista os valores baixos de penetração. Esse resultado mostra mais uma vez que nem sempre uma maior penetração vai favorecer uma maior coesão.

Tendo em vista que a coesão fornece um parâmetro mais consistente sobre o comportamento mecânico da base imprimada, entende-se como sendo o mais representativo para avaliar a imprimação.

4.6.3 Ângulo de ruptura no ensaio de coesão

Apresentam-se a seguir os históricos de torque de ruptura pela deformação angular, objetivando indicar o momento de ruptura por cisalhamento da camada imprimada durante o

ensaio de coesão. A verificação foi realizada para as amostras LR, LA, LC 01 e LC 02 nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2.

O ligante LC 03 não foi testado, pois apresentou baixa coesão devido à presença acentuada de exsudação, impossibilitando a realização do ensaio. Para a melhor verificação do comportamento das amostras estudadas comparou-se uma mesma taxa de aplicação para cada unidade de moldagem.

Atribuiu-se como valor mínimo satisfatório de torque 1,0 N.m (a unidade N.m foi utilizada por ser a unidade de torque no Sistema Internacional) que é o mesmo valor adotado como aceitável para a coesão (10,0 kgf.cm) com a alteração do valor para a unidade N.m, pois agora o parâmetro avaliado foi apenas o torque, atestando assim que a coesão da base foi alcançada.

Para a melhor visualização dos resultados de coesão e as respectivas deformações é apresentado na Figura 44 o resumo dos resultados obtidos, com valores de coesão que variaram de 0,67 a 1,46 N.m. Já os valores de deformação variaram de $8,61 \times 10^{-2}$ rad (menor valor de deformação) até $3,49 \times 10^{-1}$ rad (maior valor de deformação), a seguir são avaliados esses dois parâmetros combinados para cada ligante testado.

Figura 44 - Resumo dos Resultados de Deformação e Torque de Ruptura

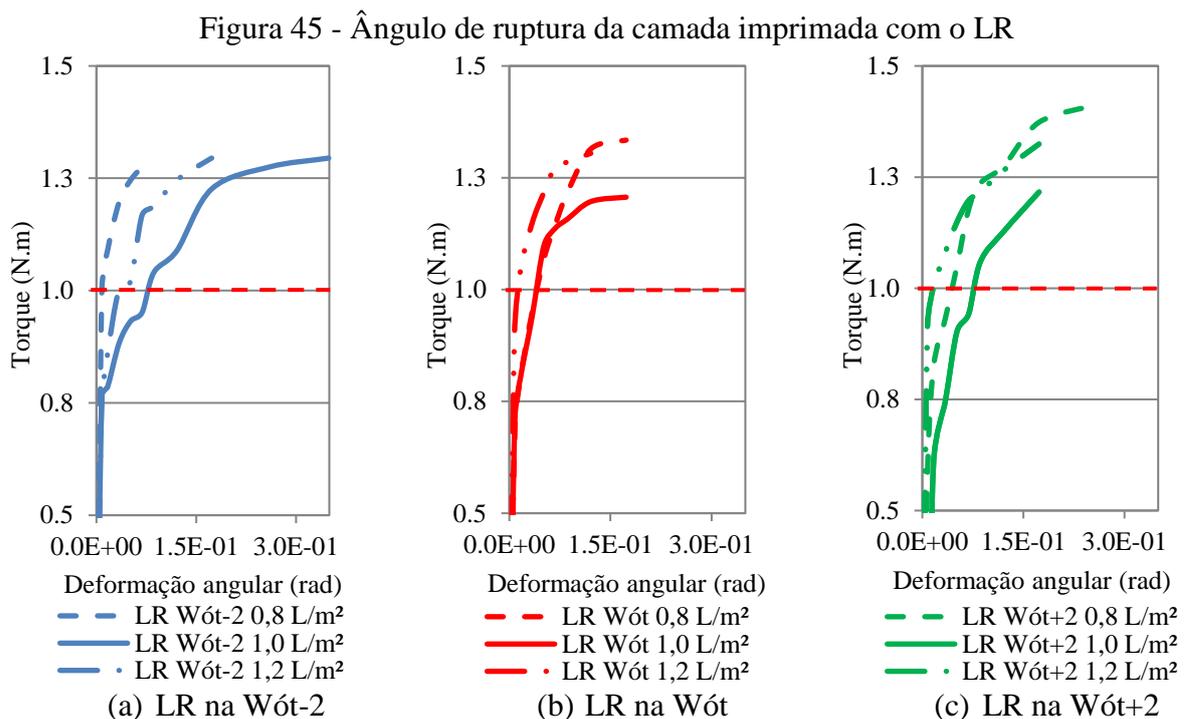
Ligantes	Taxas (L/m ²)	Deformação (rad)			Torque (N.m)		
		Wót-2	Wót	Wót+2	Wót-2	Wót	Wót+2
LR	0,8	$6,87 \times 10^{-2}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$2,61 \times 10^{-1}$	1,28	1,33	1,41
	1,0	$3,49 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$1,21 \times 10^{-1}$	1,29	1,21	1,22
	1,2	$1,73 \times 10^{-1}$	$1,21 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	1,29	1,30	1,32
LA	0,8	$3,49 \times 10^{-1}$	$2,61 \times 10^{-1}$	$2,61 \times 10^{-1}$	1,15	1,27	1,37
	1,0	$1,73 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	1,26	1,30	1,35
	1,2	$3,49 \times 10^{-1}$	$5,14 \times 10^{-2}$	$2,61 \times 10^{-1}$	1,25	1,32	1,44
LC01	0,8	$2,61 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$8,61 \times 10^{-2}$	1,37	1,19	0,87

	1,0	$2,61 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$6,87 \times 10^{-2}$	1,40	1,14	0,78
	1,2	$3,49 \times 10^{-1}$	$6,87 \times 10^{-2}$	$5,14 \times 10^{-2}$	1,41	1,08	0,67
LC02	0,8	$2,61 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$2,61 \times 10^{-1}$	1,41	1,31	1,26
	1,0	$8,61 \times 10^{-2}$	$3,49 \times 10^{-1}$	$2,61 \times 10^{-1}$	1,38	1,46	1,24
	1,2	$2,61 \times 10^{-1}$	$1,21 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	1,28	1,21	1,24

Fonte: Autor (2017)

4.6.3.1 Resultados para o LR (Ligante de referência)

A Figura 45 apresenta os resultados do LR nas taxas de 0,8, 1,0 e 1,2L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2).



Fonte: Autor (2017)

a) Análise de LR para a taxa de 0,8 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

A ruptura de cisalhamento do LR, para a taxa de 0,8 L/m² nas três umidades investigadas (Wót-2, Wót e Wót+2) se deu quando as deformações angulares chegaram em $6,87 \times 10^{-2}$, $1,73 \times 10^{-1}$ e $2,61 \times 10^{-1}$ rad, respectivamente, apresentando torques de, 1,28, 1,33 e 1,41 N.m, respectivamente. Esses resultados indicam que a resistência à ruptura aumentou conforme a umidade de moldagem aumentou.

O LR à taxa de 0,8 L/m² na Wót-2 proporcionou uma rigidez mais elevada à camada, pois apesar da baixa deformação ($6,87 \times 10^{-2}$ rad) o valor de ruptura ficou muito próximo dos valores encontrados para esse ligante (1,28 N.m) na mesma umidade e em outras taxas (1,0 e 1,2 L/m²) (Figura 45).

Para o LR à taxa de 0,8 L/m² na Wót observou-se que a cura desse ligante foi mais rápida do que a dos demais ligantes, sugerindo que na condição mais úmida da base os ligantes do tipo ADP são menos sensíveis à umidade do que as emulsões.

Já na taxa de 0,8 L/m² e Wót+2 houve um aumento do torque de ruptura seguida pelo aumento da resistência da base imprimada nessa condição umidade/taxa. Observou-se a formação de um filme betuminoso na superfície da base, mas sem excesso, o que pode ter favorecido para o aumento da coesão.

b) Análise de LR para a taxa de 1,0 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Nessa taxa o LR apresentou uma ruptura por cisalhamento, nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2, para as deformações de $3,49 \times 10^{-1}$, $1,73 \times 10^{-1}$ e $1,21 \times 10^{-1}$ rad, respectivamente,

apresentando torques respectivos de 1,29, 1,21 e 1,22 N.m. Esses resultados mostram que a resistência à ruptura diminuiu conforme a umidade de moldagem aumentou.

Quanto ao comportamento do LR à taxa de 1,0 L/m² na Wót-2 (Figura 45a), observou-se que a penetração aumentou (12,0 mm) e acredita-se que o acréscimo da deformação tenha sido influenciado pelo aumento da penetração do ligante na base e com isso a coesão também tenha aumentado.

Na taxa de 1,0 L/m² na Wót (Figura 45b) verificou-se que as amostras com o LR apresentaram em média um bom comportamento, quanto ao torque de ruptura e a deformação de 1,21 N.m e $1,73 \times 10^{-1}$ rad, respectivamente. Esse resultado foi inesperado, pois foi o menor torque medido dentre os resultados obtidos a partir das variações de taxas e umidades de moldagem utilizadas para esse ligante. Observou-se ainda que nessa condição de umidade foi obtido o maior valor de penetração medido (8,3 mm) para a taxa de 1,0 L/m², sugerindo que uma maior penetração não garante uma coesão satisfatória, mesmo estando dentro da faixa considerada satisfatória (entre 4,0 e 13,0 mm).

Para o LR à taxa de 1,0 L/m² na Wót+2 (Figura 45c), verificou-se uma ruptura de 1,22 N.m com uma redução da resistência à ruptura ($1,21 \times 10^{-1}$ rad). Atribui-se esse resultado à baixa penetração (< 4,0 mm), o que era esperado, pois se observou uma tendência de redução de penetração à medida que a umidade de moldagem aumentou, resultando na redução da coesão da base.

c) Análise de LR para a taxa de 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

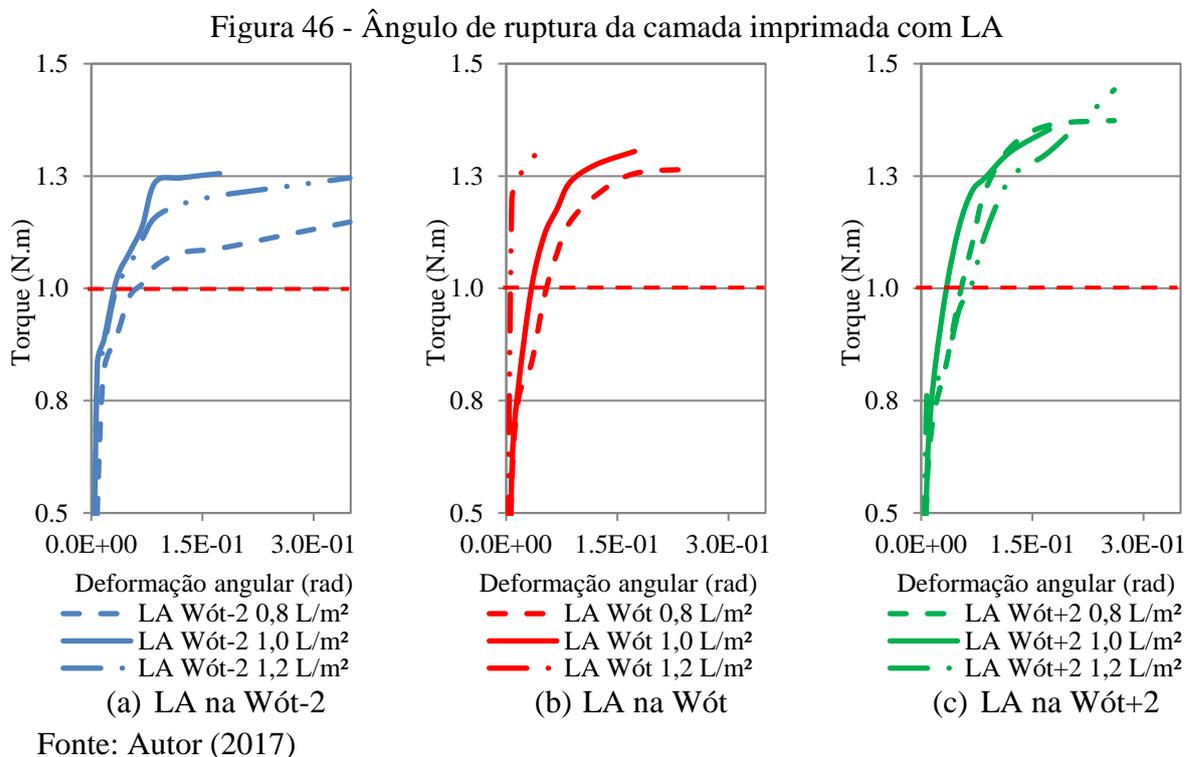
Para o LR à taxa 1,2 L/m² e na umidade Wót-2 obteve-se uma boa penetração (6,8 mm). Mesmo com essa taxa, o toque de ruptura da camada foi de 1,29 N.m, mas sua resistência à ruptura diminuiu ($1,73 \times 10^{-1}$ rad) em relação ao resultado obtido quando aplicada a taxa de 1,0 L/m² que foi de $3,49 \times 10^{-1}$ rad. Acredita-se que o aumento da taxa tenha contribuído para a redução da deformação angular de ruptura, pois à medida que se tem mais ligante na base sem diferença significativa de penetração, a tendência é de que haja redução da coesão, mostrando que o excesso de ligante apresenta uma redução do atrito entre os grãos.

Para a taxa de 1,2 L/m² na Wót, as amostras imprimadas com o LR apresentaram um valor médio de ruptura de 1,30 N.m, sendo esse um dos maiores valores medidos, e uma deformação angular de ruptura de $1,21 \times 10^{-1}$ rad. Observou-se que a penetração ficou acima do limite mínimo de 4,0 mm e que esse bom comportamento não mostrou influência direta da taxa de aplicação.

Para o LR aplicado à taxa de 1,2 L/m² na Wót+2, observou-se um resultado de torque inesperado (1,32 N.m), pois mesmo apresentando uma penetração abaixo de 4,0 mm, a base apresentou uma coesão avaliada como alta, e também uma deformação de ruptura boa ($1,73 \times 10^{-1}$ rad) quando comparada com a maior deformação medida ($3,49 \times 10^{-1}$ rad) e quando se leva em consideração as condições de umidade e taxa de aplicação.

4.6.3.2 Resultados para o LA (Ligante alternativo)

Na Figura 46 são apresentados os resultados da amostra de solo com o LA nas taxas 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2. Logo em seguida são apresentadas as discussões dos resultados.



a) Análise de LA para a taxa de 0,8 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Ao analisar o LA à taxa de 0,8 L/m² na Wót-2 (Figura 46a), verificou-se uma deformação angular de $3,49 \times 10^{-1}$ rad e por tanto maior resistência ao cisalhamento sob o menor torque (1,15 N.m) para essa condição de taxa e umidade de moldagem. Acredita-se que tal comportamento seja influenciado pelo tempo de cura da base que foi a mais rápida dentre as

amostras. Observou-se que o filme betuminoso formado foi quase imperceptível (Figura 47) e que isso tenha refletido na coesão mais baixa.

Figura 47 - Aparência do CP imprimado com o LA na taxa de 0,8 L/m²



Fonte: Autor (2017)

Nas amostras imprimadas com o LA, à taxa de 0,8 L/m² na Wót, a ruptura ocorreu em $2,61 \times 10^{-1}$ rad, com um valor de torque de 1,27 N.m, muito embora, ainda seja menor que o valor encontrado com o LR (1,33 N.m). Acredita-se que tal comportamento se deu por causa da redução da penetração desse ligante para essa condição de umidade da base (6,0 mm), pois se observou que o filme betuminoso formado foi mais perceptível e assim a coesão tenha aumentado.

Nas amostras com o LA à taxa de 0,8 L/m² na Wót+2 (Figura 46c), verificou-se uma mesma deformação angular no momento da ruptura ($2,61 \times 10^{-1}$ rad) para esse ligante na Wót e que seu torque de ruptura foi maior (1,37 N.m). Observou-se que a cura desses ligantes foi mais rápida do que a dos demais ligantes, sugerindo que na condição mais úmida da base os ligantes do tipo ADP são menos sensíveis à umidade do que as emulsões.

b) Análise de LA para a taxa de 1,0 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Nas amostras com o LA à taxa de 1,0 L/m² na Wót-2 (Figura 46a), verificou-se uma redução da deformação ($1,73 \times 10^{-1}$ rad) e do torque de ruptura (1,26 N.m). Observou-se ainda que esse ligante apresentou uma penetração acima de 4,0 mm (6,8 mm) e mesmo com essa redução obteve resultados próximos dos valores de ruptura das amostras com o LR (1,29 N.m).

Nas amostras aplicadas com LA à taxa de 1,0 L/m² na Wót (Figura 46b), verificou-se que o torque de ruptura foi de 1,30 N.m, com uma deformação $1,73 \times 10^{-1}$ rad, sendo um dos maiores valores de torque medidos. Verificou-se que a penetração ficou próxima do limite mínimo de 4,0 mm (4,4 mm), acredita-se que para esse ligante, a densidade da base tenha influenciado a penetração do ligante e conseqüentemente a coesão da base.

Já nas amostras aplicadas com LA à taxa de 1,0 L/m² na Wót+2 (Figura 46c), verificou-se um torque de ruptura de 1,35 N.m, com uma deformação de $1,73 \times 10^{-1}$ rad. Acredita-se que esse ligante tenha uma maior facilidade de penetração em bases mais secas e mais úmidas e por esse motivo tenha apresentado um bom resultado de coesão.

c) Análise de LA para a taxa de 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Ao analisar as amostras aplicadas com LA à taxa de 1,2 L/m² na Wót-2 (Figura 46a), verificou-se um torque de 1,25 N.m com uma deformação angular de $3,49 \times 10^{-1}$ rad. O ligante ainda apresentou uma penetração de 8,8 mm que está dentro da faixa de penetração

citada na literatura como satisfatória (4,0 e 13,0 mm). Pode-se verificar que a condição de base mais seca para esse ligante favorece sua penetração independente da taxa, mas sem que haja redução significativa da coesão da camada.

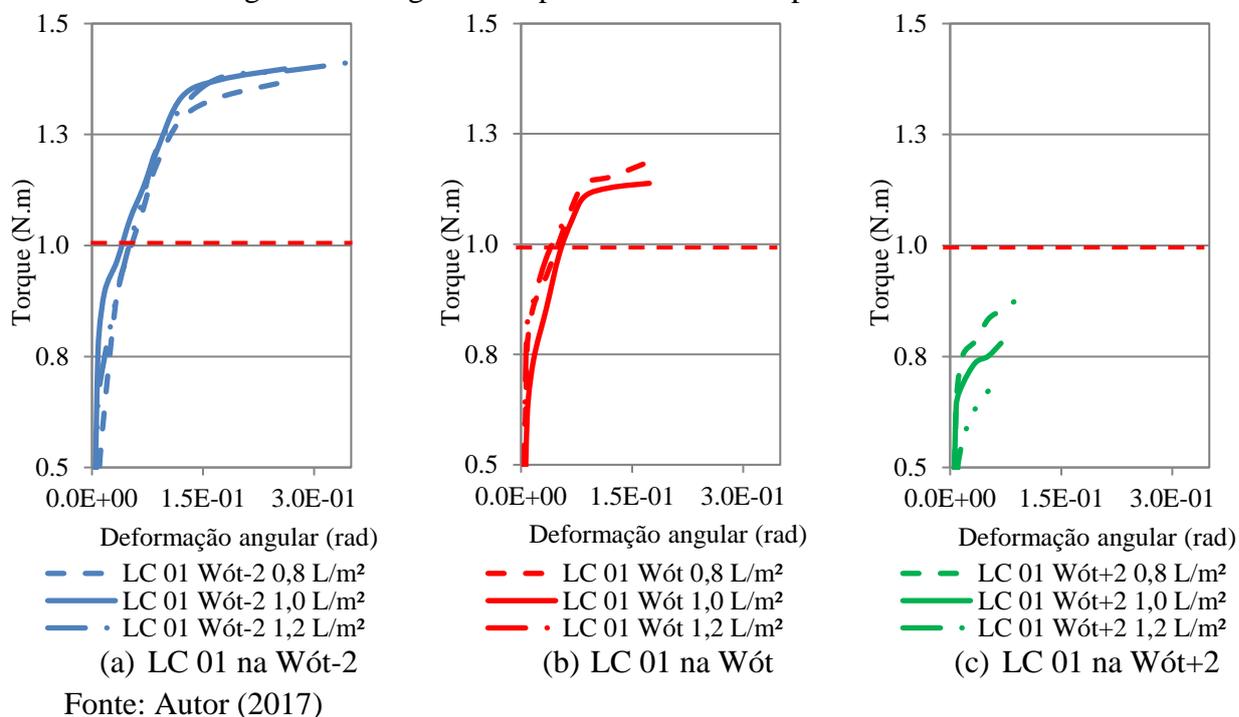
Quando aplicadas à taxa de 1,2 L/m² na Wót (Figura 46b), verificou-se um valor de 1,32 N.m e uma ruptura com uma baixa deformação angular ($5,14 \times 10^{-2}$ rad). Acredita-se que o ligante fornece uma rigidez maior à superfície imprimada seguindo uma tendência já observada para esse ligante em outras condições de umidade e taxa.

Já nas amostras aplicadas com a taxa de 1,2 L/m² na Wót+2 (Figura 46c), verificou-se uma coesão de 1,44 N.m com uma deformação de $2,61 \times 10^{-1}$ rad. Observou-se também que esse ligante apresentou um bom comportamento quanto à penetração (3,7 mm) levando-se em consideração a condição mais úmida da base (Wót+2) e a taxa de ligante mais alta (1,2 L/m²) que, normalmente, são desfavoráveis à penetração.

4.6.3.3 Resultados para o LC 01 (Ligante comercial 01)

Na Figura 48 são apresentados os resultados da amostra de solo com o LC 01 nas taxas 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2. Logo em seguida são apresentadas as discussões dos resultados.

Figura 48 - Ângulo de ruptura da camada imprimada com LC 01



a) Análise de LC 01 para a taxa de 0,8 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Para o LC 01 à taxa de 0,8 L/m² nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2 as rupturas se deram com valores de torque de 1,37, 1,19 e 0,87 N.m, respectivamente. Verificou-se um torque maior de ruptura à medida que a amostra esteve mais seca. Acredita-se que o torque baixo (0,87 N.m) com uma baixa deformação ($8,61 \times 10^{-2}$ rad) seja justificada pela baixa penetração desse ligante na base e consequente presença de um filme betuminoso que favoreceu o aparecimento de exsudação (Figura 49). Tal comportamento sugere uma maior suscetibilidade desse ligante quando da variação de umidade de moldagem e que esse resultado seja uma característica do material (emulsão) e tal comportamento seja intrínseco desse tipo de ligante.

Figura 49 - Filme betuminoso excessivo formado na superfície do CP com o LC 01



Fonte: Autor (2017)

b) Análise de LC 01 para a taxa de 1,0 L/m² nas três umidades (W_{ót-2}, W_{ót} e W_{ót+2})

As amostras com LC 01 à taxa de 1,0 L/m² na umidade W_{ót-2}, apresentou o maior dos resultados de torque (1,40 N.m) com uma deformação de $2,61 \times 10^{-1}$ rad. Esse foi o melhor resultado de torque alcançado por esse ligante para essa taxa de aplicação dentre todos os ligantes testados, além de ter ficado acima do valor adotado como satisfatório (1,0 N.m), observou-se que ele apresenta um bom comportamento quanto à penetração e coesão em bases mais secas. Na taxa de 1,0 L/m² e umidade W_{ót}, o torque de ruptura médio foi de 1,14 N.m para uma deformação de $1,73 \times 10^{-1}$ rad. Acredita-se que o torque tenha diminuído devido a uma redução de coesão causada pela presença de pontos de exsudação nos CPs. Já para a taxa 1,0 L/m² e umidade W_{ót+2}, as amostras apresentaram um comportamento semelhante ao visto nas amostras com a umidade moldagem 2% acima da ótima que foi um valor de torque de ruptura baixo (0,78 N.m), ficando abaixo de 1,0 N.m tido como mínimo satisfatório, acompanhada de uma baixa deformação angular ($6,87 \times 10^{-2}$ rad) sendo esse o

segundo menor valor de deformação medido, confirmando a suscetibilidade desse ligante a variação de umidade de moldagem.

c) Análise de LC 01 para a taxa de 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

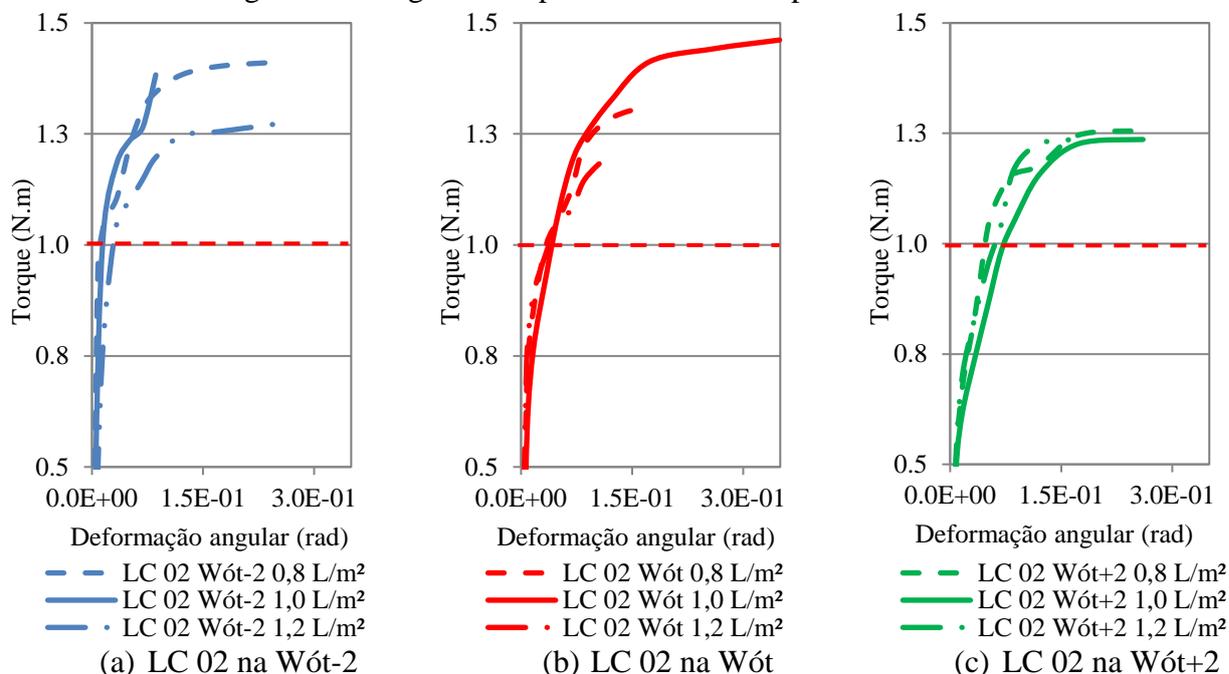
Nas amostras imprimadas com taxa 1,2 L/m² e umidade Wót-2, o torque de ruptura foi de 1,41 N.m, sendo esse o maior valor observado para esse ligante dentre as taxas de aplicação utilizadas. Verificou-se ainda um crescimento da resistência de ruptura da camada imprimada. Acredita-se que o aumento da taxa e a condição da base mais seca tenham favorecido ao aumento da coesão. Já nas amostras imprimadas à taxa de 1,2 L/m² e umidade Wót, os resultados de torque, em média foram baixos, de 1,08 N.m, reforçando a constatação até o momento de que esse ligante é muito suscetível à variação de umidade da base.

Observou-se que os valores de torque foram diminuindo conforme a umidade aumentou (Wót+2) e conseqüentemente a penetração diminuiu (2,0 mm) chegando a 0,67 N.m com uma deformação de $5,14 \times 10^{-2}$ rad, considerada baixa, vale reforçar que deformações da ordem de 10^{-2} foram consideradas baixas. Essa tendência foi verificada para todas as taxas de aplicação quando da umidade de moldagem Wót+2. Tal comportamento sugere que esse ligante necessita de um controle muito rigoroso da umidade da base antes de sua aplicação.

4.6.3.4 Resultados para o LC 02 (Ligante comercial 02)

Na Figura 50 são apresentados os resultados da amostra de solo com o LC 02 nas taxas 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2.

Figura 50 - Ângulo de ruptura da camada imprimada com LC 02



a) Análise de LC 02 para a taxa de 0,8 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Ao analisar as amostras imprimadas com o LC 02 nas taxas 0,8 L/m² nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2 verificou-se que os resultados de torque médio foram 1,41, 1,31, 1,26 N.m, respectivamente, com deformações que variaram de $1,73 \times 10^{-1}$ a $2,61 \times 10^{-1}$ rad. Esses resultados foram considerados bons para a taxa aplicada quando comparado com o LR, sobretudo pela baixa penetração medida. Acredita-se que mesmo com baixas penetrações (2,5, 3,5 e 3,6 mm), o filme betuminoso residual formado na superfície do CP tenha fornecido à base uma coesão satisfatória, pois todos ficaram acima de 1,0 N.m.

b) Análise de LC 02 para a taxa de 1,0 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

Nas amostras que usaram o LC 02 à taxa de 1,0 L/m² nas umidades Wót-2, Wót e Wót+2 verificaram-se torques de ruptura de 1,38, 1,46, 1,24 N.m, respectivamente, com baixa deformação na condição mais seca ($8,61 \times 10^{-2}$ rad) acompanhada de uma resistência à ruptura de 1,38 N.m e uma maior deformação na condição mais úmida ($2,61 \times 10^{-1}$ rad), entretanto com um torque menor (1,24 N.m), embora ambos os valores tenham ficado acima de 1,0 N.m. Pode-se indicar que na condição mais seca (Wót-2) a taxa de 1,0 L/m² tornou a base mais rígida, o que explicaria sua baixa deformação antes da ruptura.

As amostras com o LC 02 à taxa de 1,0 L/m² e umidade Wót apresentaram valores médios de torque bem altos (1,46 N.m) com uma deformação também alta ($3,49 \times 10^{-1}$ rad). Esse comportamento pode ser considerado muito bom, pois mostra que a amostra resistiu mais ao torque antes de romper, sugerindo um equilíbrio entre presença do filme betuminoso residual e a coesão superficial da camada imprimada.

Já nas amostras com o ligante LC 02 à taxa 1,0 L/m² e umidade Wót+2 a tendência foi a mesma seguida na taxa de 0,8 L/m², os valores de deformação angular foram os mesmos ($2,61 \times 10^{-1}$ rad) e os torques de ruptura foram muito próximos, 1,26 e 1,24 N.m, respectivamente, para as taxas de 0,8 e 1,0 L/m². Os resultados sugerem que para esse ligante a taxa de aplicação teve pouca influência nos resultados.

c) Análise de LC 02 para a taxa de 1,2 L/m² nas três umidades (Wót-2, Wót e Wót+2)

As amostras imprimadas com o ligante LC 02 à taxa 1,2 L/m² e umidade Wót-2 apresentaram ruptura com um torque de 1,28 N.m, sendo esse o menor valor medido para essa umidade de moldagem. Entretanto, acredita-se que a redução do torque de ruptura foi causada pelo aumento da taxa de aplicação que favoreceu o aparecimento de ponto de exsudação.

Nas amostras com LC 02 à taxa 1,2 L/m² e umidade Wót, a média dos resultados foi a menor registrada para esse ligante (1,21 N.m). Acredita-se que alguns fatores tenham contribuído para esse resultado, como a baixa penetração (1,0 mm), fazendo com que os CPs apresentassem exsudação, o que reduziu a coesão da base substancialmente.

As amostras que utilizaram o LC 02 à taxa 1,2 L/m² e umidade Wót+2 apresentaram um resultado médio satisfatório (1,24 N.m) com uma deformação de $1,73 \times 10^{-1}$ rad, se aproximando do LR. Verificou-se que a penetração apesar de baixa (1,9 mm) tenha oferecido uma boa coesão à base.

4.6.3.5 Análise geral do ângulo de ruptura da superfície imprimada

Contudo, foi possível entender o comportamento da base quando da aplicação de cada ligante e perceber que existe um aumento de coesão da base imprimada e que esse aumento está relacionado ao tipo do ligante e a condição de umidade da base no momento de sua aplicação.

Viu-se que existe um limite muito pequeno entre o comportamento satisfatório e o insucesso da imprimação, mais ligada a umidade da base do que mesmo a variação de taxa. Essa afirmativa pode ser atribuída a maior suscetibilidade das emulsões em relação a essa variação

de umidade da base no momento da imprimação, pois, como já visto quando avaliada a penetração, que as emulsões possuem uma tendência de redução da penetração em bases mais úmidas. No entanto, quando avalia-se os ADPs (LR e LA), verifica-se que esses ligantes não sofrem com a variação de umidade da base, obtendo assim valores aceitáveis de torque e deformação de ruptura.

Por fim, nota-se que em serviços de imprimação muitas variáveis devem ser observadas para que o ligante utilizado seja adequado ao solo e para que haja sucesso na imprimação.

4.6.4 Ranqueamento dos ligantes testados à luz da coesão superficial

Ao realizar um ranqueamento dos ligantes em relação à coesão superficial verificou-se que o LR, LA, LC 02 tiveram bons comportamentos sob o aspecto de coesão superficial apresentando valores acima de 10,0 kgf.cm, considerado nesta pesquisa como satisfatório. Já o LC 01 apresentou-se satisfatório em bases com as umidades $W_{ót-2}$ e $W_{ót}$, pois os valores encontrados para esse ligante quando a base esteve na $W_{ót+2}$ ficaram abaixo de 10,0 kgf.cm.

A luz dos resultados obtidos cada ligante mostrou-se mais adequado segundo uma taxa específica. Ao se levar em consideração coesões acima de 10,0 kgf.cm e deformações maiores do que $1,21 \times 10^{-1}$ rad foi possível classificar a melhor taxa para cada ligante testado, como se segue: Para o LR indica-se a taxa de 1,0 L/m², pois nessa taxa o LR apresentou coesões maiores do que o mínimo adotado como satisfatório (10,0 kgf.cm) e ofereceu maiores resistências antes da ruptura, entre $1,21 \times 10^{-1}$ rad na $W_{ót+2}$ e $3,49 \times 10^{-1}$ rad na $W_{ót-2}$.

Para o LA indica-se a taxa de 1,0 L/m², pois nessa taxa o LA apresentou coesões maiores do que o mínimo adotado como satisfatório (10,0 kgf.cm) e sua resistência antes da ruptura se manteve constante $1,73 \times 10^{-1}$ nas três umidades. Wót-2, Wót e Wót+2.

Para o LC 01 indica-se a taxa de 0,8 L/m², mas com ressalvas, pois nessa taxa o LC 01 apresentou coesões maiores do que o mínimo adotado como satisfatório (10,0 kgf.cm) apenas nas umidades Wót-2 e Wót seguida por uma resistência à ruptura satisfatória ($> 1,21 \times 10^{-1}$). Entretanto na Wót+2 os valores de coesão ficaram abaixo dos mínimos sugeridos como satisfatórios, sugerindo que para o emprego desse ligante é necessário que haja um controle de umidade rigoroso no momento de sua aplicação.

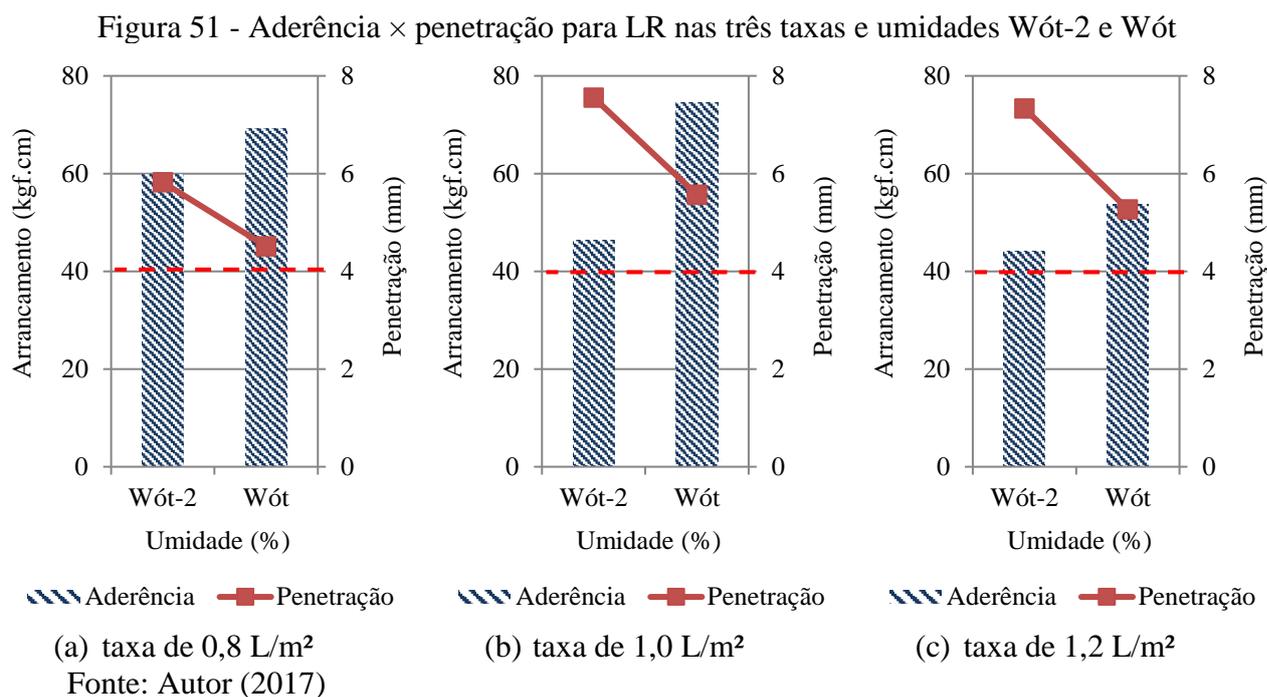
Para o LC 02 indica-se a taxa de 0,8 L/m², pois nessa taxa o LC 01 apresentou coesões maiores do que o mínimo adotado como satisfatório (10,0 kgf.cm), seguida por uma resistência à ruptura satisfatória ($> 1,21 \times 10^{-1}$ rad) que variou de $1,73 \times 10^{-1}$ a $2,61 \times 10^{-1}$ rad.

4.7 Ensaios de arrancamento para verificação da aderência

Na tentativa de avaliar a aderência da camada imprimada com o revestimento e a fim de estudar essa interface para os diferentes tipos de ligantes e taxas de aplicação, foi realizado o ensaio de aderência por meio da ruptura de cisalhamento por torção.

4.7.1 Resultados do ensaio de arrancamento para o LR (Ligante de referência)

Na Figura 51 verificam-se os resultados das amostras imprimadas com o LR nas três taxas de aplicação e nas umidades Wót-2 e Wót.

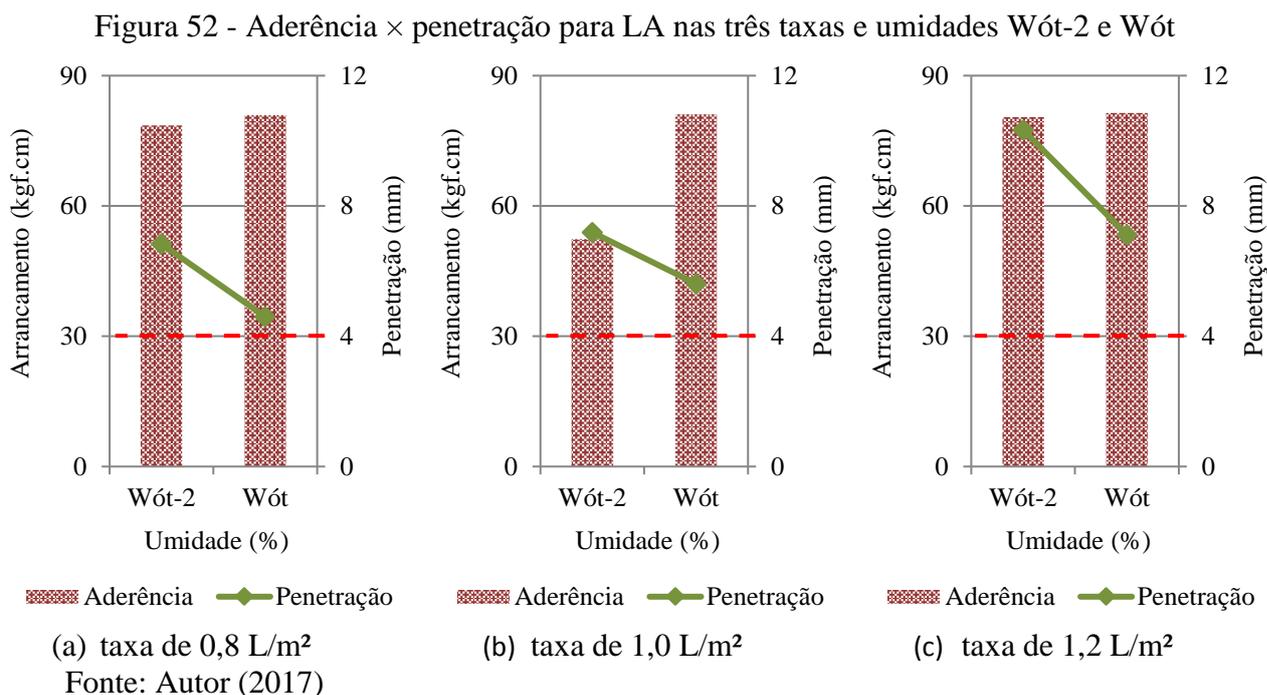


As amostras imprimadas com o LR à taxa de 0,8 L/m² nas umidades Wót-2 e Wót apresentaram valores de aderência em média de 60,0 e 69,0 kgf.cm, respectivamente. Na taxa de 1,0 L/m² houve uma redução no valor da aderência na Wót-2, muito embora tenha obtido um valor de penetração (7,6 mm) maior do que na taxa de 0,8 L/m², indicando que nesse caso a penetração maior provocou redução na aderência. Verificou-se ainda para essa taxa na Wót que o arrancamento aumentou para 74,0 kgf.cm e a penetração foi menor (5,6 mm).

Já na taxa de 1,2 L/m² houve redução nos valores de aderência nas umidades Wót-2 e Wót, 44,0 e 53,0 kgf.cm, respectivamente, mostrando que além da penetração a quantidade de ligante presente na porção de solo penetrada por ele influenciou o resultado da aderência indicando que quanto mais ligante menor será a aderência.

4.7.2 Resultados do ensaio de arrancamento para o LA (Ligante alternativo)

Os resultados do ensaio de arrancamento para o LA no caso das duas umidades testadas e três taxas investigadas são apresentados na Figura 52.

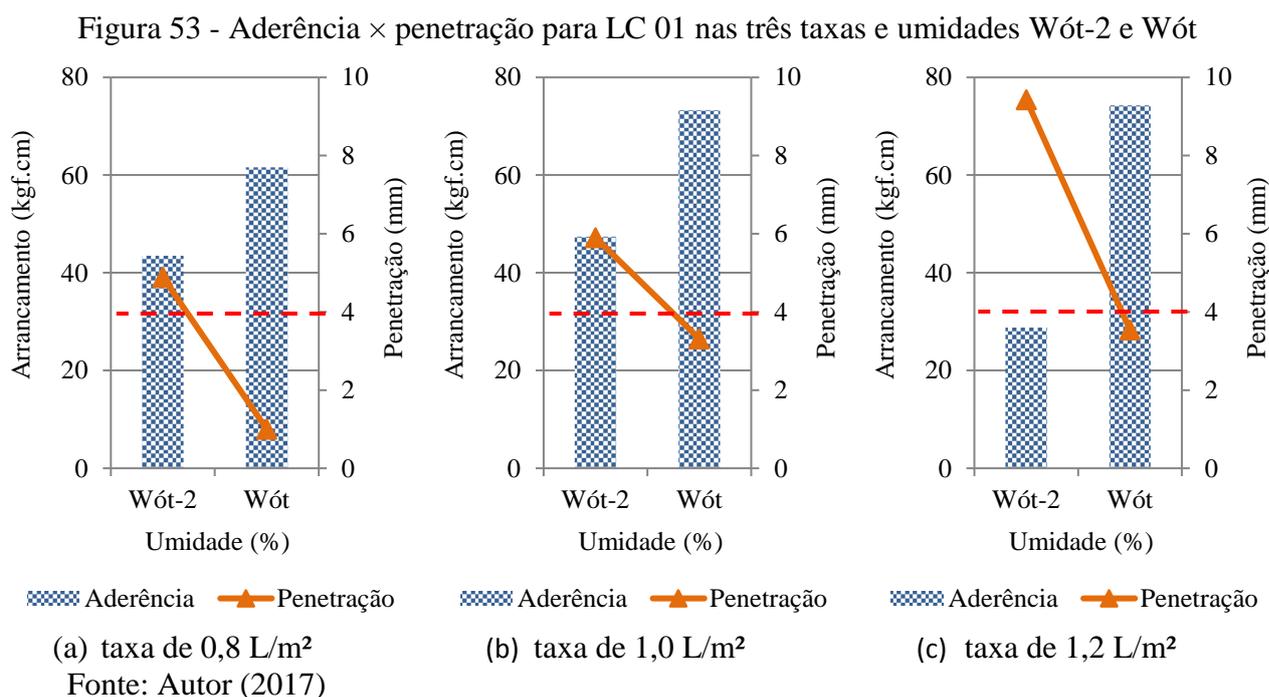


As amostras imprimadas com o LA à taxa de 0,8 L/m² nas umidades Wót-2 e Wót (Figura 52) apresentaram valores de aderência em média de 78,5 e 80,9 kgf.cm, respectivamente. Na taxa de 1,0 L/m² houve uma redução no valor da aderência (52,4 kgf.cm) na Wót-2. Contudo, todos os outros valores de aderência encontrados independentemente da taxa ou umidade de moldagem ficaram entre 78,5 e 81,4 kgf.cm, indicando que esse ligante tem um bom desempenho quanto à aderência principalmente nas taxas de 0,8 e 1,2 L/m² com destaque para os valores obtidos quando a base está mais úmida.

Importante dizer que todas as penetrações ficaram entre 4,0 a 13,0 mm, faixa essa apontada na literatura como satisfatória. Observou-se que o LA apresentou o melhor comportamento quanto à aderência dentre todos os ligantes testados incluindo-se o LR, com valores em média 10% maiores do que os obtidos com o LR.

4.7.3 Resultados do ensaio de arrancamento para o LC 01 (Ligante comercial 01)

Os resultados do ensaio de arrancamento para o LC 01 no caso das duas umidades testadas e três taxas investigadas são apresentados na Figura 53.



Nas amostras imprimadas com o LC 01 na Wót-2 independentemente da taxa de aplicação foram verificados valores de aderência menores, variando de 28,8 a 47,4 kgf.cm, embora as penetrações obtidas tenham sido satisfatórias (entre 4,0 e 13,0 mm) como mostrado na Figura

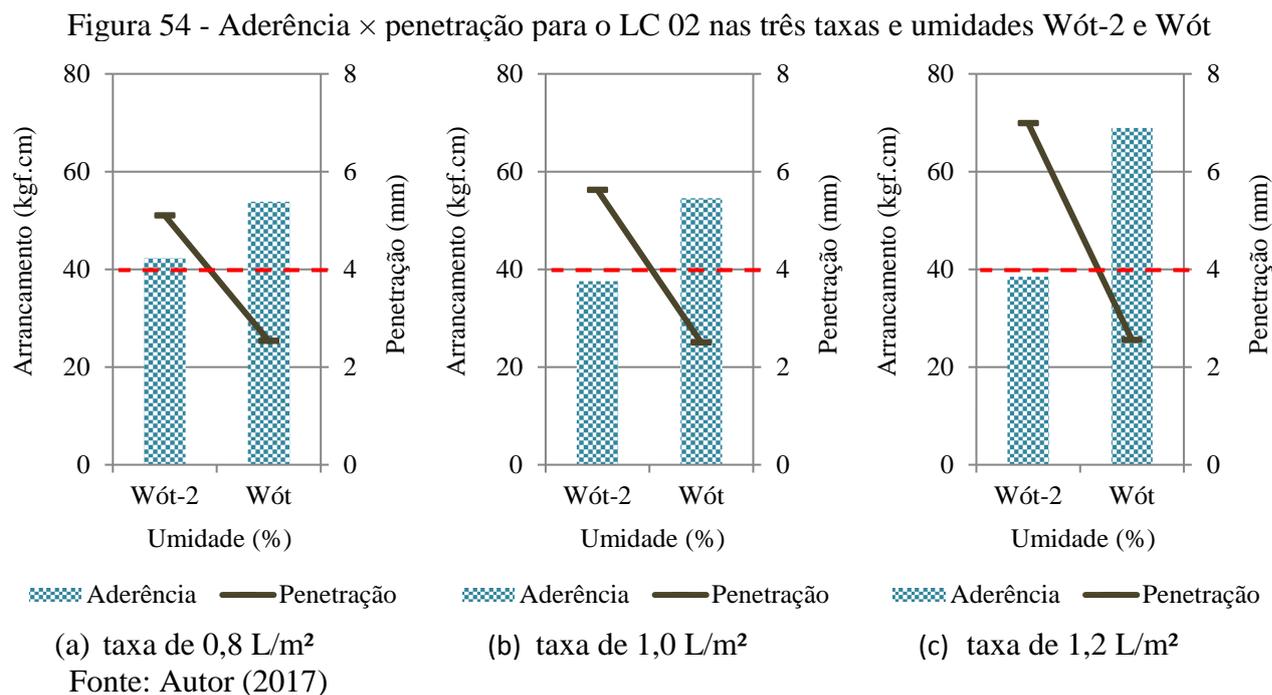
53). Já os valores de aderência obtidos com a base na Wót nas taxas de 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² em média foram de 61,6, 73,3 e 74,3 kgf.cm, respectivamente, entretanto nessa condição as penetrações ficaram abaixo do mínimo satisfatório (4,0 mm).

O comportamento do LC 01 reforça a tendência de que a penetração não influencia diretamente a aderência, levantando dúvidas sobre a faixa de penetração tida como satisfatória pela literatura e sobre os tipos de ligantes utilizados, contudo, acredita-se que esse comportamento possa ser intrínseco das emulsões.

Verificou-se que as amostras com LC 01 para a condição de base mais seca (Wót-2) apresentaram resultados não satisfatórios, mas na umidade ótima (Wót) os resultados assemelharam-se ao do LR com destaque para o valor obtido (74,3 kgf.cm) na umidade Wót à taxa de 1,2 L/m² que foi maior do que o do LR (54,3 kgf.cm), mesmo essa sendo considerada a condição mais crítica em relação à penetração, pois com uma taxa maior (1,2 L/m²) verificava-se em muitos casos a presença de exsudação.

4.7.4 Resultados do ensaio de arrancamento para o LC 02 (Ligante comercial 02)

Para o caso do LC 02, os resultados do ensaio de aderência para as duas umidades testadas e as três taxas investigadas são apresentados na Figura 54.



Nas amostras imprimadas com o LC 02 na Wót-2, independente da taxa de aplicação, foram verificados valores de aderência baixos, variando de 37,6 a 42,3 kgf.cm. Embora as penetrações obtidas tenham ficado acima de 4,0 mm nessa umidade. Entretanto, verificou-se que para amostras moldadas na Wót as penetrações ficaram abaixo de 4,0 mm e mesmo assim apresentaram valores de aderência maiores, variando de 53,9 a 68,9 kgf.cm.

Assim, talvez esse comportamento possa ser atribuído ao tipo de ligante, por se tratar de uma emulsão. Quando comparados os valores obtidos com o LC 02 e os com o LR, verificou-se que todos os valores de aderência ficaram abaixo dos obtidos com o LR mostrando que à luz desse parâmetro o ligante LC 02 parece não atribuir aderência suficiente à base para as condições do experimento.

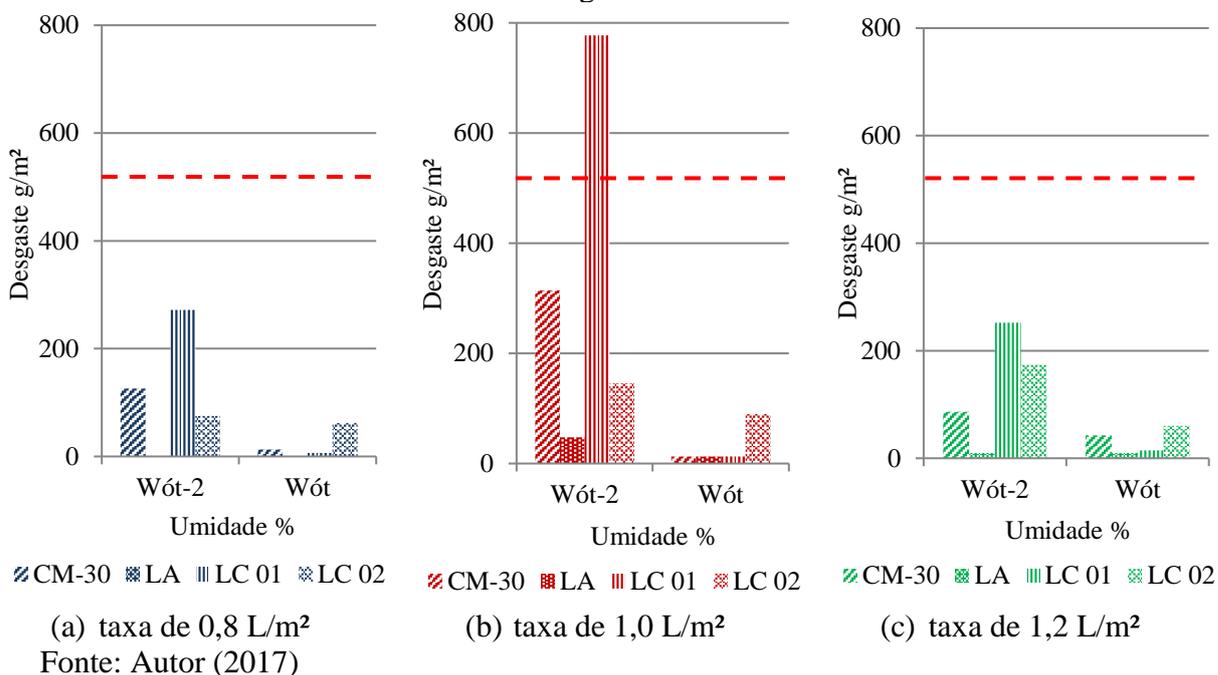
4.8 Ensaios de desgaste superficial

Os ensaios utilizados para complementar avaliação da imprimação foram o WTAT e LWT. O ensaio de WTAT teve por objetivo verificar a perda por abrasão da superfície imprimada frente à passagem da peça de desgaste que simula a passagem dos veículos. O ensaio de LWT visou aferir, a partir do número de passadas de roda e de um carregamento padrão, o afundamento da camada simulando a ação do tráfego sobre a base imprimada.

4.8.1 Resultados dos ensaios WTAT

Na Figura 55 são apresentados os resultados de desgaste superficial das amostras moldadas nas umidades $W_{ót-2}$ e $W_{ót}$, com três diferentes ligantes e ainda o ligante de referência, nas taxas de 0,8, 1,0 e 1,2 L/m². Esse ensaio não foi realizado com as amostras na condição mais úmida, pois as penetrações obtidas na $W_{ót+2}$ (1,0 mm) ficaram abaixo do limite mínimo (4,0 mm) tido como satisfatório, além de ter sido notado a presença de exsudação. Essa diretriz se repetiu para todas as amostras testadas. Vale salientar que o ensaio não foi feito com o CP imerso em água, como consta nas modificações do procedimento do ensaio no capítulo 3.

Figura 55 - Desgaste superficial nas taxas 0,8, 1,0 e 1,2 L/m² nas umidades Wót-2 e Wót para todos os ligantes testados



Segundo a norma ISSA TB-100/90, o limite máximo de desgaste da amostra submetida ao WTAT para o microrrevestimento é de 538,0 g/m². Observe-se que a maioria dos resultados de desgaste está bem abaixo do limite preconizado por essa norma. Esse limite é considerado muito alto para o caso da avaliação da camada solo + imprimação, tendo em vista que ele foi desenvolvido para serviços de revestimento asfáltico do tipo MRAF. Sendo assim, será usado como critério de avaliação qualitativo aquele desenvolvido por Duque Neto (2004) apresentado na Tabela 7 do Capítulo 2.

Na Tabela 14 são apresentados os conceitos das amostras segundo a avaliação de qualificação da base imprimada proposta por Duque Neto (2004) para o ensaio de WTAT. Nota-se que para a maioria dos ligantes os resultados foram satisfatórios seguindo o julgamento qualitativo que levou em consideração, principalmente, o desgaste que atribui notas a cada resultado

obtido. Os resultados seguiram uma tendência que variou de ruim a muito bom conforme apresentado na Tabela 14.

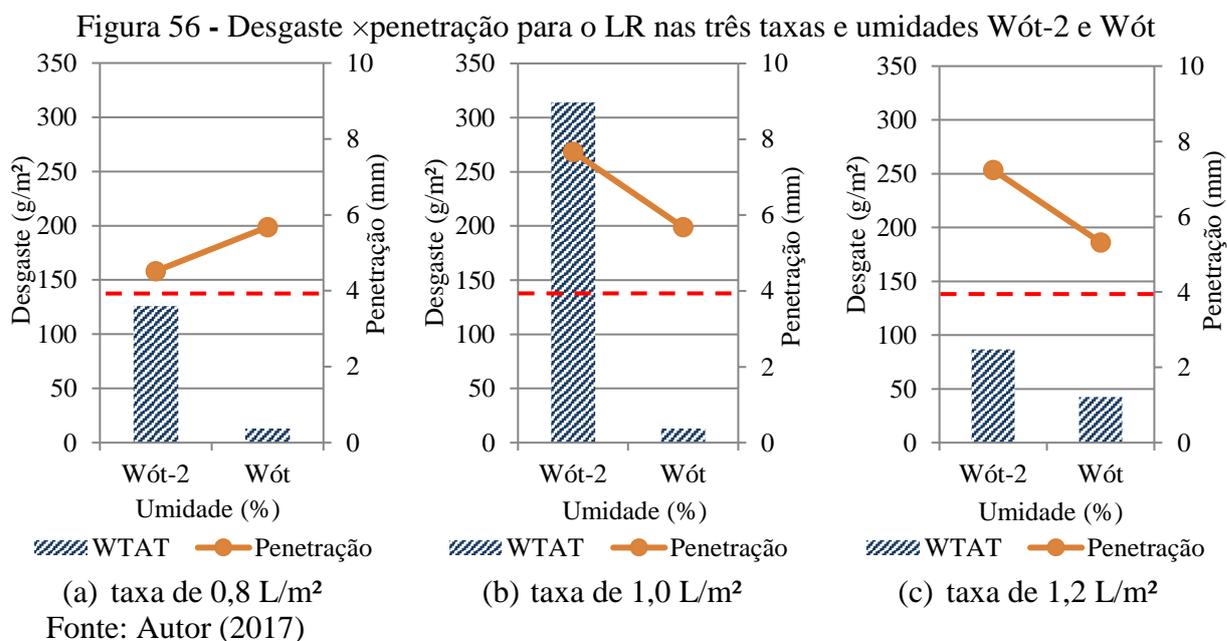
Tabela 14 - Avaliação qualitativa dos resultados do ensaio WTAT para os ligantes testados

Ligantes	Notas	Conceitos
LR	9	Muito bom
LA	10	Muito bom
LC 01	10	Muito bom
LC 02	8	Bom
LC 03	6	Ruim

Fonte: Autor (2017)

4.8.1.1 Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LR

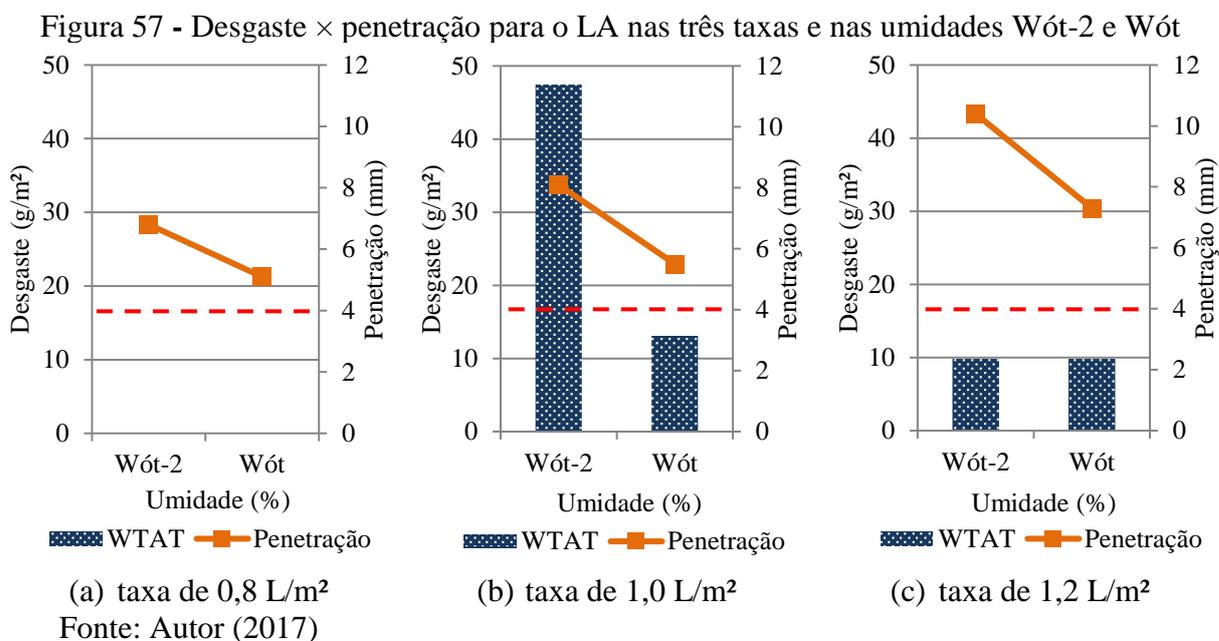
A seguir são apresentados os resultados do desgaste superficial *versus* penetração para o LR (CM-30) (Figura 56), para cada taxa de aplicação (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²) nas umidades Wót-2 e Wót.



Verificou-se que os CPs com o LR apresentaram desgastes próximos de zero ($13,0 \text{ g/m}^2$) quando a base se encontrava na Wót nas taxas de aplicação de $0,8$ e $1,0 \text{ L/m}^2$. Já na Wót-2 para a taxa de $1,0 \text{ L/m}^2$, apesar da penetração maior ($8,0 \text{ mm}$) houve um aumento substancial de desgaste ($314,0 \text{ g/m}^2$). Verificou-se que esse aumento de desgaste ocorreu sempre quando a base esteve mais seca. Essa tendência foi observada também nas amostras na taxa de $1,2 \text{ L/m}^2$. Contudo, observou-se que o aumento da penetração não garantiu uma maior coesão superficial da base imprimada, causando um maior desgaste.

4.8.1.2 Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LA

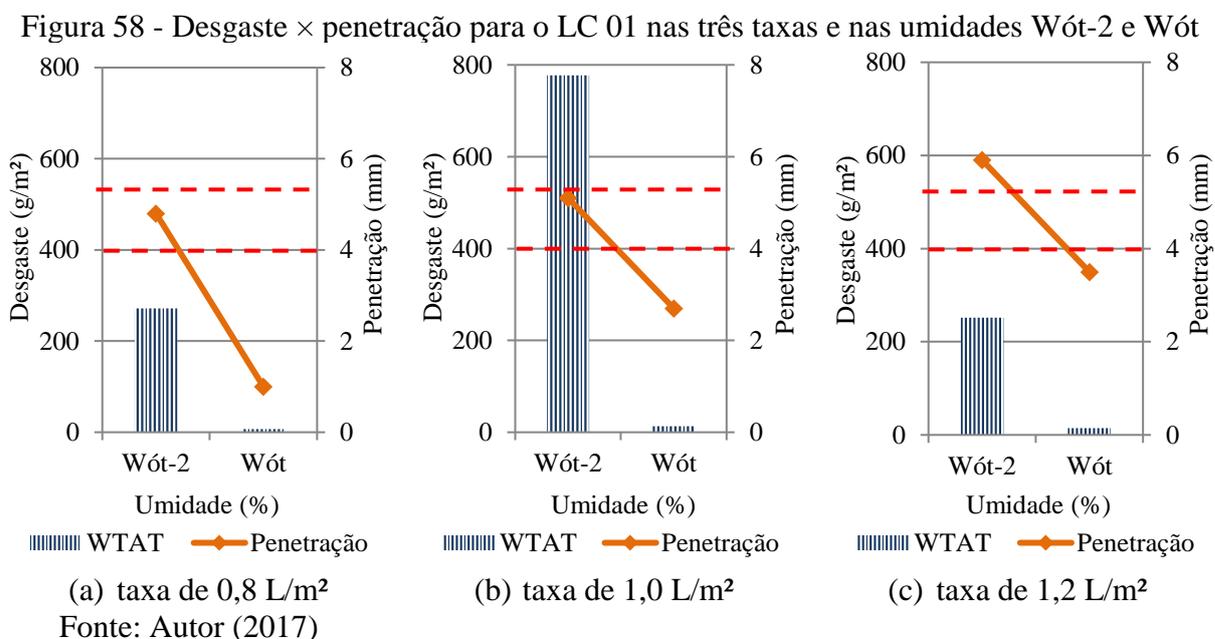
Na Figura 57 são apresentados os resultados dos desgastes superficiais com o LA relacionados com as penetrações, para cada taxa de aplicação, $0,8$, $1,0$ e $1,2 \text{ L/m}^2$ e nas umidades Wót-2 e Wót.



Verificou-se que nas amostras com LA moldadas na umidade Wót-2, o desgaste foi menor do que os resultados obtidos com o LR, chegando à zero na taxa 0,8 L/m². Observou-se que para a taxa de 1,0 L/m² na Wót o desgaste foi o mesmo (13 g/m²) do encontrado quando imprimado com o LR. Observou-se ainda que todas as penetrações ficaram acima do limite mínimo de 4,0 mm citado na literatura como satisfatório, independente da umidade de moldagem. Pode-se adiantar que as amostras imprimadas com o ligante LA apresentaram o menor desgaste quando comparadas com os outros ligantes, inclusive o de referência.

4.8.1.3 Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LC 01

Na Figura 58 são apresentados os resultados dos desgastes superficiais relacionados com as penetrações, para cada taxa de aplicação, 0,8, 1,0 e 1,2 L/m², com o LC 01 nas umidades Wót-2 e Wót.

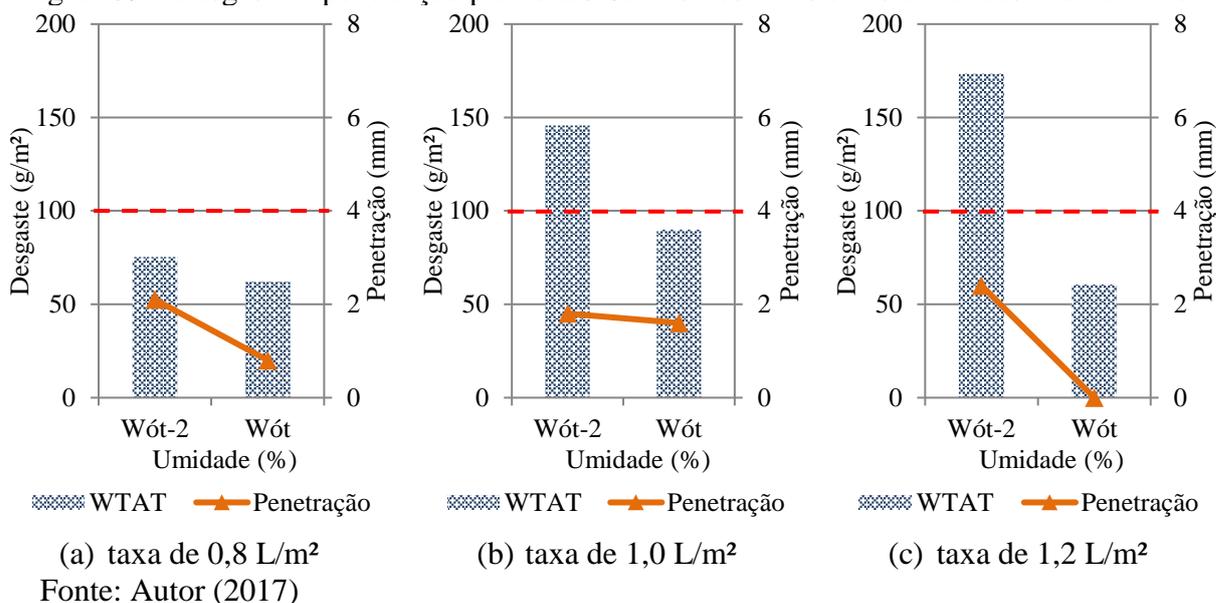


Com o ligante LC 01 foi observado que o desgaste obtido para as amostras imprimadas na taxa de 1,0 L/m² e na Wót foi o mesmo do encontrado para a amostra com o LR (13,0 g/m²), mas quando se verificou o resultado na condição mais seca o desgaste teve um aumento significativo, de 13,0 g/m² para 777,0 g/m², valor esse que ultrapassa o limite máximo de desgaste (538,0 g/m²) apontado pela norma ISSA TB 100/90. Esses resultados sugerem que para esse ligante a umidade da base no momento da imprimação é um fator preponderante para o melhor desempenho da imprimação quanto ao desgaste. A mesma tendência foi observada quando da utilização das outras taxas de imprimação de 0,8 e 1,2 L/m². Observou-se ainda que as penetrações encontradas nas amostras moldadas na Wót, independentemente da taxa de aplicação, ficaram abaixo do limite mínimo de 4,0 mm, indicando que apesar de não ter sofrido nessa umidade um desgaste acentuado, a utilização desse material é inviabilizada, para o solo testado nesta pesquisa, pelas baixas penetrações, não garantindo uma interação adequada entre base e revestimento.

4.8.1.4 Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LC 02

Na Figura 59 são apresentados os resultados dos desgastes superficiais com o LC 02 relacionados com as penetrações, para cada taxa de aplicação (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²) nas umidades Wót-2 e Wót.

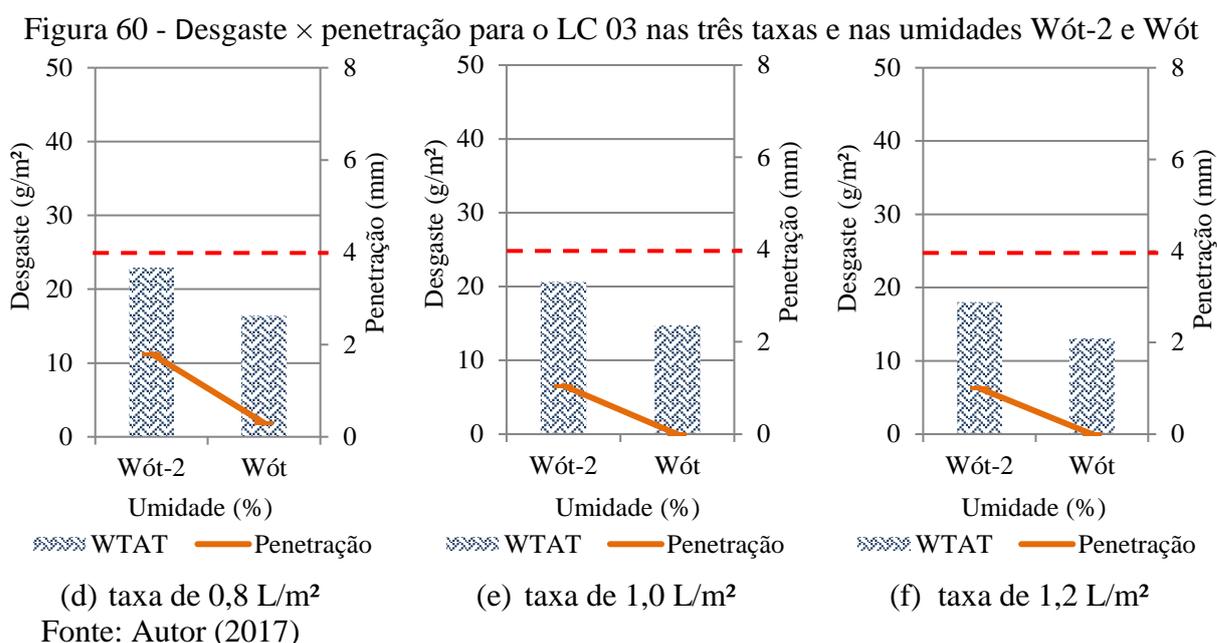
Figura 59 - Desgaste × penetração para o LC 02 nas três taxas e nas umidades Wót-2 e Wót



Para o ligante LC 02, o resultado de desgaste da amostra à taxa de 1,0 L/m² na Wót foi cerca de sete vezes maior (90,0 g/m²) do que o encontrado na amostra com o LR (13,0 g/m²). Acredita-se que tal comportamento se deve a baixa penetração, mostrando que existe uma influência do resultado de desgaste com a penetração, corroborando a necessidade de garantir a mínima penetração e assim um melhor comportamento da base imprimada. Já para a condição Wót-2, verificou-se uma redução de 50% do desgaste na amostra quando comparada com a amostra com o LR, mostrando que o LC 02 atuou de forma mais efetiva contra o desgaste na base na condição mais seca. Notou-se ainda baixos valores de penetrações nas duas condições de umidade avaliadas da amostra com o LC 02 em todas as taxas de aplicação utilizadas. Assim, sugere-se que mais testes sejam realizados com esse produto, adotando diferentes tipos de camadas de base para comprovar a sua aplicabilidade em serviços de imprimação.

4.8.1.5 Resultados do desgaste superficial versus penetração para o LC 03

Na Figura 60 são apresentados os resultados de desgaste superficial relacionado com a penetração do LC 03 para cada taxa de aplicação (0,8, 1,0 e 1,2 L/m²) nas umidades Wót-2 e Wót.



Para o LC 03 foram verificados baixos valores de penetrações, com regiões exsudadas e desgastes com arrancamento pontuais tanto na Wót como na condição mais seca (Wót-2) (Figura 61a). Em relação à penetração foi verificado que os valores obtidos ficaram abaixo de 4,0 mm independentemente da umidade de moldagem. Contudo, a amostra apresentou baixo desgaste quando comparada com a amostra de LR. Acredita-se que essa redução do desgaste se deu por causa do excesso de ligante presente na superfície da placa na hora do ensaio (Figura 61b) formando um filme betuminoso que ocasionou no deslizamento da peça de abrasão, tornando o resultado inesperado.

Figura 61 - Placa com arrancamentos pontuais após o ensaio de WTAT para o LC 03



(a) desgastes pontuais



(b) placa exsudada

Fonte: Autor (2017)

4.8.1.6 *Comentários gerais do desgaste superficial versus penetração para os ligantes testados*

Nota-se, conforme os resultados encontrados que, quando se relaciona o desgaste com a penetração, há uma tendência de desgaste maior nas amostras que apresentam uma maior penetração e que isso ocorre com maior frequência quando o material de base se encontra mais seco. Essa tendência foi verificada em todas as amostras testadas com exceção da amostra com o ligante LC 03 que apresentou baixas penetrações e baixo desgaste causados pela presença de exsudação.

De acordo com esses resultados de laboratório, acredita-se que os ligantes LA, LC 01 e LC 02 apresentem um comportamento, quanto ao desgaste superficial, equiparável ao ADP CM-30 (LR). Entretanto, são necessárias mais pesquisas com testes em diferentes bases para atestar o emprego desses ligantes em serviços de imprimação betuminosa.

4.8.2 Resultados dos ensaios LWT

Buscou-se por meio dos ensaios LWT verificar o comportamento das amostras imprimadas para os três tipos de ligantes testados (LA, LC 01 e LC 02) e o ligante de referência (CM-30) quanto ao Afundamento de Trilha de Roda (ATR). Destaque-se que o ensaio de LWT não foi realizado para o caso do ligante LC 03 em função da penetração obtida com esse ligante ter ficado abaixo do mínimo satisfatório (4,0 mm). Neste item, investigou-se a influência da variação da umidade de moldagem ($W_{ót-2}$ e $W_{ót}$) e da taxa de ligante (0,8, 1,0, e 1,2 L/m²). Destaca-se não ter sido possível realizar os ensaios nas amostras submetidas a 2% acima da umidade ótima, pois as placas apresentaram baixas penetrações com presença de exsudação, o que acabava provocando a destruição prematura das placas (Figura 62).

Figura 62 - Exemplo de placa destruída para o LC 03 na umidade $W_{ót}$

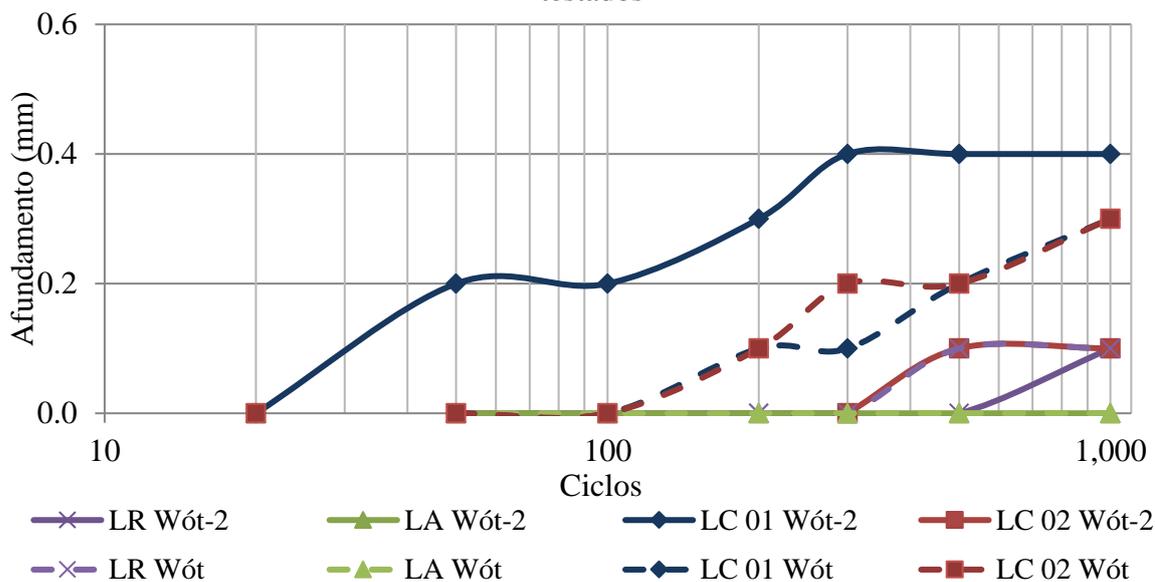


Fonte: Autor (2017)

4.8.2.1 Avaliação dos resultados de ATR para os ligantes testados à taxa de 0,8 L/m²

Na Figura 63 são apresentados os resultados de ATR das amostras imprimadas na taxa de 0,8 L/m² nas condições $W_{ót-2}$ e $W_{ót}$ para os ligantes testados.

Figura 63 - Ensaio de LWT nas unidades Wót-2 e Wót à taxa de 0,8 L/m² para os ligantes testados



Fonte: Autor (2017)

Observou-se que o LR (CM-30) não apresentou ATR significativo, se mantendo estável até o fim do ensaio com um ATR total de aproximadamente 0,1 mm para a unidade de moldagem Wót-2 e Wót. Com 1000 ciclos o LC 02 apresentou um afundamento total semelhante ao LR que apesar de apresentar afundamento no ciclo 500 (0,1 mm) se manteve estável e chegou ao fim do ensaio. Moreira (2010) ao estudar solo+emulsão encontrou valores de afundamento de 0,3 mm, atribuindo a esse resultado um conceito satisfatório, acredita-se que o ligante LC 02 atribuiu a base coesão suficiente para resistir aos esforços imprimidos pelo ensaio.

As placas imprimadas com LA na taxa 0,8 L/m² nas unidades Wót-2 e Wót não apresentaram ATR, chegando aos 1000 ciclos sem apresentar defeito (Figura 64). Para verificar o quanto uma placa resistiria, aplicou-se mais 1000 ciclos de carga. Assim, verificou-se ao final do ensaio que a mesma não apresentou afundamento significativo, atestando o bom desempenho

em laboratório do LA quando aplicado na taxa de $0,8 \text{ L/m}^2$ nas umidades Wót-2 e Wót. Esse resultado dá indícios que a base imprimada com esse ligante apresentou elevação de rigidez.

Figura 64 - Aspecto da placa intacta após o ensaio LWT com LA à taxa de $0,8 \text{ L/m}^2$ na Wót-2



Fonte: Autor (2017)

No caso das placas imprimadas com o LC 01 na taxa $0,8 \text{ L/m}^2$ nas Wót-2, verificou-se ATR logo nos primeiros 50 ciclos, além de desgaste da camada, sendo possível ainda, verificar ao término do ensaio presença de trincas nas placas nos pontos de saída e chegada da roda do equipamento (Figura 65).

Figura 65 - Aspecto da placa imprimada com LC 01 na taxa de 0,8 L/m² com início de ruptura



Fonte: Autor (2017)

As amostras LC 01 e LC 02 aplicadas na taxa de 0,8 L/m² e na Wót mostraram afundamentos finais semelhantes, porém com maior desgaste nas amostras que utilizaram o LC 02. Ao final, verificando-se a penetração do ligante LC 02 nas placas, notou-se uma penetração descontínua (Figura 66) que pode ter contribuído para os descolamentos pontuais (Figura 67).

Figura 66 - Penetração descontínua na amostra com o LC 02 na Wót e taxa de 0,8 L/m²



Fonte: Autor (2017)

Figura 67 - Desgaste superficial na amostra com o LC 02 na Wót e taxa de 0,8 L/m²

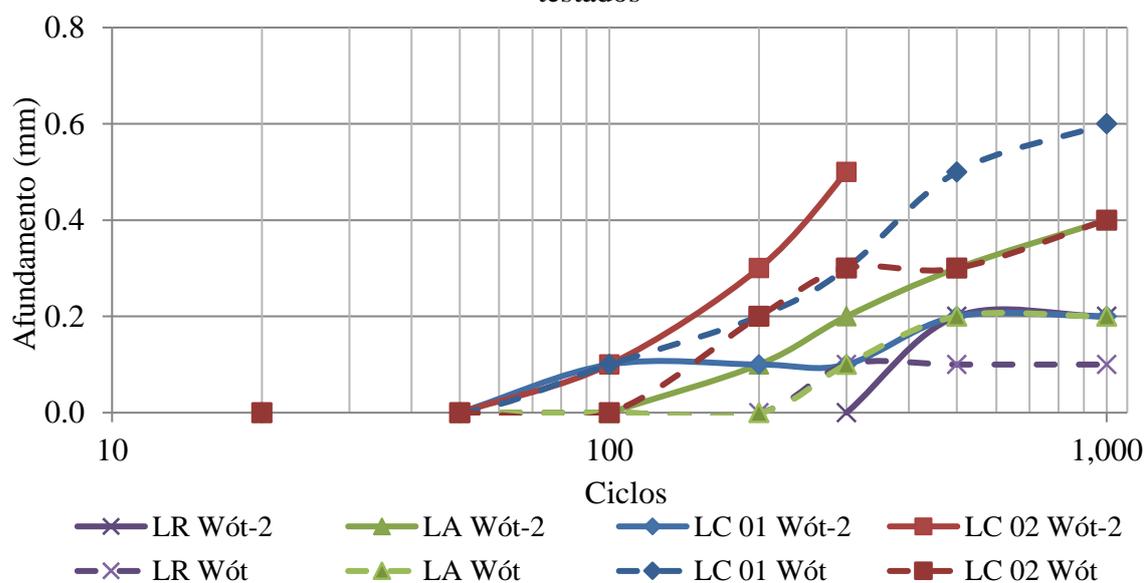


Fonte: Autor (2017)

4.8.2.2 Avaliação dos resultados de ATR para os ligantes testados à taxa de 1,0 L/m²

Na Figura 68 são apresentados os resultados de ATR para as bases imprimadas com três amostras de ligantes e com o LR na taxa de 1,0 L/m² nas condições Wót-2 e Wót.

Figura 68 - Ensaio de LWT nas unidades Wót-2 e Wót na taxa de 1,0 L/m² para os ligantes testados



Fonte: Autor (2017)

As amostras ensaiadas que utilizaram o LR na taxa de 1,0 L/m² na Wót-2 apresentaram afundamentos, em média, somente após 500 ciclos, mas se mantendo estável até o fim do ensaio com um afundamento total de 0,2 mm, mostrando um comportamento indiferente à mudança de taxa. Com 1000 ciclos essa amostra apresentou comportamento semelhante ao LC 01 quando aplicado sob a mesma condição de taxa e umidade. O LC 01 apesar de apresentar afundamento já no centésimo ciclo (0,1 mm) se manteve estável até o ciclo 500, quando o afundamento passou para 0,2 mm, chegando ao fim do ensaio com o mesmo afundamento do ligante de referência.

Observou-se ainda que as amostras que utilizaram o LR na taxa de 1,0 L/m² e Wót apresentaram afundamento após 300 ciclos, mas se mantiveram estáveis até o fim do ensaio com um afundamento total de 0,1 mm. Acredita-se que o ligante de referência apresentou um comportamento satisfatório. Duque Neto (2004) ao atribuir notas de desempenho para bases imprimadas, bases consideradas muito boas apresentaram afundamentos menores que 0,5 mm.

As amostras imprimadas com o LA na base mais seca (Wót-2) e à taxa de 1,0 L/m² apresentaram descolamentos e afundamentos crescentes chegando à ruptura da placa (Figura 69). Acredita-se que os descolamentos pontuais foram causados pela pouca penetração do ligante que em alguns pontos ficaram abaixo de 3,0 mm. Já nas amostras com o LA na Wót à taxa de 1,0 L/m², o afundamento ocorreu no ciclo 500 (0,1 mm) e se manteve estável até o fim do ensaio. Tal comportamento sugere que para esse ligante a variação de umidade de moldagem da base é um fator que interfere diretamente nesse parâmetro de avaliação.

Figura 69 - Pontos de descolamento para a amostra com LA à taxa de 1,0 L/m² na Wót-2



Fonte: Autor (2017)

Nas amostras imprimadas com o LC 02 na Wót-2 à 1,0 L/m², houve um desgaste excessivo da camada, com aparecimento de descolamentos pontuais ao longo da placa. Foi possível verificar, ainda, a ruptura da placa nos pontos de saída e chegada da roda do equipamento ao fim do ensaio, interrompido no ciclo 200, tendo em vista a ruptura da placa (Figura 70). Entretanto, nas placas imprimadas com o LC 02 na Wót à 1,0 L/m², percebeu-se um afundamento total de 0,4 mm. (Figura 71). No final desse ensaio também foi possível perceber visualmente descolamentos pontuais ao longo da placa, mas sem que houvesse a ruptura da mesma.

Figura 70 - Ruptura observada para a amostra com LC 02 à taxa de 1,0 L/m² na Wót-2



Fonte: Autor (2017)

Figura 71 - Ensaio de LWT com o LC 02 na umidade Wót e taxa de 1,0 L/m²

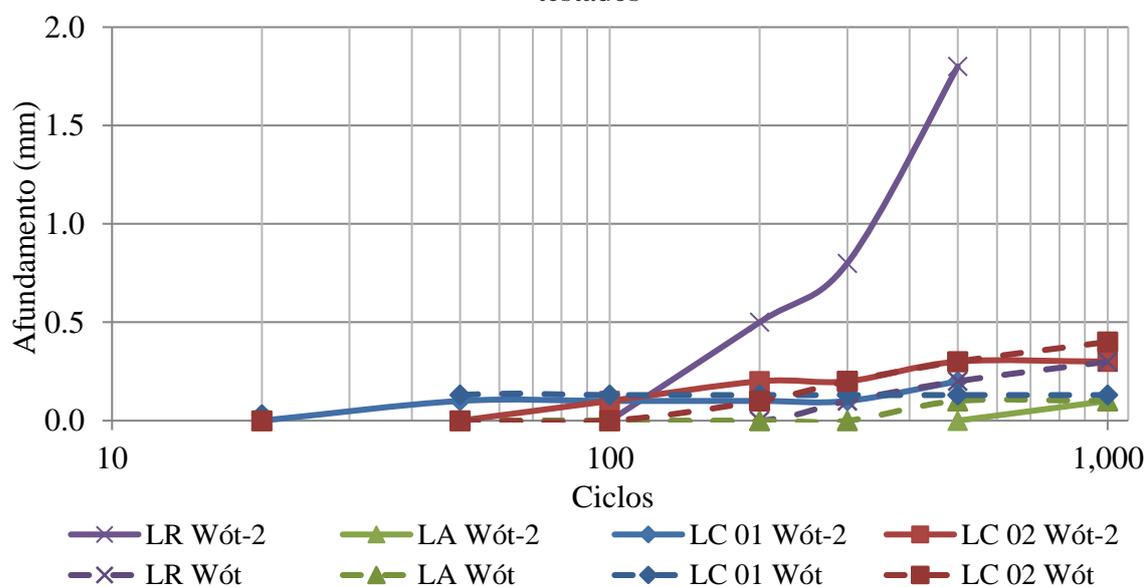


Fonte: Autor (2017)

4.8.2.3 Avaliação dos resultados de ATR para os ligantes testados à taxa de 1,2 L/m²

Na Figura 72 são apresentados os resultados de ATR para bases imprimadas com três amostras de ligantes e com o LR na taxa de 1,2 L/m² nas umidades Wót-2 e Wót.

Figura 72 - Ensaio de LWT nas umidades Wót-2 e Wót na taxa de 1,2 L/m² para os ligantes testados



Fonte: Autor (2017)

Nas amostras imprimadas com o LR houve afundamentos após 100 ciclos, e para a umidade Wót-2 o afundamento se acentuou chegando à ruptura no ciclo 500 (Figura 73). Os resultados mostraram que, para amostras moldadas na Wót-2 e taxa de 1,2 L/m², o LR se mostrou suscetível à variação da taxa. O LR mesmo conseguindo uma penetração média dentro do recomendado (> 4,0 mm), apresentou pontos de exsudação. Acredita-se que essa situação tenha contribuído para a ruptura dessa placa. Já as amostras moldadas na Wót e taxa 1,2 L/m² com o LR apresentaram afundamento constante após 300 ciclos, terminando o ensaio com um afundamento total de 0,3 mm (Figura 74), indicando que o LR sucessivamente mostra resultados satisfatórios, independentemente da taxa de aplicação, atingindo penetração média dentro do recomendado (> 4,0 mm) e em média com baixos afundamentos de trilha de roda (< 0,5 mm), o que já era esperado.

Nas amostras imprimadas com o ligante LA nas umidades Wót-2 e Wót com taxa de 1,2 L/m² o afundamento médio máximo foi de 0,1 mm com pouco desgaste e se mantendo estável durante o ensaio. Tal comportamento sugere que esse ligante confere um bom comportamento à base mesmo quando imprimada em uma taxa maior, se mostrando uma boa opção para aplicação em serviços de imprimação betuminosa de rodovias e que poderá vir a substituir o LR que é usualmente utilizado para esse fim.

No caso das amostras imprimadas com o LC 01 e LC 02, os resultados de ATR foram próximos, de 0,1 e 0,3 mm, respectivamente, independentemente das variações de umidade, mas com aparecimento de afundamentos nos locais de saída e chegada da roda. Acredita-se que tal comportamento dá indícios de que em bases mais secas imprimadas com esses

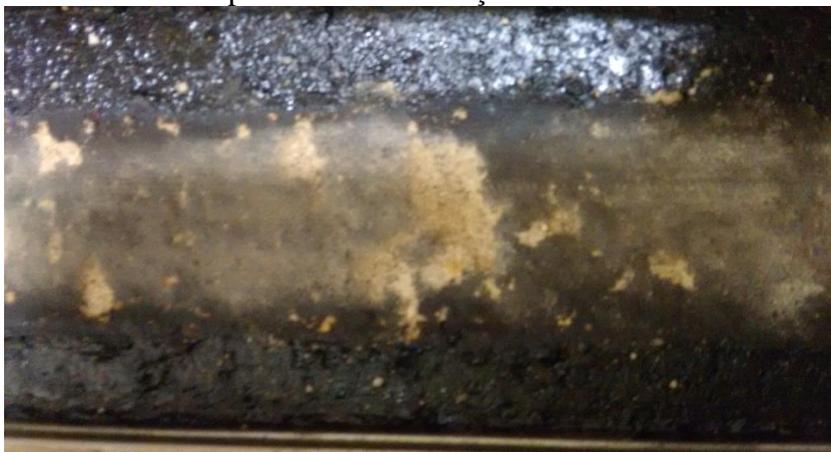
ligantes, a coesão da camada não tenha sido satisfatória ao ponto da base não suportar os arranques da roda nos momentos de alternamento do ciclo durante o ensaio (Figura 74).

Figura 73 - Quebra de uma placa com o LR na condição Wót-2 e taxa de 1,2 L/m²



Fonte: Autor (2017)

Figura 74 - Ensaio de LWT para o LR na condição de umidade Wót e taxa de 1,2 L/m²



Fonte: Autor (2017)

4.8.2.4 *Comentários gerais dos resultados de ATR para os ligantes testados*

O ligante LC 03 não foi submetido a esse ensaio, pois essa amostra apresentou exsudação excessiva. Além disso, ao partir a placa para verificar a penetração, foi possível notar que não

houve penetração. Tal constatação já havia sido feita ainda nos testes preliminares através do método da cápsula e nos ensaios de WTAT. Para finalizar este item, foram apontadas notas quanto ao comportamento de todos os ligantes (Tabela 15).

Tabela 15 - Atribuições de comportamento do ensaio LWT

Ligantes	Notas	Conceito
LR	9	Muito bom
LA	10	Muito bom
LC 01	7,5	Bom
LC 02	7,5	Bom
LC 03	3,5	Ruim

Fonte: Autor (2017)

Nota-se, conforme os resultados encontrados que, quando se relaciona o ATR com a penetração, há uma tendência de afundamentos maiores nas amostras que apresentaram uma menor penetração e que isso ocorre com maior frequência quando o material de base se encontra mais úmido. Essa tendência foi verificada em todas as amostras testadas e, sobretudo, na amostra LC 03, que apresentou baixas penetrações e exsudação, o que impossibilitou os ensaios com esse ligante.

De acordo com e os resultados de laboratório, acredita-se que os ligantes LA, LC 01 e LC 02 apresentaram um comportamento promissor, quanto ao ATR e à luz desse parâmetro esses materiais possam substituir o ADP CM-30. Entretanto, sugere-se que sejam realizadas mais pesquisas, principalmente com testes em diferentes camadas de bases de pavimentos para certificar a viabilidade técnica desses materiais em serviços de imprimação betuminosa.

4.9 Considerações finais

Nesse capítulo foi possível avaliar, a partir dos ensaios de penetração, coesão, aderência e desgaste superficial, o comportamento dos ligantes testados e ranqueá-los quanto a esses parâmetros. Esses ensaios foram escolhidos a partir de uma pesquisa feita sobre quais parâmetros da imprimação são mais avaliados em laboratório. Assim, o LA apresentou um comportamento promissor quando comparado com o LR, independentemente da taxa de aplicação e umidade, seguido do LC 01 que apresentou resultados muito próximos do LR, por fim o LC 02 apresentou resultados semelhantes ao LC 01, mas ligeiramente menores. Vale salientar que as considerações aqui realizadas se restringem ao universo desta dissertação, sendo indicado que mais pesquisas sejam feitas com esses ligantes para atestar seu emprego em serviços de imprimação betuminosa de rodovias. No capítulo que se segue serão resumidas as principais conclusões da presente pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

O ligante LC 03 não foi submetido a esse ensaio, pois essa amostra apresentou exsudação excessiva. Além disso, ao partir a placa para verificar a penetração, foi possível notar que não houve penetração. Tal constatação já havia sido feita ainda nos testes preliminares através do método da cápsula e nos ensaios de WTAT.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Considerações iniciais

São apresentadas neste capítulo as principais conclusões e as constatações do programa experimental obtidas por meio da realização da presente dissertação, bem como algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Ressalta-se que todas as conclusões restringem-se ao universo dos materiais estudados e aos resultados do programa experimental executado e análises aqui realizadas.

5.2 Conclusões sobre os ligantes utilizados

De forma geral, destaca-se que o ligante LA apresentou resultados promissores (penetração, coesão, aderência e desgaste superficial) quando comparado ao ligante de referência (CM-30). Esse ligante se mostrou um material versátil frente às variações de umidade e taxa de aplicação. Observou-se que seu comportamento pode ser considerado como o melhor, dentre os ligantes testados, sobretudo em condições de umidade e taxas mais altas, tidas como críticas.

A cura do ligante alternativo foi a mais rápida (24 horas em média), conferindo a superfície da base uma rigidez maior, verificado por meio do ensaio de aderência, do que a observada nos outros ligantes. Contudo, a continuidade dessa investigação é incentivada, tendo em vista que esse ligante se mostrou uma alternativa viável para substituição do CM-30 em serviços de

imprimação. O ligante pode ser considerado autossustentável pois utiliza um óleo vegetal como solvente em substituição a um solvente betuminoso usado na produção do CM-30.

A EAI comercial intitulada LC 01 apresentou resultados satisfatórios quanto aos parâmetros avaliados (penetração, coesão, aderência e desgaste superficial), mas com algumas restrições quando da sua aplicação em bases mais úmidas e quanto ao emprego de taxas mais altas. Esse mesmo comportamento foi observado para o LC 02 (ligante também comercial), mas com uma maior suscetibilidade às variações de umidade da base mostrando que seu uso requer um maior controle dessa variável no momento da execução do serviço de imprimação.

Já a amostra LC 03 foi o ligante mais suscetível às variações de umidade e taxa, sendo, portanto, o que apresentou o comportamento mais preocupante frente a todos os parâmetros avaliados (penetração, coesão, aderência e desgaste superficial) quando comparado aos demais ligantes.

5.3 Principais constatações do programa experimental

5.3.1 Quanto aos ensaios de penetração e a metodologia simplificada

Diante dos resultados obtidos, observa-se a importância do cuidado com a execução da imprimação quanto: à variação de taxa de aplicação, às umidades de moldagem e de aplicação do ligante, ao tempo de cura do ligante, ao tipo de solo e tipo de ligante utilizado. Onde, não foi possível indicar um item mais importante, pois são necessários mais estudos para tal constatação.

Os ensaios de penetração se mostraram importantes para inferir um bom comportamento do ligante na base, mas verifica-se que somente esse parâmetro não é o bastante para atestar que as condições de coesão e aderência sejam satisfeitas. A faixa de penetração de 4,0 a 13,0 mm indicada como satisfatória de acordo com a literatura pesquisada se mostrou adequada. Embora alguns resultados de coesão e aderência tenham se mostrado satisfatórios mesmo quando a penetração ficou fora da faixa de 4,0 a 13,0 mm, como exemplo destaca-se o LC 02 que obteve valores de penetração abaixo de 4,0 mm e mesmo assim apresentou resultados de coesão e aderência satisfatórios, segundo a literatura pesquisada.

Verificou-se que o método da Cápsula se mostrou um método excelente para diminuir os esforços de laboratório (tempo e material), pois se utiliza de uma quantidade de material muito pequena, 40g em vez de 1000g do Marshall. Apesar do grau de compactação atingido com a Cápsula ter ficado em 90%. Verificou-se que sua aplicação se restringe à solos finos devido as dimensões da Cápsula. Contudo, pode-se afirmar que esse método pode ser empregado como um método expedito para seleção preliminar de ligantes para emprego em serviços de imprimação betuminosa de rodovias.

Sobre a cura da imprimação, verificou-se que os ADPs (LR e LA) tiveram curas que variaram de 24 a 72 horas. Já as emulsões comerciais (LC 01, LC 02 e LC 03) precisaram de até 96 horas para curar. A cura da base é um cuidado que deve ser tomado em serviços de imprimação, pois garante a criação de uma interface preparada para o recebimento do revestimento de rolamento. O tempo de cura deve ser avaliado no momento da escolha do ligante de acordo com o tipo de base, para otimizar o serviço de pavimentação com qualidade.

5.3.2 *Quanto às limitações das especificações de imprimação*

Verifica-se que a norma DNIT 144/2014-ES que sofreu uma atualização recentemente, com a inserção de emulsões especiais para imprimação, recomenda que para determinar a melhor taxa de aplicação deve ser observado a absorção do material betuminoso pela base após 24 h, devendo ser determinada experimentalmente na obra. Cita ainda que a cura da base deve ser verificada visualmente e que o tráfego só pode ser liberado após essa cura, mas não estabelece um tempo mínimo de secagem da base imprimada.

Entretanto, observa-se que o tempo de cura também depende do tipo de ligante a ser ensaiado e da granulometria do material de base arenosa. Para materiais mais argilosos, existe uma tendência da perda de umidade ser mais lenta com o passar do tempo. Para tanto, a Norma não atenta para esses detalhes e nem para as variáveis regionais, temperatura ambiente e tipos de bases granulares.

5.3.3 *Quanto aos ensaios de coesão*

Quanto à coesão da base imprimada, verificou-se que a metodologia de laboratório empregada nesta pesquisa foi de grande importância para ranquear os ligantes testados. Os resultados desses experimentos foram coerentes quando comparados com o valor de referência adotado (10,0 kgf.cm). Entende-se que a coesão é um parâmetro mais indicado para atestar a qualidade do ligante na imprimação, dado que mesmo em casos em que houveram penetrações menores do que o mínimo de 4,0 mm. Sendo assim, mostra que apenas a penetração não garante que a coesão seja satisfeita.

O ranqueamento mostrou que o LA segundo o parâmetro da coesão vem logo depois do LR como uma alternativa ao ligante convencional, seguido pelo LC 02 que mostrou um único valor fora do limite adotado como satisfatório para a deformação antes da ruptura da camada imprimada no ensaio de coesão, que foi de $8,61 \times 10^{-2}$ rad na umidade Wót-2 na taxa de 1 L/m².

O ligante LC 01 mostrou uma maior restrição quando da base mais úmida em todas as taxas, apresentando baixa resistência a ruptura com valores de coesão abaixo de 10 kgf.cm. Já o LC 03 apresentou resultados insatisfatórios em todos os parâmetros avaliados no ensaio de coesão, sendo por tanto inadequado para aplicação segundo essa avaliação.

Verificou-se que a coesão é proporcionada pela união da coesão natural do solo e do acréscimo de coesão fornecido pela imprimação e que esse parâmetro é suscetível às variações de umidade e taxa de aplicação do ligante. Sendo, portanto, um importante parâmetro a ser avaliado em serviços de imprimação betuminosa.

5.3.4 Quanto aos ensaios de aderência

Sobre o ensaio de aderência por meio do arrancamento por torção (adaptado nesta pesquisa para selecionar ligantes para imprimação betuminosa), pode-se afirmar que tal parâmetro se mostrou adequado como tentativa de avaliar o comportamento mecânico da base imprimada. O ensaio é de fácil execução, muito embora necessite de valores de referência que atestem o comportamento satisfatório da base imprimada. Tomando como base o LR foi possível por

meio desse ensaio estabelecer um ranqueamento entre os ligantes investigados. Tomando como base o LR verificou-se que o LA obteve os melhores resultados seguidos pelo LC 01 e LC 02.

5.3.5 *Quanto aos ensaios de desgaste superficial*

Quanto ao desgaste superficial, verificou-se que a adaptação de alguns procedimentos nos ensaios de WTAT e LWT não interferiram nos resultados. Verificou-se que é necessário aguardar mais do que 24 horas de cura para alguns ligantes, pois a depender do material de base e do ligante utilizado esse tempo tenha que ser maior, para propiciar a cura completa da imprimação. Para tanto, a norma DNIT 144/2014 não estabelece período mínimo de cura antes da liberação para o tráfego, mas sim sobre a necessidade de se observar a cura da mesma antes dessa liberação.

5.4 Recomendações para futuras pesquisas

Recomendam-se mais estudos com os ligantes comerciais e o ligante alternativo usados nesta pesquisa. Sobretudo com o LA, que se mostrou um ligante promissor à luz dos parâmetros avaliados e que pode vir a substituir o CM-30 em serviços de imprimação betuminosa. Dentre os estudos para trabalhos futuros, destacam-se:

- Realizar ensaios de campo que avaliem os parâmetros de penetração, coesão e aderência a fim de validar os resultados de laboratório.
- Avaliar a influência da irrigação prévia na penetração do ligante na base.

- Quantificar a diferença na emissão de voláteis durante o processo de cura para diferentes ligantes alternativos e comparar com os resultados do ligante de referência.
- Investigar o efeito do tráfego sobre a base imprimada nos parâmetros de coesão e aderência, pois se acredita que possa haver redução nos valores desses parâmetros quando da passagem do tráfego.
- Investigar outros diluentes vegetais que possam vir a substituir o querosene na diluição de asfaltos.
- Testar diferentes bases granulares em laboratório com os ligantes alternativos para aplicação em serviços de imprimação betuminosa.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13528 **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, 2010.

_____. 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.

_____. 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.

AEMA - Asphalt Emulsion Manufacturers Association - **A Basic Asphalt Emulsion Manual**. Manual Series No. 19 (MS-19), Third Edition, The Asphalt Institute, Lexington – KY, 2009.

ASTM D5 **Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials**, 1997.

_____. **D92 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester**, 2005.

_____. **D8-02 Standard Terminology Relating Materials for Roads 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.

ALMEIDA, F. D.; FILHO, S. A. R. L.; 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.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - **Resolução ANP Nº 36**, DE 13.11.2012 - DOU 14.11.2012, 2012. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2012/novembro/ranp%2036%20-%202012.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2012/novembro/ranp%2036%20-%202012.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)>. Acesso em: 26/01/2016.

BASTOS, J. B. S., **Estudo da influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2013.

BARROSO, S. H. A., **Estudo dos solos da região metropolitana de fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, 253p, 2002.

BERNUCCI, L. L. B., **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1995.

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

BR PETROBRAS - **Asfalto Diluído de Petróleo e Emulsão Asfáltica** – EMA, 2016. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/adp!/ut/p/c4/Portal+de+Conteudo/Produtos/Asfalticos/EmulsaoAsfaltica>>. acesso em: 25/01/2016.

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.

CAPUTO, H. P., **Curso básico de mecânica dos solos**. Volume II, 6ªed., rev. e ampl., Rio de Janeiro - RJ, LTC, 247p, 2014.

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, Transportation Research Board of the National Academies, Washington - D.C., 2010.

CIVILIS, V., **Kioto Plus: Desafios nacionais para o acordo mundial após 2012**. Fundação Heinrich Böll, São Lourenço da Serra - SP, 2007.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Relatório gerencial do panorama atual da malha rodoviária brasileira**, 2016. Disponível em: < <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 17/02/2017.

CROSS, S. A.; SHRESTHA, P. P., **Guideline for using prime and tack coat**. Central Federal Lands. Lakewood Highway Division. Report nº FHWA-CFL/TD-05-002, 2004.

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

DANTAS NETO, **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 ESTADUAL DE RODOVIAS/ CEARÁ - DER-CE, **Informativo gerencial 2014**. Fortaleza - CE, 2014. Disponível em: <<http://portal.der.ce.gov.br/index.php/noticias/43689-ingo>>. Acesso em: 7 mar. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT PRO-070 **Condicionantes ambientais das áreas de uso de obras**. DPP/IPR, Rio de Janeiro - RJ, 2006.

_____ ME-134 **Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência**. DPP/IPR, Rio de Janeiro - RJ, 2010.

_____ ES-144 **Pavimentação - Imprimação com ligante asfáltico**. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER, **Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários (escopos básicos/instruções de serviço)** - Rio de Janeiro - RJ. 375p. (IPR. Publ., 707), 1999.

_____ ME-041 **Solos - Preparação de Amostras para ensaios de caracterização** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-049 **Índice de Suporte Califórnia de Solos Utilizando Amostras não Trabalhadas** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-051 **Análise Granulométrica por Sedimentação** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-080 **Análise Granulométrica por Peneiramento** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-082 **Solos - Determinação do Limite de Plasticidade** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-093 **Solos - Determinação de Densidade Real** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-122 **Determinação do Limite de Liquidez de Solos** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-162 **Solos - Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME 363 **Asfaltos diluídos tipo cura média** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1997.

_____ ME ES-306 **Pavimentação - Imprimação** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1997.

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.

EMISSION INVENTORY IMPROVEMENT PROGRAM (EIIP). **Asphalt paving, vol.III**, chapter 17, EPA, 2001.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H., **An Overview of Unsaturated Soil Behaviour Proceedings of ASCE Specialty Series on Unsaturated Soil Properties**, Dallas, TX, October 24-28, pp. 1-31, 1993.

GRANDE, W. R., **Efeito da Cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, 2011.

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.

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

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

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - D 2074 - **O Agronegócio e os Desafios do Financiamento da Infraestrutura de Transportes no Brasil** - Brasília: Rio de Janeiro : Ipea , 1990- ISSN 1415-4765, 2015

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.

ISSA TB-100 **WTAT Wet Track Abrasion Test, International Slurry Surfacing Association**, International Slurry Surfacing Association, 1990.

_____ TB-139 **Classify Emulsified Asphalt/Aggregate Mixture Systems by Modified Cohesion Tester Measurement of Set and Cure Characteristics**, International Slurry Surfacing Association, 1990.

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 20/02/2016.

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

LOIOLA, P. R. R., **Estudo de Agregados e Ligantes Alternativos para Emprego em Tratamentos**

Superficiais de Rodovias. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza - CE, 2009.

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.

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.

MOHAMMAD, L. N.; BAE, A.; ELSEIFI, M.A.; BUTTON, J.; PATEL, N., **Effects of Pavement Surface Type and Sample Preparation Method on Tack Coat Interface Shear Strenght.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2180, pp93-101. Transportation Research Board of the National Academies, Washington - D.C., 2010.

MOTA, M. V. F., **Pavimento de baixo volume de tráfego: estudo comparativo da vida útil estimada e após abertura ao tráfego.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO, Ouro Preto - MG, 2009.

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.

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.

ORTIGÃO, J. A. R., **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1995.

PARENTE, F. E., **Rodovias de Baixo Volume de Tráfego em revestimento asfáltico (TCP - Tratamento Contra Pó).** Monografia de Especialização. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE, 2000.

RABÊLO, 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.

RABÊLO, A. N., BARROSO, S. H. A., SOARES, J. B., **Estudo do Processo Construtivo de Obras Viárias com Acompanhamento da Imprimação Betuminosa.** In: 38ª Reunião Anual de Pavimentação ABPV, 2007, Manaus. 38ª Reunião Anual de Pavimentação ABPV, 2007.

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.

ROFFE, J. C.; CHAIGNON, F., **Characterisation Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests, and Recommendations,** 3rd International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, 2002.

SANT'ANA, W. C., **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, 2009.

SANTANA, H.; GONTIJO, R. A., **Uma conceituação moderna de especificações para serviços de pavimentação.** 23ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis - SC, 1988.

SANTAGATA, F. A.; FERROTTI, G.; PARTL, M. N.; CANESTRARI, F., **Statistical Investigation of Two Different Interlayer Shear Test Methods.** In: **Material sand Structures.** v: 42 pp.705-714, 2009.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO PESADA DO ESTADO DE SÃO PAULO - SINICESP **Relatório técnico sobre a utilização de emulsões catiônicas em serviços de imprimação,** 2013. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt06a.htm>>. Acesso em 17/04/2016.

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.

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, 92 f il. Color., 2016.

SOUZA JUNIOR, J. D., **O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2005.

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., **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.

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.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S., **Pavimentos econômicos: Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte & Ciência, 291p., 2009.

USACE, **Standard Practice Manual for Flexible Pavements**, 2001. Disponível em: <https://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_250_03.pdf> Acesso em 25/01/2016.

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.

THE ASPHALT 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**. 44º Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu - PR, 2015.

WALSH, I. D.; WILLIAMS, J. T., **“HAPAS certificates for procurement of thin surfacing.”** Highways and Transportation, July/August, 2001.

WOOD, T. J.; JANISCH, D. W.; GAILLARD, F. S., **Minnesota Seal Coat Handbook (MN/RC - 2006-34)** Minnesota Local Road Research Board (LRRB), Minnesota Department of Transportation, Research Services

Section, 2006.

WEST, R. C.; ZHANG, J.; MOORE, J., **Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers**. NCAT Report No. 05-08. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn – Alabama, USA, 2005.