



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

RAIMI COSTA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR
PENETRAÇÃO DE RODOVIAS BASEADA NA EXSUDAÇÃO E NA PERDA DE
AGREGADOS**

FORTALEZA
2018

RAIMI COSTA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR
PENETRAÇÃO DE RODOVIAS BASEADA NA EXSUDAÇÃO E NA PERDA DE
AGREGADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA
2018

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)

- S583a Silva, Raimi Costa da.
Avaliação da dosagem de tratamentos superficiais por penetração de rodovias baseada na exsudação e na perda de agregados / Raimi Costa da Silva. – 2018.
135 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Pavimentação. 2. Tratamento Superficial por Penetração. 3. Dosagem. 4. Perda de agregados. 5. Exsudação. I. Título.

CDD 388

RAIMI COSTA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR
PENETRAÇÃO DE RODOVIAS BASEADA NA EXSUDAÇÃO E NA PERDA DE
AGREGADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 23/03/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Suelly Helena de Araújo Barroso, D. Eng. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Luis Alberto Hermann do Nascimento, Ph.D.
Petrobras (CENPES)

Aos meus pais, meus irmãos e meus familiares
pelo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Kátia e Augusto, meus irmãos, Rahym e Rayra, por todo o amor e compreensão até nos momentos mais difíceis. Obrigada por tudo!

À professora Suelly, minha orientadora e referência de profissional, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em mim durante todos esses anos. Muito obrigada pelo incentivo diário e pela consideração que a sra. demonstra por todos os seus orientados, o privilégio é todo nosso!

À “turma de infra 2016.1”, Regilene, Jorge Lucas, Lucas, Jorge Luis, Márcia, Manoel Gualberto, Lara, Lívia, Guilherme, Galiza, pelos momentos de alegria e aprendizado. Obrigada por todo o apoio, não poderia ter escolhido uma turma melhor. Desejo todo o sucesso do mundo para vocês!

A todo o grupo de solos, mais especialmente à Sarah e à Regilene pela companhia diária, pelos momentos de desabafo, pelas risadas, enfim, pela ajuda em tudo que precisei. Foi um prazer conhecer vocês, que a nossa amizade perdure!

Aos colegas do PETRAN, Daianne, Ana Tália, Sameque, Renan e Gledson, pela amizade construída. Aos professores do PETRAN e aos funcionários do DET que sempre se mostraram muito solícitos em todos os momentos. Muito obrigada!

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos por toda a ajuda dispensada para o desenvolvimento da pesquisa. Ao Bóris e à Lilian pelo acolhimento e incentivo quando iniciei o mestrado. Ao Hermano, ao Rômulo e ao Jhonny pelas contribuições técnicas frequentes. Ao Wesley pelas risadas e “gordices” diárias, você fez os momentos de trabalho muito mais leves. À Annie pela compreensão, paciência e disposição em ajudar a todos. Agradeço ao Ricardo, em especial, pelo suporte na realização dos ensaios laboratoriais e pela disposição sem fim durante todo esse ano. Sou muito grata a vocês!

À Asfaltos Nordeste pela disponibilização da emulsão asfáltica e à Pedreira Pyla pelo fornecimento dos agregados necessários ao estudo.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida, que permitiu o desenvolvimento do presente estudo. Ao CNPq pelo financiamento do Projeto Universal, que possibilitou a compra de insumos necessários para a pesquisa e a participação de eventos científicos.

Aos participantes da banca examinadora Jorge Barbosa Soares e Luis Alberto Hermann do Nascimento pelo tempo dispensado na leitura do trabalho e por todas as sugestões propostas.

RESUMO

No Brasil, o Tratamento Superficial por Penetração (TSP) é uma técnica amplamente difundida para revestimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, no entanto suas especificações de serviço permanecem defasadas e são escassas as pesquisas nacionais nessa temática. Neste contexto, o objetivo principal desta dissertação foi avaliar a dosagem dos tratamentos superficiais por penetração com base na ocorrência dos seus dois defeitos principais: a perda de agregados e a exsudação. Para tanto, inicialmente foram verificadas as diferenças e limitações dos processos de dosagem dos TSPs preconizados pelo DER/CE e pelo DNIT e produziram-se corpos de prova (CPs) em laboratório conforme as duas especificações. Além da dosagem, variou-se a uniformidade do agregado, a temperatura da emulsão asfáltica (46°C e 58°C) e a temperatura de cura (27°C e 50°C). A perda de agregado foi avaliada pelo *Wet Track Abrasion Test* e pelo *Sweep Test* adaptado, relacionando também seus resultados com os do ensaio de aderência *Asphalt Bond Strength*. Na avaliação da exsudação, adaptou-se o *Loaded Wheel Test* e aplicou-se o processamento digital de imagens para verificação da área exsudada dos corpos de prova. Verificou-se que as Taxas de Aplicação de Agregado (TAAg) e de Aplicação da Emulsão (TAE) recomendadas pelos órgãos são incoerentes e que a dosagem do DNIT está sujeita à ocorrência da perda de agregado, devido às suas elevadas TAAg. Os resultados obtidos mostraram que a temperatura de aplicação da emulsão deve ser escolhida com base nas condições de cura do local da construção, a fim de evitar desperdício de energia para um aquecimento que não trará benefícios significativos ao desempenho do revestimento. Observou-se ainda que a utilização de agregados mais uniformes melhora a qualidade do TSP sem precisar aumentar a temperatura de aplicação da emulsão. Por fim, concluiu-se que a exsudação é um defeito menos provável de ocorrer nos TSPs concebidos pelos processos de dosagem estudados, pois ambos recomendam TAE baixas e TAAg elevadas.

Palavras-chave: Pavimentação, Tratamento Superficial por Penetração, Dosagem, Perda de Agregado, Exsudação.

ABSTRACT

In Brazil, chip seal is a widely used technique for coatings of Low Volume Traffic Highways. However its service specifications remain outdated and the national research in this area is scarce. In this context, the main objective of this thesis was to evaluate the design of the chip seals based on the occurrence of its two main distresses: aggregate loss and bleeding. For this purpose, the differences and limitations of the chip seals design processes recommended by DER / CE and DNIT were verified and chip seal samples (CSS) were produced in the laboratory according to the two specifications. In addition to the design method, the aggregate gradation, the temperature of the asphalt emulsion (46° C and 58° C) and the curing temperature (27° C and 50° C) were varied. The aggregate loss was evaluated by the Wet Track Abrasion Test and by the adapted Sweep Test, also relating its results to those of the Asphalt Bond Strength Test. In terms of bleeding evaluation, the Loaded Wheel Test was adapted and the digital image processing was applied to verify the bleeding area of the CSS. It has been found that the Aggregate Application Rate (AAR) and the Emulsion Application Rates (EAR) recommended by the agencies are incoherent and that the DNIT design is susceptible to the occurrence of the aggregate loss due to its high AAR. The results obtained showed that the application temperature of the emulsion should be selected based on the curing conditions of the construction site, in order to avoid waste of energy for a heating which will not bring significant benefits to the performance of the coating. It was also observed that the use of more uniform aggregates improves the quality of the chip seals without having to increase the temperature of application of the emulsion. Finally, it was concluded that bleeding is a distress more unlikely to occur in the chip seals designed by the design procedures studied, since both recommend low EAR and high AAR.

Keywords: Paving, Chip seal, Design, Aggregate loss, Bleeding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema explicativo do TSP	22
Figura 2 - Envolvimento do ligante no agregado	24
Figura 3 - Critério de McLeod.....	25
Figura 4 - Exemplo para cálculo do PUC.....	27
Figura 5 - Simulador MMLS3	27
Figura 6 - Partícula de asfalto dispersa em água numa emulsão catiônica.....	28
Figura 7 - Alguns fatores que afetam a adesividade agregado-ligante.....	29
Figura 8 - Efeito da sujeira superficial em agregados	29
Figura 9 - Equipamento PATTI e tipos de falha	30
Figura 10 - Limites sugeridos por Adams	31
Figura 11 - Equipamento Positest AT-A para avaliação da adesividade	31
Figura 12 - Exemplo do método da bandeja.....	33
Figura 13 - Equipamentos coordenados na construção de um TSS	36
Figura 14 - Equipamento multidistribuidor	36
Figura 15 - Estágios de interação agregado/emulsão do tratamento superficial simples	37
Figura 16 - Conceito de <i>Embedment Depth</i>	38
Figura 17 - Ocorrência de perda de agregado durante a vida de serviço de TSPs	40
Figura 18 - Equipamentos para realização do <i>Sweep test</i> e do <i>Vialit test</i>	42
Figura 19 - Níveis de severidades da exsudação	42
Figura 20 - Histograma do valor crítico de GIV e mapeamento digital	43
Figura 21 - Método de PDI para identificação da exsudação.....	44
Figura 22 - Processamento digital de imagem realizado pelo iPas 2	44
Figura 23 - Ensaio LWT modificado para amostras de TSP.....	45
Figura 24 - Processo de modificação do LWT para ensaio de TSP	46
Figura 25 - Ensaio LWT modificado para identificação de exsudação em TS	46
Figura 26 - Resultados da exsudação de TSP para cada faixa e temperatura.....	46
Figura 27 - Micromecânica aplicada aos tratamentos superficiais.....	48
Figura 28 - Exemplo da amostra extraída em campo	48
Figura 29 - Tomografia de amostras de TSP	48
Figura 30 - Padrão de deformação no revestimento TSP com a passagem do tráfego.....	50
Figura 31 - Exemplos de defeitos em tratamentos superficiais	50
Figura 32 - Ensaio da especificação de emulsões baseada em desempenho (NCHRP 837) ..	53

Figura 33 - Esquema do programa experimental.....	55
Figura 34 - Coleta de agregados na pedreira Pyla	56
Figura 35 - Ensaio de análise granulométrica	56
Figura 36 - Ensaio de adesividade convencional.....	57
Figura 37 - Ensaio de abrasão Los Angeles	57
Figura 38 - Definição das taxas de agregado pelo método da bandeja.....	59
Figura 39 - Determinação da massa específica seca dos agregados.....	59
Figura 40 - Ilustração da moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio WTAT ..	62
Figura 41 - Ilustração do <i>Sweep test</i> adaptado	63
Figura 42 - Área solicitada e não-solicitada no <i>Sweep test</i>	63
Figura 43 - Equipamento LWT adaptado	67
Figura 44 - Fluxograma do processamento digital de imagem realizado pelo iPas 2	69
Figura 45 - Dolly, moldes de silicone e materiais de apoio	70
Figura 46 - Equipamento Positest AT-A	71
Figura 47 - Etapas do ensaio ABS.....	72
Figura 48 - Extração do resíduo da emulsão	73
Figura 49 - Reômetro de cisalhamento utilizado para a realização do ensaio MSCR.....	73
Figura 50 - Curva granulométrica dos agregados não modificados	77
Figura 51 - Curva granulométrica dos agregados modificados.....	77
Figura 52 - Principais concentrações obtidas no ensaio de fluorescência de raios-x	78
Figura 53 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de agregado pelo DER-CE.....	80
Figura 54 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de emulsão pelo DER-CE	81
Figura 55 - Δ médio por camada da dosagem DER-CE com agregado não modificado	81
Figura 56 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de agregado modificado pelo DER-CE.	82
Figura 57 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de emulsão pelo DER-CE	82
Figura 58 - Δ médio por camada da dosagem DER-CE com agregado modificado	83
Figura 59 - Diferença entre taxa teórica e efetiva de agregado pelo DNIT.....	84
Figura 60 - Diferença entre taxa teórica e efetiva de emulsão pelo DNIT	84
Figura 61 - Δ médio por camada da dosagem do DNIT	85
Figura 62 - Δ Médio por camada.....	86
Figura 63 - Gráfico de perda média no WTAT	87
Figura 64 - Gráfico da perda média de agregados obtida no <i>Sweep test</i>	91
Figura 65 - Comparativo da perda de agregados entre WTAT e <i>Sweep test</i>	93
Figura 66 - Gráfico da perda média de agregados obtida no LWT	95

Figura 67 - Imagens antes e após o ensaio LWT adaptado	96
Figura 68 - Resultados válidos de percentual de exsudação obtida no LWT	98
Figura 69 - Percentual de recuperação R e compliância não-recuperável J_{nr}	100
Figura 70 - Tensão de arrancamento para cada conjunto de amostras obtida no ensaio ABS	101
Figura 71 - Tensão de arrancamento média obtida pelo ensaio ABS.....	101
Figura 72 - Gráficos POTS <i>versus</i> Tempo por réplica	103
Figura 73 - Fluxograma de seleção e caracterização dos materiais.....	104
Figura 74 - Fluxograma do processo de dosagem	106
Figura 75 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE46 TC50.....	129
Figura 76 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE46 TCamb	129
Figura 77 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE58 TC50.....	130
Figura 78 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE58 TCamb	130
Figura 79 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE modif. TE46 TC50	131
Figura 80 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE modif. TE46 TCamb.....	131
Figura 81 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE46 TC50.....	132
Figura 82 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE46 TC50.....	132
Figura 83 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE58 TC50.....	133
Figura 84 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE58 TCamb	133
Figura 85 - Avaliação da exsudação em TSPs	134
Figura 86 - Exemplo da EPG americana atual	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos dos resultados da PUC.....	26
Tabela 2 - Taxas de ligante e agregado recomendadas pelo DNIT	34
Tabela 3 - Defeitos em tratamentos superficiais por penetração.....	51
Tabela 4 - <i>Performance-related specification</i> proposta por Adams (2014).....	52
Tabela 5 - Ensaio de caracterização dos agregados	57
Tabela 6 - Ensaio de caracterização das emulsões.....	58
Tabela 7 - Taxas teóricas obtidas pelas dosagens do DER-CE e do DNIT.....	59
Tabela 8 - Matriz experimental para a realização dos ensaios de WTAT.....	64
Tabela 9 - Matriz experimental para a realização do <i>Sweep test</i>	64
Tabela 10 - Matriz experimental para avaliação da exsudação pelo equipamento LWT	67
Tabela 11 - Matriz experimental para avaliação da adesividade dos TSPs por meio do ABS.....	72
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	75
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de caracterização dos ligantes	76
Tabela 14 - Parâmetros para cálculo do PUC dos agregados	77
Tabela 15 - Resultados da fluorescência de raios-x	78
Tabela 16 - TAAg e TAE dosadas pelo método do DER-CE com agregado não modificado.....	80
Tabela 17 - TAAg e TAE dosadas pelo método do DER-CE com agregado modificado	82
Tabela 18 - TAAg e TAE dosadas pelo DNIT	83
Tabela 19 - Resultados da perda de agregado no WTAT	87
Tabela 20 - Critérios de aceitabilidade	88
Tabela 21 - Modelos para previsão da perda de agregados efetiva pelo WTAT.....	89
Tabela 22 - Resultados da perda de agregados obtida no <i>Sweep test</i>	91
Tabela 23 - Modelos para previsão da perda de agregados efetiva pelo <i>Sweep test</i>	92
Tabela 24 - Ranqueamento com base na perda de agregados	94
Tabela 25 - Resultados da perda de agregado obtida no LWT	95
Tabela 26 - Resultado do PDI realizado no iPas2	97
Tabela 27 - Resultados do MSCR para o resíduo da emulsão asfáltica	99
Tabela 28 - Resumo dos tipos de tratamentos superficiais.....	118
Tabela 29 - Percentual de ligante e agregado por réplica (LWT)	126
Tabela 30 - Resultados por réplica do ensaio WTAT	127
Tabela 31 - Resultados por réplica do <i>Sweep test</i>	127
Tabela 32 - Resultados por réplica do LWT.....	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	<i>Aggregate Application Rate</i> (Taxa de aplicação de agregado em inglês)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Asphalt Bitumen Strength</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AST	<i>Asphalt Surface Treatment</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CA	Concreto Asfáltico
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
CRR	<i>Centre de Recherches Routières</i>
CRS	<i>Cationic Rapid Set</i> , emulsão asfáltica catiônica de cura rápida
CS	<i>Cape Seal</i>
CSS	<i>Chip seal sample</i>
CU	Coefficiente de Uniformidade
DER-CE	Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará
DET	Departamento de Engenharia de Transportes
DERT	Departamento de Edificações Rodovias e Transportes (Atual DER)
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Atual DNIT)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOT	<i>Department of Transportation</i> , agências estaduais de transporte nos EUA
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EA	Emulsão asfáltica
EAC	Emulsão Asfáltica Catiônica
EAR	<i>Emulsion Application Rate</i> (Taxa de aplicação de emulsão em inglês)
ED	<i>Embedment Depth</i>
EPG	<i>Emulsion performance-grade</i>
EUA	Estados Unidos da América
FOT	<i>Flip-over test</i>
GIV	<i>Gray Scale Value</i> , tradução literal valor na escala de cinza
J _{nr}	<i>Compliancia não-recuperável</i>

LA	Lama asfáltica
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
M	Para o cálculo do PUC, significa a mediana
MARC	<i>Modified Asphalt Research Center</i>
MMLS3	<i>Third-Scale Model Mobile Loading Simulator</i> , Simulador de carregamento móvel 3D
MRAF	Microrrevestimento Asfáltico a Frio
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
NCDOT	<i>North Carolina Department of Transportation</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NCSU	<i>North Carolina State University</i>
NIVA	<i>National Instruments Vision Assistant</i> , software americano para análise digital de imagens
PA	<i>Perda de agregados</i>
PBA	Plano Básico Ambiental
PDI	Processamento Digital de Imagens
P _{EM}	Percentual de agregado suscetível à exsudação
P _{2EM}	Subtraído de 100% representa o % agregado suscetível à perda de agregados
POTS	<i>Pull-off tensile strength</i>
PRS	<i>Performance-related specification</i>
P _t	<i>Perda teórica</i>
PUC	<i>Performance Based Uniformity Coefficient</i> , coeficiente de uniformidade baseado no desempenho
R	Percentual de recuperação no ensaio MSCR
RBVT	Rodovias de Baixo Volume de Tráfego
RR-2C	Emulsão Asfáltica de Ruptura Rápida
RR-2CE	Emulsão Asfáltica de Ruptura Rápida Elastomérica
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SNV	Sistema Nacional de Viação
TAAg	Taxa de aplicação de agregado
TAE	Taxa de aplicação de emulsão
TAP	Tratamento Antipó

TCP	Tratamento Contra pó
TCamb	Cura à temperatura ambiente (27°C)
TC50	Cura à 50°C
TE46	Temperatura de aplicação da emulsão de 46°C
TE58	Temperatura de aplicação da emulsão de 58°C
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TME	Tamanho Máximo Efetivo
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSP	Tratamento Superficial por Penetração
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
UFC	Universidade Federal do Ceará
V _v	Volume de vazios
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações iniciais	18
1.2	Justificativa e problema de pesquisa	20
1.3	Objetivos	20
1.4	Organização do trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Considerações gerais sobre os tratamentos superficiais por penetração	22
2.2	Fatores que influenciam o desempenho dos tratamentos superficiais por penetração	23
2.2.1	<i>Granulometria</i>	24
2.2.2	<i>Adesividade</i>	28
2.2.3	<i>Dosagem</i>	32
2.2.4	<i>Construção</i>	35
2.3	Defeitos em tratamentos superficiais	38
2.3.1	<i>Perda de agregado</i>	39
2.3.2	<i>Exsudação</i>	42
2.3.3	<i>Outros defeitos</i>	50
2.4	Considerações finais	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	Considerações iniciais	54
3.2	Revisão Bibliográfica sobre Tratamentos Superficiais por Penetração - Etapa 1	54
3.3	Programa experimental para avaliação dos tratamentos superficiais por penetração - Etapa 2	55
3.3.1	<i>Fase I do programa experimental - Coleta e caracterização dos materiais</i>	56
3.3.2	<i>Fase II do programa experimental - Ensaio de avaliação da perda de agregado</i>	58
3.3.3	<i>Fase III do programa experimental - Ensaio de avaliação da exsudação</i>	65
3.3.4	<i>Fase IV do programa experimental – Ensaio complementares</i>	70
3.4	Considerações finais	74
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	75
4.1	Fase I do programa experimental - Coleta e caracterização dos materiais	75
4.1.1	<i>Granulometria</i>	76

4.1.2	<i>Fluorescência de raios-x</i>	77
4.2	Fase II do programa experimental - Ensaio de avaliação da perda de agregado	79
4.2.1	<i>Dosagem dos corpos de prova</i>	79
4.2.2	<i>WTAT adaptado</i>	86
4.2.3	<i>Sweep test adaptado</i>	90
4.3	Fase III do programa experimental - Ensaio de avaliação da exsudação	94
4.3.1	<i>Processamento digital de imagens</i>	95
4.4	Fase IV do programa experimental - Ensaio complementares	99
4.4.1	<i>Ensaio de fluência e recuperação múltipla (MSCR)</i>	99
4.4.2	<i>Ensaio ABS</i>	100
4.5	Considerações finais	103
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
5.1	Principal Contribuição da Dissertação	104
5.2	Principais Constatações do Programa Experimental	107
5.2.1	<i>Quanto aos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais</i>	107
5.2.2	<i>Quanto à avaliação dos diferentes métodos de dosagem dos TSPs</i>	108
5.2.3	<i>Quanto aos resultados dos ensaios de avaliação da perda de agregados obtidos pelo WTAT e pelo Sweep Test</i>	109
5.2.4	<i>Quanto aos resultados do ensaio LWT e o processamento digital de imagens</i>	110
5.2.5	<i>Quanto aos resultados do ensaio ABS</i>	111
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – TABELA COMPARATIVA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	118
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO A SER APLICADO PARA COLETA DE DADOS SOBRE OS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	120
	APÊNDICE C – DADOS PARA ALIMENTAÇÃO DO IPAS2	126
	APÊNDICE D – PERDA DE AGREGADO POR RÉPLICA	127
	APÊNDICE E – IMAGENS DA ÁREA EXSUDADA POR RÉPLICA	129
	ANEXO A – AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE EXSUDAÇÃO	134
	ANEXO B – PERFORMANCE-GRADED CHIP SEAL EMULSION SPECIFICATIONS	135

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018) divulgou em seu boletim estatístico que aproximadamente 1.364.511 km (78,07%) das rodovias do Brasil são não pavimentadas. O cenário no estado do Ceará é semelhante à média nacional, com 79,53% (42.886,9 km) da sua malha rodoviária não pavimentada (CNT, 2017). A falta de vias de acesso adequadas pode ocasionar inúmeros problemas à população, tais como: a falta de suprimentos de necessidade básica, por dificuldade de abastecimento de cargas essenciais; entrave econômico, já que o transporte de carga e de passageiros deixaria de ser um setor gerador de renda e de emprego; e diminuição da qualidade de vida, não provendo a infraestrutura necessária à mobilidade.

Uma solução para a ampliação da malha pavimentada brasileira poderia ser o emprego mais racional de revestimentos econômicos, como o tratamento superficial por penetração, em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVTs), com volume de tráfego inferior a 700 veículos/dia (DER-CE, 2015). Adotou-se a nomenclatura Tratamento Superficial por Penetração (TSP) para o tipo de revestimento esbelto construído pela aplicação sucessiva de ligante e agregado, seguida de compactação (LARSEN, 1985). Além do seu caráter econômico, o TSP é considerado uma técnica de fácil aplicação, com rápida execução e liberação da pista (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Países como a Austrália, a Nova Zelândia, a França e os Estados Unidos (EUA), que apresentam uma malha rodoviária mais extensa e desenvolvida, aplicam o TSP mais comumente para a manutenção preventiva e corretiva de pavimentos de rodovias de médio e alto volume de tráfego (LEE; KIM, 2008). Em tais países, há diversos questionamentos quanto à correta aplicação do TSP, pois devido à sua simplicidade é comum ocorrerem erros de dosagem ou de execução que podem ocasionar danos ao revestimento. Alguns estudos realizados investigaram aspectos diversos, como: (a) quais os impactos de materiais finos e de ligantes modificados na interação ligante - agregado quando empregados em “*chip seals*”¹ (ADAMS, 2014), (b) qual a importância da dosagem para o desempenho do revestimento (LEE; KIM, 2008), (c) qual a influência da etapa de compactação no desempenho final dos TSPs (LEE, 2008), dentre outros.

¹*Chip seal*: nomenclatura utilizada para TSPs na Nova Zelândia e em alguns locais dos EUA.

Ao analisar a literatura existente, percebe-se que a principal abordagem para a avaliação de desempenho de TSPs é a ocorrência de defeitos. Apesar de pouco explorado no Brasil, sabe-se que a exsudação e a perda de agregado são os defeitos mais recorrentes nesse tipo de revestimento. A perda de agregado, mecanismo em que os agregados se soltam do revestimento com a passagem do tráfego, já foi estudada por alguns pesquisadores brasileiros com o auxílio do *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) e de um simulador de pequeno porte (LOIOLA, 2009; PEREIRA, 2013). Referente à exsudação, defeito em que o ligante aflora na superfície do revestimento, não foram encontrados documentos técnico científicos num contexto nacional.

A perda de agregado pode ocorrer devido ao excesso de agregado na dosagem, ou a uma escolha equivocada da granulometria (grãos muito grandes), ou por problemas construtivos (compactação), ou até mesmo por falta de adesividade do conjunto ligante-agregado (LEE; KIM, 2009; GÜRER *et al.*, 2012; AKTAŞ *et al.*, 2013; MORAES; BAHIA, 2013; ADAMS *et al.*, 2017). Já a exsudação pode ser consequência de um excesso de emulsão na etapa de dosagem, ou de problemas construtivos (tempo de cura), ou da escolha equivocada da granulometria (grãos muito pequenos), etc (LEE; KIM, 2009; KODIPPILY *et al.*, 2014; CHATURABONG; HANZ; BAHIA, 2016).

Alguns autores ainda teorizam que a distribuição granulométrica dos grãos é um fator determinante para a ocorrência de ambos os defeitos, já que a “mistura” desse tipo de revestimento é feita em campo (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005; MCLEOD, 1969 *apud* LEE; KIM, 2009; SEPI ENGINEERING & CONSTRUCTION INC, 2015). Acredita-se que uma graduação uniforme dos grãos seja a mais apropriada para o serviço de TSPs, pois os agregados apresentariam poucos grãos maiores, com tendência a desagregação, assim como poucos agregados menores que apresentam risco de exsudação. A fim de aliar esses conceitos Lee e Kim (2009) criaram um coeficiente de uniformidade específico para os tratamentos superficiais simples chamado de *Performance-Based Uniformity Coefficient* (PUC).

Nesse sentido, tornou-se necessário avaliar as especificações de serviço vigentes quanto à dosagem e ao método construtivo dos TSPs. Além disso, neste trabalho foram investigados métodos de ensaios voltados para a avaliação do desempenho de tratamentos superficiais, com base na ocorrência da perda de agregado e da exsudação. Buscou-se, ainda, identificar como algumas variáveis (temperatura de aplicação da emulsão, a temperatura de cura e a uniformidade dos grãos) podem influenciar no desempenho dos TSPs.

1.2. Justificativa e problema de pesquisa

Dados divulgados pelo DER-CE (2014) indicam que o tratamento superficial por penetração é o principal revestimento empregado na malha rodoviária pavimentada no estado do Ceará, representando 61% do total. Em contraponto, notou-se por pesquisas mais recentes (LOIOLA, 2009; PEREIRA, 2010, 2013; SILVA, 2016) que os estudos voltados para TSPs no Brasil são escassos, faltam métodos de dosagem específicos e as normas vigentes encontram-se desatualizadas. Avaliando o contexto internacional, percebe-se que mesmo em países que apresentam pesquisas mais consistentes nessa temática há divergências referentes ao melhor processo de dosagem, ao método construtivo, entre outros aspectos.

A construção mais racional do TSP e a utilização de uma dosagem adequada poderiam gerar melhor economia e aproveitamento dos materiais naturais, bem como viabilizar o emprego de materiais alternativos em substituição parcial ao agregado natural, o que diminuiria o passivo ambiental advindo desse serviço. Tal cenário mostra a relevância do tema para o estado da arte nacional e para a ampliação e a melhoria da malha rodoviária brasileira, necessitando, portanto, de maior atenção por parte dos órgãos rodoviários e do meio científico.

Isso posto, entende-se como problema motivador do presente estudo a falta de métodos de ensaios voltados para a avaliação da qualidade dos TSPs no Brasil, assim como a inexistência de um método de dosagem específico, que não dependa exclusivamente da experiência do construtor.

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar a dosagem dos tratamentos superficiais por penetração com base na ocorrência dos seus dois defeitos principais: a perda de agregados e a exsudação. Para isso, definiram-se cinco objetivos específicos:

- a) Avaliar as lacunas dos processos de dosagem propostos nas normas brasileiras e a sua abordagem para a ocorrência de defeitos;
- b) Analisar diferentes métodos de determinação da perda de agregado de TSPs em laboratório adaptado ao contexto brasileiro;
- c) Propor um método preliminar de avaliação da exsudação de TSPs em laboratório adaptado ao contexto brasileiro;

- d) Verificar a influência do PUC (*Performance-Based Uniformity Coefficient*) dos agregados na exsudação e na perda de agregado;
- e) Identificar qual a influência da temperatura da emulsão, da temperatura e do tempo de cura na adesividade entre o ligante e o agregado, assim como na ocorrência da perda de agregado.

1.4. Organização do trabalho

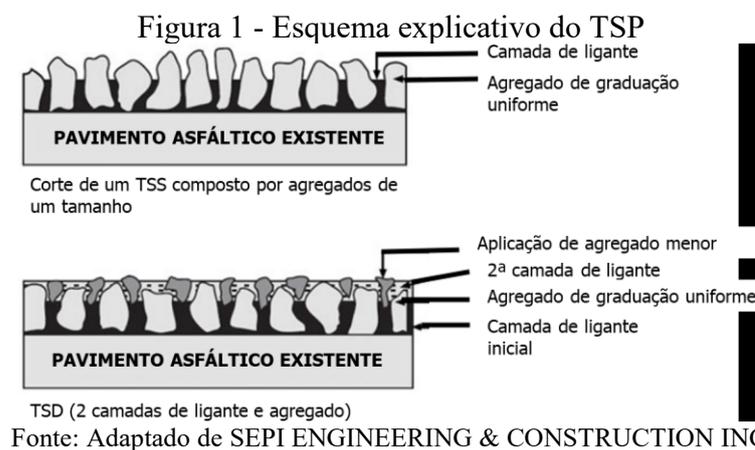
O trabalho foi dividido em quatro capítulos: (i) Capítulo 1, no qual foi apresentada uma contextualização da temática, o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo; (ii) Capítulo 2, que relata a revisão bibliográfica realizada, com a apresentação de estudos de outros autores pertinentes para a realização da presente pesquisa. O foco da revisão foi nos defeitos mais comuns em TSPs, nos fatores que influenciam o seu desempenho e em ensaios voltados para essa avaliação; (iii) Capítulo 3, com a descrição dos materiais e métodos escolhidos para se atingir os objetivos delineados; (iv) Capítulo 4, no qual foram apresentados e analisados os resultados; e (v) Capítulo 5, no qual constam as principais conclusões do estudo e algumas sugestões para pesquisas futuras. Por fim, as referências bibliográficas, os apêndices e os anexos estão apresentados no final deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações gerais sobre os tratamentos superficiais por penetração

A família dos tratamentos superficiais é composta por vários tipos de revestimentos asfálticos delgados, cujo emprego está associado à intervenção necessária, ao tráfego a ser atendido e aos recursos financeiros e materiais disponíveis. É comum no meio técnico, denominar apenas de “tratamento superficial” o tratamento superficial por penetração, gerando confusão a respeito de qual técnica está sendo referida. No Apêndice A pode ser observada uma tabela explicativa sobre os diversos tipos de tratamentos superficiais, com detalhes sobre o método construtivo, os materiais necessários e as normas e especificações brasileiras correspondentes.

No Brasil, o Tratamento Superficial por Penetração (TSP) é um revestimento delgado (com espessura média de 5 a 20 mm), construído pelo espalhamento sucessivo de emulsão asfáltica e de agregado, seguido de compactação (LARSEN, 1985) (FIGURA 1). Tal técnica é considerada uma alternativa eficiente e econômica para o revestimento de RBVTs, mas devido a sua pequena espessura, o TSP não possui função estrutural, nem pode corrigir defeitos construtivos transversais e longitudinais.



As principais funções do TSP são: proporcionar uma camada de rolamento com alta resistência ao desgaste; impermeabilizar as subcamadas do pavimento; conferir alta flexibilidade, a fim de acompanhar as deformações significativas da estrutura; aumentar a aderência pneu-pavimento e, por consequência, o nível de segurança da via e ser empregado como primeira camada de revestimentos para vias de tráfego mais leve.

A classificação dos TSPs é realizada de acordo com a quantidade de camadas de ligante e de agregado aplicadas. O processo de espalhamento de ligante e agregado pode ocorrer de forma simples, uma única vez, ou de forma múltipla, duas ou três vezes. O Tratamento Superficial Simples (TSS) é construído com a aplicação de uma camada de ligante sobre a base imprimada ou um revestimento antigo devidamente tratado, seguida de uma camada de agregado e por fim é feita a compactação. No TSS, a penetração da emulsão no agregado é exclusivamente invertida, pois ocorre de baixo para cima.

O Tratamento Superficial Duplo (TSD) tem como 1ª etapa o mesmo processo do TSS, mas após a 1ª compactação, realiza-se uma segunda aplicação de ligante, em seguida uma segunda aplicação de agregado de menor granulometria e por fim uma segunda compactação. Nesse caso ocorre tanto a penetração invertida quanto a direta, pois o ligante entra em contato por cima e por baixo. No Tratamento Superficial Triplo (TST), repete-se todo o processo do TSD acrescentando mais uma camada de ligante e agregado de menor granulometria, seguido de compactação.

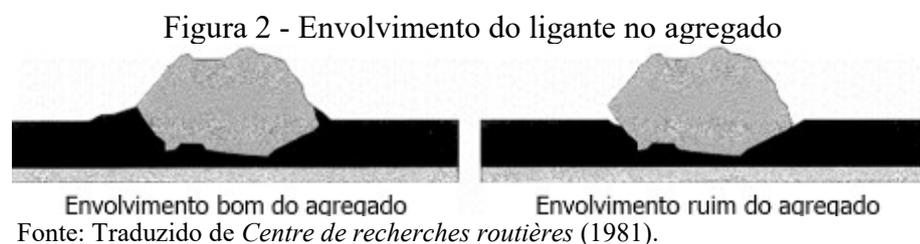
2.2. Fatores que influenciam o desempenho dos tratamentos superficiais por penetração

O TSP tradicional é composto de emulsão asfáltica e agregado mineral, podendo em alguns casos utilizar emulsões asfálticas modificadas a fim de aumentar a sua durabilidade e utilizar agregados alternativos, considerando uma concepção de pavimento mais econômica e ambientalmente viável. As principais funções do ligante asfáltico são de impermeabilizar as camadas inferiores do pavimento e de conferir adesão dos agregados à base. Já o agregado tem o papel de conferir resistência e estabilidade mecânica ao revestimento, resistindo às ações abrasivas do tráfego e transmitindo os esforços para as camadas inferiores do pavimento e para a construção de um TSP (LARSEN, 1985).

De acordo com Lee e Kim (2008) existem propriedades intrínsecas ao agregado que afetam a adesão do TSP, como porosidade, área de superfície, capacidade de absorção, mineralogia e textura da superfície. Já para o ligante é importante se observar o tipo utilizado, o tempo de cura e o tempo de ruptura que também tem grande influência.

Além das características individuais de cada elemento, nos EUA alguns órgãos reguladores exigem um certificado de compatibilidade entre o agregado e a emulsão antes da construção de TSPs (SEPI ENGINEERING & CONSTRUCTION INC., 2015). A

compatibilidade, ou a afinidade, entre ligante e agregado é verificada por alguns fatores, como o envolvimento do ligante no agregado (FIGURA 2) e a sua capacidade de permanecer coeso na presença de água (CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES, 1981).



Dessa forma, alguns aspectos que influenciam o desempenho dos TSPs vêm sendo estudados a fim de compreender melhor os mecanismos de ocorrência dos defeitos, como a granulometria e a forma do agregado, a adesividade entre ligante e agregado, a reologia do ligante, o método construtivo e o método de dosagem. Alguns desses aspectos serão abordados nos subitens que se seguem para posterior compreensão sobre os defeitos em TSPs.

2.2.1. *Granulometria*

Num contexto ideal, os agregados mais adequados para a aplicação em TSPs devem ter as dimensões as mais semelhantes possíveis, pois o processo construtivo é realizado em campo e não é possível garantir uma homogeneidade do revestimento em caso de agregados de tamanhos diferentes. Os agregados menores podem ser “afogados” no ligante aplicado e os agregados maiores poderiam se soltar facilmente do revestimento devido a camada fina de ligante (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005).

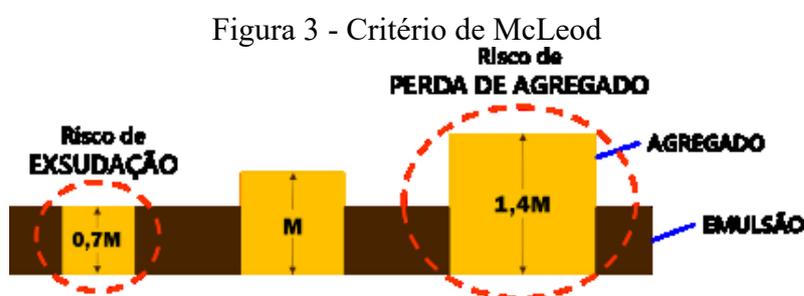
A importância da uniformidade dos agregados é tanta que se definiu no estado da Carolina do Norte/USA um parâmetro teórico chamado de PUC, o coeficiente de uniformidade baseado no desempenho, do inglês *Performance-Based Uniformity Coefficient* (PUC). Tal coeficiente pode ser considerado um indicativo da qualidade do agregado para emprego em TSPs por meio da análise da curva granulométrica. Teoricamente, o risco de falha pelo excesso de ligante ou perda de agregado seria minimizado caso a graduação dos agregados fosse escolhida adequadamente. Esse conceito, desenvolvido por Lee e Kim (2009), foi introduzido no meio científico nacional por Silva (2016) que verificou a sua relação com a perda de agregado.

O PUC une o critério de falha de McLeod (FIGURA 3) e o coeficiente de uniformidade (CU) utilizado para solos. O CU quantifica a uniformidade como função dos diâmetros correspondentes a 60% e a 10% do material passante (EQUAÇÃO 1).

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Sendo:

- D_{60} é o diâmetro correspondente a 60% do material passante;
- D_{10} é o diâmetro correspondente a 10% do material passante.



Fonte: Adaptado Lee e Kim (2009).

De acordo com McLeod, a quantidade correta de emulsão deve envolver cada partícula de agregado e também deve cobrir certa porcentagem no *chip seal* como um todo. Para agregados de graduação uniforme, as partículas com menos de 50% da sua superfície recobertas com emulsão são bastante suscetíveis ao desprendimento pelo tráfego. Esta pesquisa utiliza os critérios de McLeod como ferramenta de avaliação de desempenho. [...] se o tráfego é moderado, ou seja, 1.000 a 2.000 veículos/dia, a emulsão deve preencher cerca de 70% dos vazios entre as partículas de agregado do *chip seal* para alcançar um bom desempenho. O agregado de graduação uniforme tem uma porcentagem mais alta de partículas que são menores do que 70% do tamanho mediano de partícula, H ; isto gera exsudação. Partículas maiores do que o dobro de $0,7 \times H$ causam perda de agregado [...]. (MCLEOD, 1969 *apud* LEE; KIM, 2009, p. 53-54, tradução nossa) ².

Com base nos conceitos apresentados a porcentagem de excesso de ligante e de perda de agregado pode ser calculada pelas Equações (2) e (3), respectivamente. Equacionou-se o PUC como sendo função de duas variáveis, como pode ser observado na Equação (4).

²According to McLeod, the correct amount of emulsion should embed each aggregate particle in the residue of the emulsion to a certain percentage of the chip seal depth. For graded aggregate, the particles that are embedded less than 50% into the residue of the emulsion are likely to be dislodged by traffic. [...] if traffic is moderate with 1,000 to 2,000 vehicles per day, the optimal residue of emulsion should fill about 70% of the voids between the chip seal aggregate particles to achieve good performance. The more graded aggregate has a higher percentage of aggregate particles that are smaller than 70% of the median particle size, M ; this causes bleeding. Particles larger than twice $0.7 \times M$ cause aggregate loss [...].

$$\text{Excesso de ligante (\%)} = P_{EM} \quad (2)$$

$$\text{Perda de agregado (\%)} = 100 - P_{2EM} \quad (3)$$

$$\text{PUC} = \frac{P_{EM}}{P_{2EM}} \quad (4)$$

Sendo:

- M é o diâmetro correspondente a 50% do material que passa retirado diretamente da curva granulométrica do agregado. A mediana da curva granulométrica;
- P_{EM} é numericamente o percentual que passa, retirado da curva granulométrica do agregado, correspondente ao diâmetro $0,7 \times M$. Representa a quantidade de agregado com tamanho muito menor que o da mediana e apresenta riscos de exsudação;
- P_{2EM} é o percentual que passa, retirado da curva granulométrica do agregado, correspondente ao diâmetro $1,4 \times M$. Representa a quantidade de agregado com tamanho muito maior que o da mediana e que apresenta riscos de se soltar do revestimento.

O PUC calculado na Equação (4) avalia o desempenho do TSS, entretanto é frequente o emprego de revestimentos de múltiplas camadas ou até mesmo uma sobreposição de grãos em TSS. Logo, observa-se que os dados obtidos nas Equações (2) e (3) acima não são exatamente os mesmos em casos de TSPs múltiplos, cuja influência da granulometria ainda precisa ser investigada.

Lee e Kim (2009) calcularam o PUC para três agregados com a mesma mediana, porém com diferentes granulometrias como pode ser visualizado na Figura 4 e cujos parâmetros foram listados na Tabela 1. Foi utilizado um simulador de tráfego *Third-Scale Model Mobile Loading Simulator* (MMLS3) para a avaliação do desempenho do TSP, um simulador de carga móvel 3D que simula carregamentos de tráfego de campo (FIGURA 5). Concluiu-se pela perda de agregados obtida, que quanto menor o PUC, mais adequado para aplicação em serviços de TSP é o agregado e que o PUC pode ser um excelente parâmetro a ser usado durante a fase de concepção do revestimento (LEE; KIM, 2009).

Tabela 1 - Exemplos dos resultados da PUC

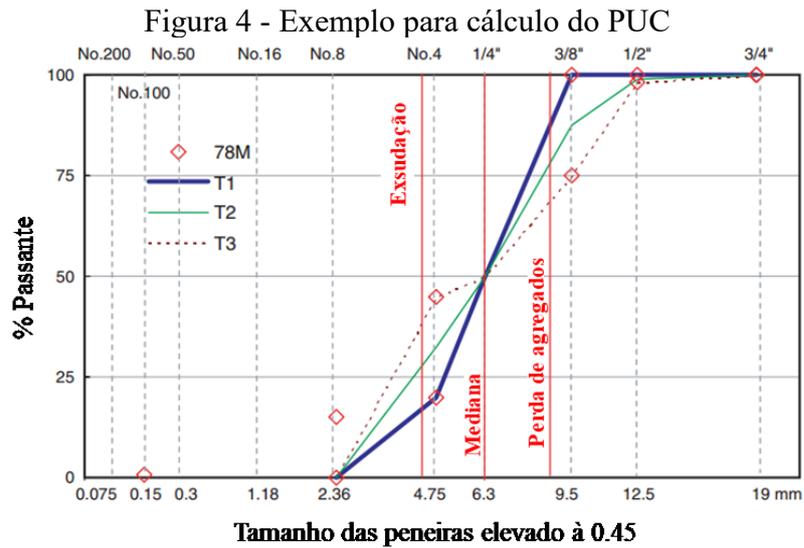
Parâmetros	T1	T2	T3
D ₆₀ (mm)	6,9	7,2	7,6
D ₁₀ (mm)	1,6	2,6	2,9
CU	4,34	2,77	2,62

continua

conclusão

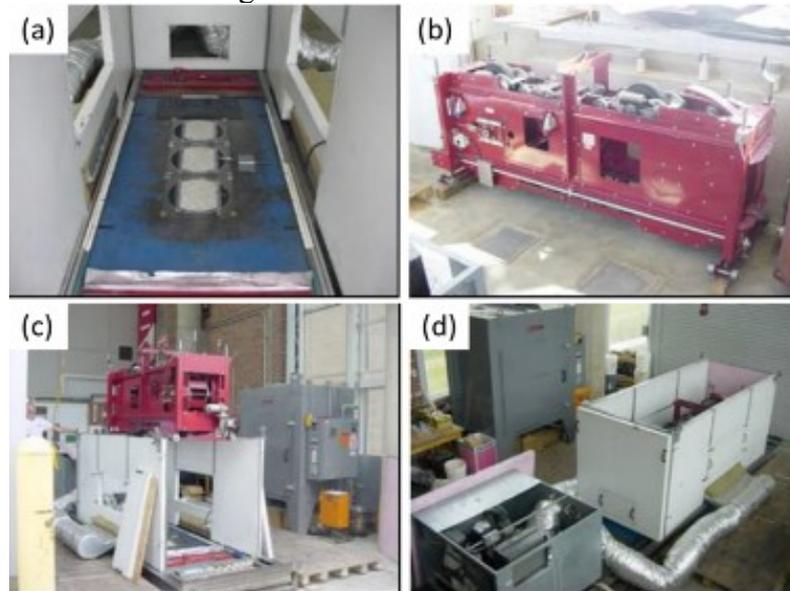
Parâmetros	T1	T2	T3
P_{EM} (%)	17,2	27,9	38,6
P_{2EM} (%)	89,4	79,5	69,7
PUC	0,19	0,35	0,55
Perda de agregado no MMLS3 (%)	4	7,1	9,3

Fonte: Lee e Kim (2009).



Fonte: Lee e Kim (2009).

Figura 5 - Simulador MMLS3



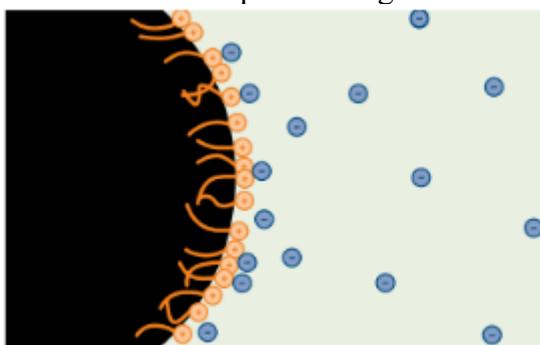
Fonte: Lee (2007).

(a) Amostras posicionadas na base metálica; (b) Vista lateral; (c) Posicionamento do MMLS3 na câmara de temperatura controlada; (d) Sistema completo para a realização dos ensaios.

2.2.2. Adesividade

A adesividade é uma propriedade que depende de aspectos físicos e químicos do ligante e do agregado. Assim, além de proporcionar uma camada impermeável, o requisito mais importante de um ligante asfáltico é o de agir como um “adesivo”, colando as partículas do agregado, unindo-os na nova superfície e à camada inferior (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005). Para que esse processo ocorra, o ligante deve envolver as partículas do agregado, sendo preferível ligantes mais fluidos como as emulsões asfálticas (FIGURA 6).

Figura 6 - Partícula de asfalto dispersa em água numa emulsão catiônica



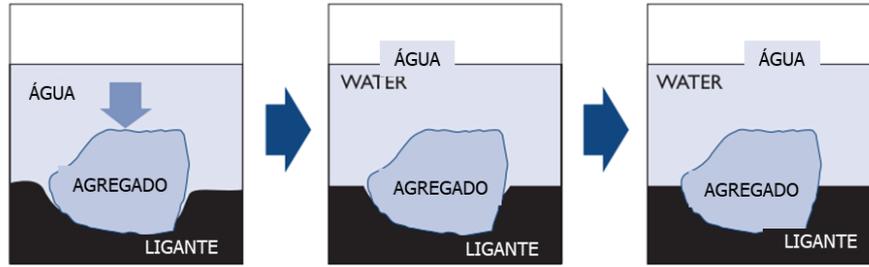
Fonte: Transit NZ, RCA, Roothing NZ (2005).

Além da viscosidade do ligante, acredita-se que a presença de água enfraquece a ligação entre a emulsão e o agregado, devendo ser um aspecto a ser considerado na seleção dos materiais. Em locais de alta pluviosidade, recomenda-se fortemente a utilização de melhoradores de adesividade na emulsão asfáltica empregada em TSPs. Na Figura 7, observa-se a tendência das partículas de agregado se soltarem do revestimento quando não há algum agente adesivo mais forte presente.

Outro fator que afeta a ligação emulsão-agregado é a sujeira ou poeira superficial das partículas de agregado. Percebe-se que o filme de ligante pode ser diretamente afetado pela presença de pó na superfície e ocasionar fragilidade, devendo-se ser criterioso com a viscosidade do ligante para evitar defeitos no revestimento (FIGURA 8) (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005).

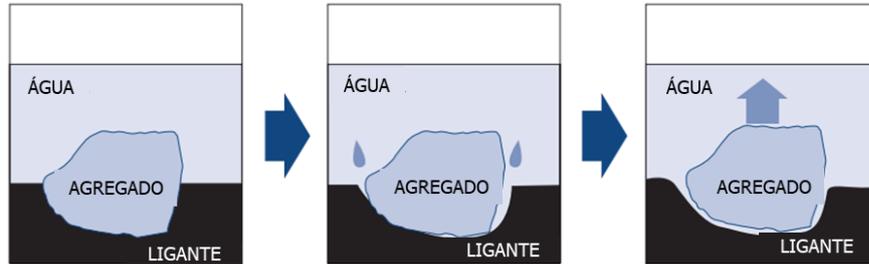
Figura 7 - Alguns fatores que afetam a adesividade agregado-ligante

a) Adesão ativa



O agente de adesão no ligante desloca a água da superfície do agregado, permitindo o envolvimento completo na sua superfície de contato.

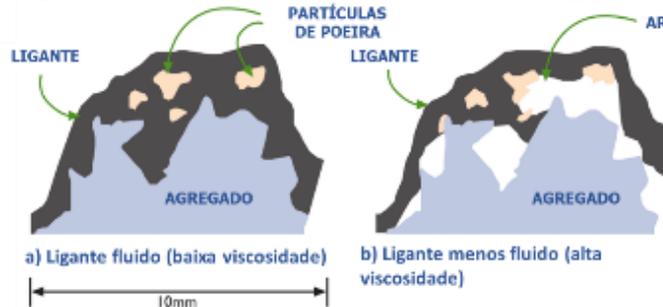
b) Descolamento pela ação da água



A água enfraquece aos poucos a ligação do agregado com a emulsão começando pelas bordas, até que a partícula se solte totalmente e provoque perda de agregado.

Fonte: Traduzido de Transit NZ, RCA, Roding NZ (2005).

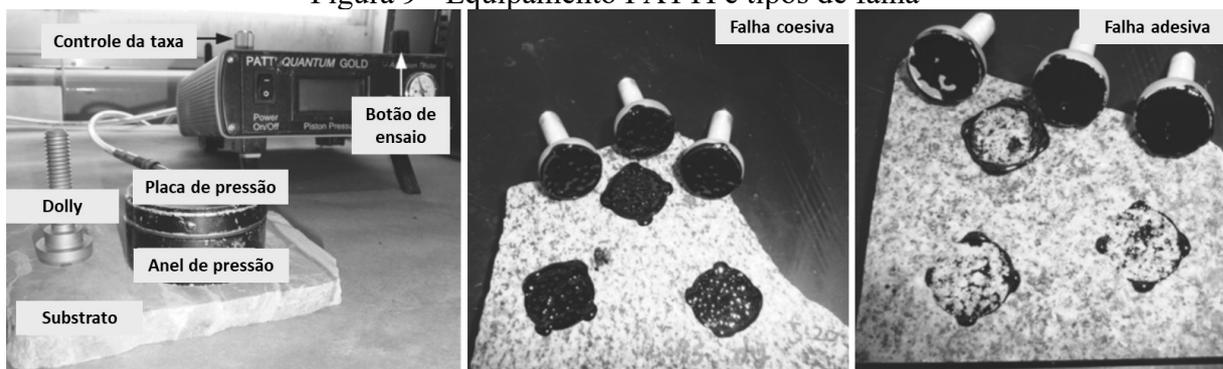
Figura 8 - Efeito da sujeira superficial em agregados



Fonte: Traduzido de Transit NZ, RCA, Roding NZ (2005).

Atualmente o ensaio mais utilizado para avaliação da adesividade de CAPs e de emulsões asfálticas é o preconizado pela AASHTO TP 91-11 *Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test* (AASHTO, 2013), pelo qual se obtém a *pull-off tensile strength* (POTS, traduzida como tensão de arrancamento) e o tipo de falha, coesiva ou adesiva. Na Figura 9 podem ser observados o equipamento recomendado pela AASHTO TP 91 e os possíveis tipos de falha.

Figura 9 - Equipamento PATTI e tipos de falha



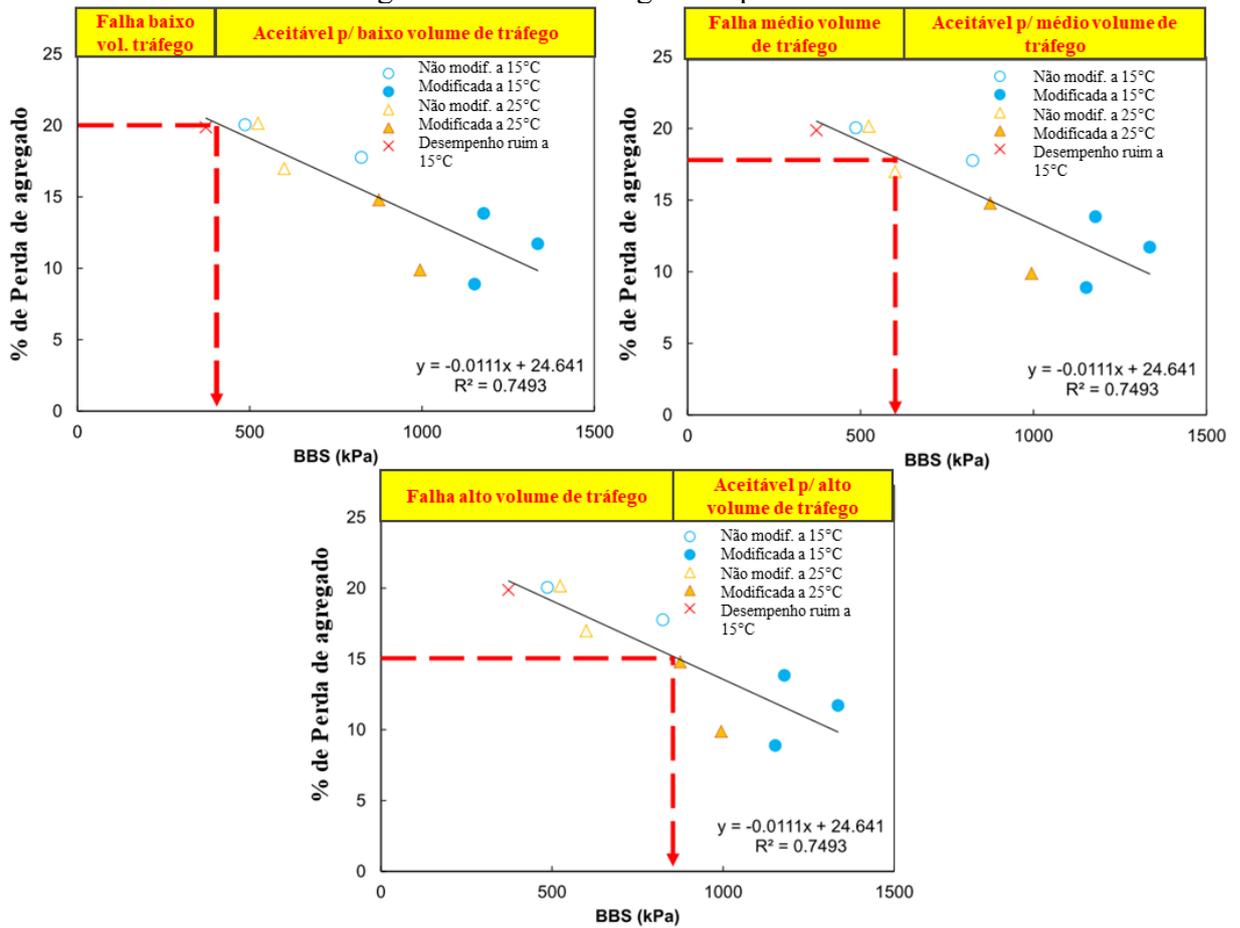
Fonte: Traduzido de AASHTO TP 91 (2013).

Já existem estudos avaliando a adesividade em diferentes condições de cura e umidade para verificar a sua resistência à perda de agregado em TSPs (ILIAS, 2015), assim como verificando a influência do tipo de emulsão e do tempo de cura da emulsão na evolução da adesividade (IM, 2013). Adams (2014) propôs ainda critérios mínimos de aceitação de BBS para aplicação em TSPs a depender do volume de tráfego a ser considerado, como ilustrado na Figura 10. O autor considerou para rodovias de baixo volume de tráfego o limite aceitável de 20% de perda de agregado, para médio volume 17,5% e para alto volume 15%. No estudo realizado a perda de agregado foi medida com o *Vialit test* e com o MMLS3, que serão descritos na seção 2.3.1 Perda de agregado.

Além de estudos envolvendo TSPs, a adesividade vem sendo amplamente estudada como propriedade que influencia o desempenho de misturas asfálticas. Nesse contexto, diversos autores avaliaram a diminuição da força de arrancamento sob a presença de água (ZHANG *et al.*, 2015; CHATURABONG; BAHIA, 2016), observando uma diminuição considerável na interação entre os elementos ligante e agregado. Em contraponto a esses estudos, Aguiar-Moya *et al.* (2016) obtiveram amostras com maior força de arrancamento quando em condições úmidas, levantando o questionamento sobre a presença de água ser o único fator que influencia na adesividade, assim como a preparação das amostras recomendadas pela AASHTO TP 91.

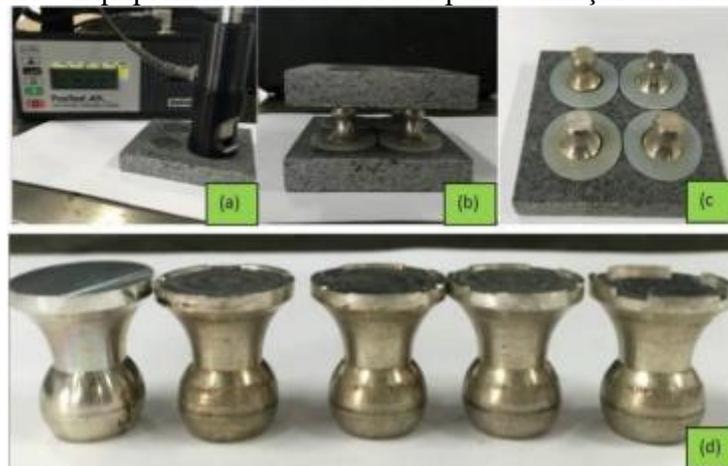
Yan *et al.* (2016) observaram que a adesividade apresenta melhora significativa em materiais fresados (RAP) quando comparados aos agregados virgens. Mais recentemente, Huang e Lv (2017) identificaram que um aumento da espessura do filme de ligante na realização do ensaio provoca uma diminuição na força de arrancamento. Na Figura 11 pode ser observada a modificação realizada nas ranhuras nos *dollies* do ensaio para variar a espessura do filme de ligante.

Figura 10 - Limites sugeridos por Adams



Fonte: Adams (2014).

Figura 11 - Equipamento Positest AT-A para avaliação da adesividade



Fonte: Huang e Lv (2017).

Além da interação mecânica entre ligante e agregado, entende-se como importante fator promoção da adesividade a composição química dos elementos. Os agregados podem ser divididos em dois tipos, os básicos (ou hidrofílicos), compostos principalmente por CaCO_3 e os

ácidos (ou hidrofóbicos), compostos principalmente por SiO₂. Sabe-se que agregados básicos em geral apresentam uma melhor adesividade com o ligante asfáltico que os agregados ácidos. Uma possível explicação para esse fato é o CaCO₃ reagir quimicamente com o ligante, ou seja, os elétrons de Ca²⁺ migram para o grupo funcional ativo do ligante resultando numa nova ligação química. Já os agregados ácidos dependem principalmente de uma interação física para promover essa união (YIN *et al.*, 2017).

2.2.3. Dosagem

Sabe-se que a dosagem adequada dos materiais é um dos fatores mais importantes para o bom desempenho de um revestimento. Para os tratamentos superficiais não é diferente, no entanto, são escassas as metodologias de dosagem sem abordagem puramente empírica. Os órgãos reguladores nacionais e estaduais pouco exploram a dosagem de TSPs, indicando apenas taxas fixas sem levar em consideração as diferentes origens dos agregados, o emprego de materiais alternativos, possíveis modificações no ligante, etc.

Um dos métodos mais conhecidos é o método da caixa dosadora que utiliza uma caixa de dimensões 80×25×4 cm, na qual os agregados são colocados no fundo da caixa disposta horizontalmente. Propõe-se que os agregados sejam colocados de forma semelhante ao desejado em campo, com poucos vazios. Na sequência, a caixa é posicionada na vertical, fazendo-se a leitura direta a partir da graduação da tampa da caixa e obtém-se a taxa de agregado em L/m² a ser utilizada (LARSEN, 1985).

O método da bandeja (FIGURA 12) é muito difundido e segue uma filosofia semelhante ao da caixa dosadora, no qual o agregado é disposto uniformemente sobre o fundo de uma bandeja de área 50×50 cm. Ao colocar o agregado, busca-se preencher todos os vazios, evitando a sua sobreposição, de forma que o fundo da bandeja seja totalmente recoberto.

O DER-CE denomina esse método como o da “bandeja de fundo vermelho”, no qual o fundo desta é pintado para facilitar a identificação dos vazios e preenchê-los. Depois de realizada essa etapa, pesa-se a bandeja com o agregado e a diferença de peso para a bandeja vazia fornece a quantidade de agregado necessário por metro quadrado em massa. Converte-se a taxa em massa para a taxa em volume pela massa específica solta utilizando uma caixa de madeira de 30×30×20 cm.

Figura 12 - Exemplo do método da bandeja



Fonte: elaborada pela autora.

Após a identificação da taxa efetiva em volume, encontra-se a taxa de agregado a ser aplicada, pela Equação (5), cuja taxa é majorada em 5%. Obtém-se a taxa de agregado em volume de cada camada e somam-se os dois valores para obtenção da taxa de ligante total correspondente.

Calcula-se então o teor de CAP a ser aplicado em l/m² pela Equação (6), que é considerada a mesma para TSS e TSD pelas especificações de serviço DERT-ES-P 10/00 e 11/00, respectivamente. A utilização dessa equação não é justificada na norma, o que leva a crer que foi determinada empiricamente por técnicos do órgão. Quando se opta pela utilização de uma emulsão asfáltica do tipo RR-2C, considera-se o teor de CAP como 67% da composição do ligante e que devido a sua viscosidade o seu aproveitamento é 10% superior ao do CAP, assim encontra-se o teor de emulsão pela Equação (7). Para cada tipo de emulsão deve ser feita uma avaliação da sua composição a fim de identificar o teor de CAP para a dosagem.

$$T_{ag\text{aplicada}} = 1,05 \times T_{ag\text{efetiva}} \quad (5)$$

$$T_{CAP} = T_{ag}/12 \quad (6)$$

$$T_{RR-2C} \text{ (total)} = \frac{0,9 \times T_{ag}}{0,67 \times 12} = 0,112 \times (T_{ag\text{aplicada } 3/4} + T_{ag\text{aplicada } 3/8}) \quad (7)$$

Após a obtenção do total de ligante necessário, será feita a separação para cada camada. A especificação para TSD recomenda destinar 40% do total para a primeira camada de emulsão (EQUAÇÃO 8) e, dos 60% restantes, serão destinados 0,5 L/m² para o banho diluído e o que sobrar será o aplicado na segunda camada de emulsão (EQUAÇÃO 9). Assim

como a determinação do teor de CAP, acredita-se que os percentuais foram obtidos empiricamente pelos técnicos do órgão.

$$T_{RR-2C}(1^a \text{ camada}) = 40\% \times T_{RR-2C}(\text{total}) \quad (8)$$

$$T_{RR-2C}(2^a \text{ camada}) = 60\% \times T_{RR-2C}(\text{total}) - 0,5 \quad (9)$$

A especificação do DNIT vigente não apresenta método específico, e sim indica que as taxas de agregado e de ligante devem ser definidas em projeto e apresenta um quadro de taxas em geral (TABELA 2). Uma diferença significativa em relação à especificação do DER-CE é que não há recomendação de aplicação do banho diluído após a finalização da segunda camada. Apesar de ser uma etapa opcional, o banho diluído é essencial para o desempenho satisfatório de TSPs, pois aumenta consideravelmente a coesão superficial e funciona como um selante, já que a matriz pétreia desse tipo de revestimento é mais aberta que a de misturas asfálticas.

Tabela 2 - Taxas de ligante e agregado recomendadas pelo DNIT

Normas	Camadas	Ligante (L/m ²)	Agregado (kg/m ²)
DNIT 146/2012 Tratamento superficial simples - Especificação de serviço	1 ^a	0,8 a 1,2	8 a 12
DNER-ES 391/99 Tratamento superficial simples com asfalto polímero	1 ^a	0,8 a 1,2	8 a 12
DNIT 147/2012 Tratamento superficial duplo - Especificação de serviço	1 ^a	1,2 a 1,8	20 a 25
	2 ^a	0,8 a 1,2	10 a 12
DNER-ES 392/99 Tratamento superficial duplo com asfalto polímero	1 ^a	1,20 a 1,8	20 a 25
	2 ^a	0,8 a 1,2	10 a 12
DNIT 148/2012 Tratamento superficial triplo - Especificação de serviço	1 ^a	1,00 a 1,5	20 a 25
	2 ^a	0,6 a 0,9	10 a 12
	3 ^a	0,4 a 0,6	5 a 7
DNER-ES 393/99 Tratamento superficial triplo com asfalto polímero	1 ^a	1,00 a 1,5	20 a 25
	2 ^a	0,6 a 0,9	10 a 12
	3 ^a	0,4 a 0,6	5 a 7

Fonte: DNIT (1999, 2012).

Nota-se ainda que algumas especificações do DNIT, apesar de atualizadas no ano de 2012, apresentam recomendações de taxas semelhantes às normas antigas, indicando que não houve estudos mais recentes para reavaliação dessas quantidades levando em consideração diferentes tipos de materiais, como agregados alternativos e emulsões modificadas. Além da

dosagem, outra lacuna existente nas normas federais é a não inclusão de conceitos básicos, como a questão da uniformidade abordada anteriormente.

Para Chaturabong (2014), a taxa de aplicação do agregado é função da forma, da graduação e do peso específico, enquanto que a taxa de aplicação da emulsão depende do volume de tráfego, da graduação, da absorção e da forma do agregado, da condição do pavimento existente e do percentual de CAP na emulsão.

Adams (2014) propôs um método de dosagem de TSS, utilizando como critérios de desempenho principais a perda de agregado e o excesso de emulsão (exsudação). Primeiramente, realizou-se o ensaio da bandeja modificado, semelhante ao modelo apresentado anteriormente na Figura 8, mas com reduções nas suas dimensões, para determinação da taxa de aplicação de agregado. Em seguida, fez-se o ensaio de densidade nos agregados (ASTM C127-15 e C128-15). Para determinar a taxa de emulsão foi feita uma análise do perfil obtido no ensaio da bandeja modificado utilizando processamento digital de imagens com um *scanner* a laser. O volume total do revestimento foi obtido pela análise a laser e o volume de agregado foi obtido no ensaio anterior pela relação entre massa e densidade. A partir dessas duas variáveis foi possível se obter o volume de vazios. Então, calculou-se o volume de emulsão necessário. A taxa de ligante final foi obtida pela soma: do volume de emulsão pelos vazios, do volume absorvido pelo agregado e do volume absorvido pela própria base do revestimento.

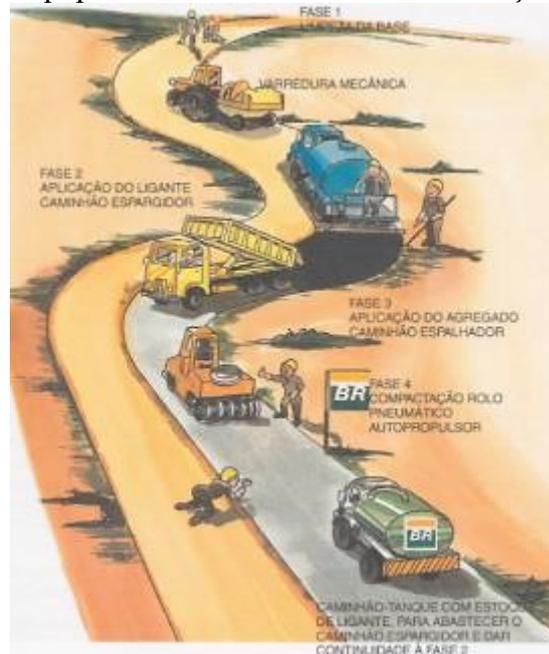
2.2.4. Construção

Os principais equipamentos para a execução de um TSP são o caminhão espargidor de ligante, o distribuidor de agregado e o compactador. Para auxiliar, ainda são necessárias vassouras que têm como função remover o pó superficial e o excesso de agregados ao final do processo. Ao se optar pela construção com os equipamentos convencionais é necessária uma logística adequada ao serviço, impedindo que ocorram grandes intervalos de tempo entre as etapas de espalhamento da emulsão, do agregado e compactação. A coordenação desses equipamentos entre si é essencial para evitar a ruptura precoce da emulsão, pois o atraso entre as etapas pode gerar falhas no revestimento, retrabalho e desperdício de material (FIGURA 13).

Uma alternativa aos equipamentos convencionais citados é o multidistribuidor (FIGURA 14), que unifica a aplicação da emulsão e do agregado em um único veículo. A sua principal vantagem é a garantia de que a distribuição do agregado ocorrerá imediatamente após

o espalhamento da emulsão, impedindo que a ruptura ocorra antes do processo de compactação ser finalizado.

Figura 13 - Equipamentos coordenados na construção de um TSS



Fonte: BR Distribuidora (2015).

Figura 14 - Equipamento multidistribuidor



Fonte: Romanelli (2015)³.

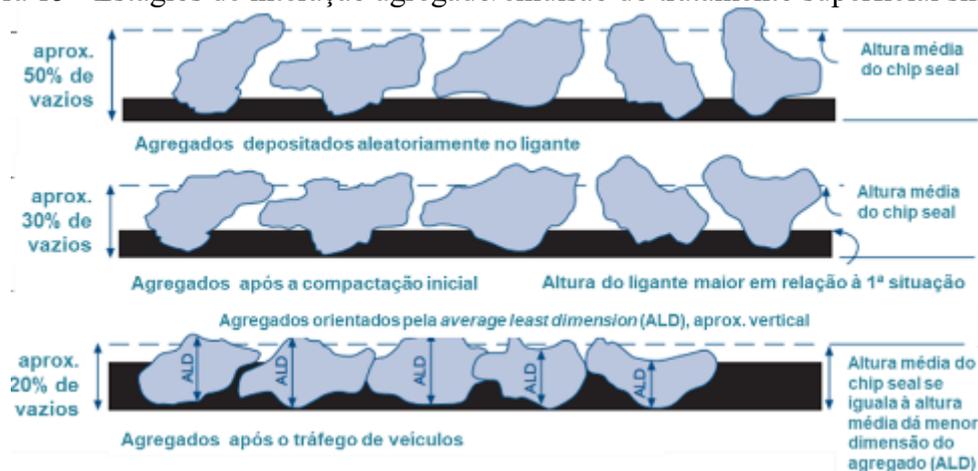
2.2.4.1. *Influência do processo de compactação em TSPs*

A etapa de compactação é fundamental para a construção adequada de qualquer revestimento, mas para os TSPs ela tem papel ainda mais importante. Além de redistribuir os

³ Disponível em: <<http://www.romanelli.com.br/pt/equipamento/multi-distribuidores-de-agregado/mdr-7-9>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

agregados, a compactação promove o envolvimento da emulsão por todo o agregado devido à ação mecânica imposta à estrutura. Após a realização de diversos testes, a Transit NZ, RCA, Roothing NZ (2005) considera o volume de vazios presentes no TSP de aproximadamente 50% em seu estado solto, depois da compactação passa a ser 30% e após a ação do tráfego resulta em 20% (FIGURA 15).

Figura 15 - Estágios de interação agregado/emulsão do tratamento superficial simples



Fonte: Adaptado de Transit NZ, RCA, Roothing NZ (2005).

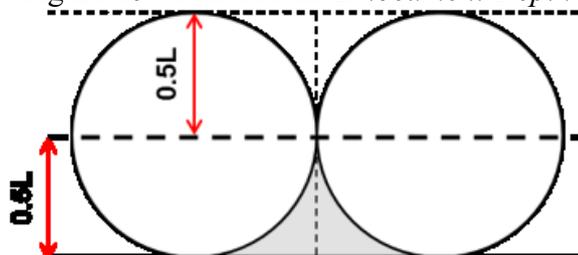
Lee (2008) avaliou o impacto do tipo de rolo, do peso do compactador, do tempo de rolagem e do número de passadas no desempenho do revestimento. As amostras utilizadas no seu programa experimental foram produzidas em campo, dispendo placas de madeira longitudinalmente na pista.

Em seguida, calculou-se o *Embedment Depth* (ED) de cada amostra e realizaram-se ensaios de desempenho para a verificação do impacto da compactação. O ED é um conceito não difundido no Brasil, mas em linhas gerais é definido como a altura de ligante dividida pela altura média dos agregados (FIGURA 16). A maioria das especificações americanas exigem a verificação do ED após a construção e após a cura inicial da emulsão. Em locais de clima frio, é requerido um ED de 70%, enquanto em locais mais quentes aceitam-se valores entre 50% e 60%. Revestimentos com ED muito elevados tendem a apresentar problemas de exsudação, enquanto os com ED muito baixo apresentam riscos de perda de agregado precoce (LEE, 2008).

A partir dos resultados de perda de agregado obtidos, o autor concluiu que os rolos pneumáticos e combinado são as melhores opções para a compactação de um TSS. Os resultados do rolo de aço apresentaram maior percentual de perda de agregado, não sendo os

mais apropriados. Uma das causas poderia ser a elevada rigidez do tambor que não se adequa à geometria e ao relevo do pavimento e gera uma compactação desigual ao longo da pista.

Figura 16 - Conceito de *Embedment Depth*



Fonte: Apresentação do Prof. Richard Kim realizada em 2012 na Reunião da ABPv.

O número de passadas do rolo também exerce importante papel no desempenho do revestimento. O *North Carolina Department of Transportation* (NCDOT), por exemplo, não especifica um número de passadas exato, ficando a critério do executor de cada obra. Já na Nova Zelândia, recomenda-se pelo menos cinco passadas nas camadas em velocidades de aproximadamente 8 km/h (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005).

Lee (2008) também avaliou a perda de agregado obtida ao variar o número de passadas do rolo (uma, três e cinco) e aconselhou-se, pelos resultados obtidos, um mínimo de 3 passadas do rolo para garantir desempenho satisfatório. Em caso de TSD e TST, o número de passadas por camada também pode ser fator determinante para a diminuição da perda de agregado. O autor identificou que em TSDs uma passada na camada inferior aumenta a retenção de agregado em comparação com o caso em que essa etapa não é executada. Para TSTs não se notou grandes variações na retenção de agregado quando se compactava ou não a primeira camada, indicando que essa etapa poderia ser suprimida a fim de tornar o serviço mais rápido e econômico.

2.3. Defeitos em tratamentos superficiais

A perda de agregados (*aggregate loss/raveling*) e a exsudação (*bleeding*) são os dois defeitos mais críticos em TSPs, e quando não sanados são a origem de diversos outros problemas, como peneadura, panelas, trincamentos, entre outros (LEE; KIM, 2008). A ocorrência desses fenômenos não é considerada um defeito do pavimento quanto ocorre dentro de certos limites, e sim um processo natural do revestimento. Cada órgão e cada país definem seus próprios limites de aceitação, o *Centre de Recherches Routières* (CRR, 1981), por exemplo

que considera aceitável uma perda de agregado de 5 a 10% em seus revestimentos. Já a exsudação não tem seus limites de ocorrência tão bem definidos quanto a perda de agregado, devendo ser avaliada caso a caso. O problema se dá quando a perda de agregado e a exsudação ocorrem em excesso, comprometendo a funcionalidade do revestimento e a segurança dos usuários. As origens desses defeitos são diversas (CRR, 1981) e serão abordadas com mais detalhes nas seções posteriores.

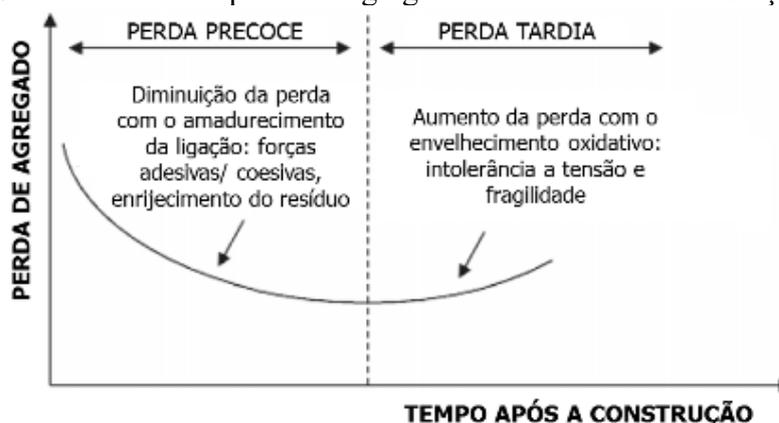
2.3.1. Perda de agregado

Adams (2014) relata que a maior perda de agregados pode ocorrer logo durante a passagem inicial do tráfego e as suas principais causas podem estar associadas a diferentes fatores: tempo chuvoso, taxa excessiva de agregados, controle de tráfego inadequado durante a construção, quantidade de ligante inadequada para recobrir o agregado, características inadequadas do agregado (agregados sujos, por exemplo, com presença de finos), emprego de materiais inadequados, etc. As características intrínsecas dos agregados (granulometria, forma, absorção, etc.) desempenham um papel importante para se evitar tais defeitos.

Além da perda de agregado precoce, verifica-se que há evolução da perda de agregado durante toda a vida do pavimento. Uma hipótese levantada é de que a perda precoce ocorre principalmente porque a ligação entre a emulsão e o agregado ainda não é suficientemente forte para impedir que isso ocorra, mas essa ligação se fortalece e diminui com o passar do tempo. No entanto, a perda de agregado tardia também pode acontecer devido ao envelhecimento oxidativo que confere menor flexibilidade ao revestimento, tornando-o menos tolerante às deformações. Essa perda tardia, ao contrário da precoce, tende a aumentar com o passar do tempo, pois o revestimento se torna mais rígido (MORAES; BAHIA, 2013). Na Figura 17, pode-se observar como esse processo acontece.

Moraes e Bahia (2013) propuseram um método de avaliação da perda de agregado durante a vida de serviço do TSP, correlacionando os resultados de ABS com a perda de agregado identificada pelo *Sweep test* em diferentes tempos de cura. A correlação entre os resultados do ABS e dos parâmetros reológicos (G^* e δ) foi obtida. Um fortalecimento da ligação coesiva e um aumento da rigidez da emulsão podem resultar numa diminuição da taxa de perda de agregado precoce. No entanto, a força dessa ligação e a rigidez isoladas não foram suficientes para caracterizar a perda de agregado tardia.

Figura 17 - Ocorrência de perda de agregado durante a vida de serviço de TSPs



Fonte: Traduzido de Moraes e Bahia (2013).

Um estudo realizado por Hanz, Johannes e Bahia (2012) teve como objetivo desenvolver um procedimento de ensaio voltado para as propriedades da emulsão, avaliando o seu desempenho durante a vida de serviço e considerando os efeitos de tráfego, de clima e de envelhecimento. Os autores realizaram diversos ensaios, porém identificou-se como os mais adequados aos climas mais quentes o MSCR, para verificar a resistência à exsudação, e o ABS, a fim de identificar a resistência a perda de agregado através da adesividade ou coesão, cujos detalhes já foram abordados na seção 2.2.

Foram testadas seis emulsões diferentes, as mais comumente empregadas no estado do Wisconsin, sendo o primeiro grupo catiônico, com uma emulsão não modificada, outra modificada com polímero e outra modificada com látex. O segundo grupo apresentou a mesma conformação, no entanto com emulsões aniônicas. Além disso, foi testado também o ligante base, antes da emulsificação, a fim de verificar os efeitos desse processo. Os resultados indicaram que a metodologia proposta poderia caracterizar o desempenho do material e diferenciar os tipos de emulsão, bem como os tipos de modificadores. No entanto, recomendou-se uma pesquisa mais detalhada para estabelecer a relação entre o que foi medido em laboratório na emulsão e o que é obtido em campo para o revestimento como um todo.

No Brasil, Loiola (2009) comparou o desgaste obtido em campo com o obtido em amostras de laboratório. O ensaio WTAT é simplificadaamente um ensaio de desgaste, usado comumente para dosagem de MRAF que avalia a abrasão úmida de misturas, especificada na ABNT NBR 14746/2001. Nos estudos feitos por Loiola (2009) e Pereira (2010, 2013), adaptou-se a utilização do ensaio com corpos de prova em formato circular, de aproximadamente 22 cm para verificação da abrasão/desgaste do revestimento do tipo TSP.

Pereira (2013) considerou que o WTAT é um equipamento acessível e de baixo custo que pode auxiliar na avaliação preliminar dos TSPs em laboratório. Entretanto, o autor ressalta que o ensaio de WTAT pode ser mais severo para avaliar o desempenho real dos TSPs, pois devido à granulometria do agregado o procedimento provoca o arrancamento agressivo dos agregados e não uma abrasão superficial. O autor sugeriu que revestimentos com menos de 20% de perda de agregado, obtido no equipamento WTAT, seriam considerados satisfatórios do ponto de vista construtivo, semelhante aos valores recomendados pelo manual de boas práticas do NCDOT (SEPI ENGINEERING & CONSTRUCTION INC., 2015), mostrando a coerência no valor adotado. Em alguns órgãos americanos mais rigorosos esse valor cai para 10%, devendo ainda ser melhor avaliado.

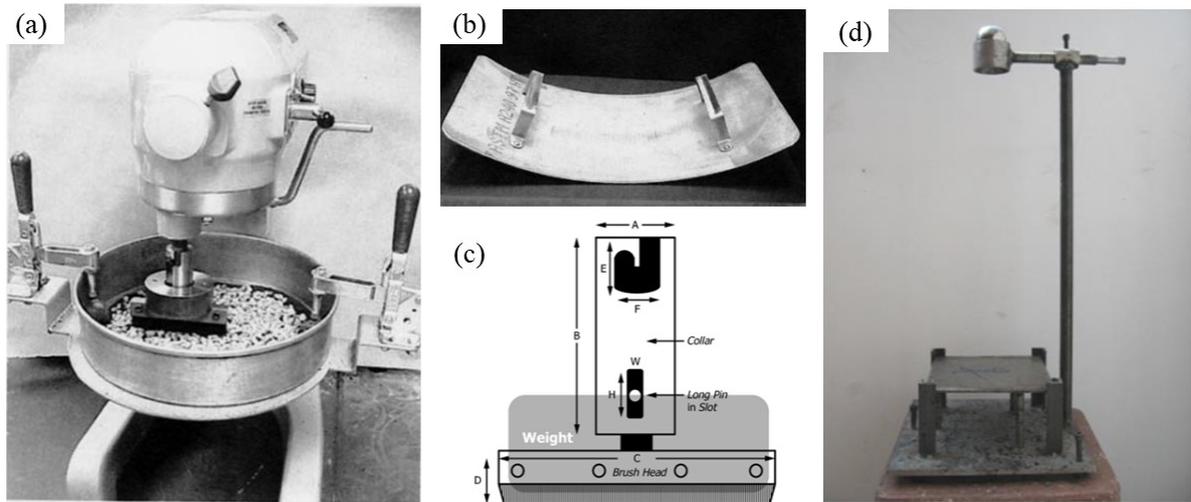
Em pesquisas realizadas pela *North Carolina State University* (NCSU) são empregados diversos ensaios, como o *Flip-Over test* (FOT) ou *Sweep test*, o *Vialit test* e o *Third-Scale Model Mobile Loading Simulator* (MMLS3), para a avaliação do desempenho de TSPs. Os dois primeiros visam avaliar a perda de agregado precoce, logo após a compactação e liberação do tráfego, pois se entende que é o período em que a sua ocorrência é maior. O MMLS3 é um simulador de carga móvel 3D que simula carregamentos de tráfego de campo, geralmente utilizado para simular as cargas provenientes do tráfego inicial.

O *Flip-Over test* é especificado na ASTM D7000: *Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples*. Nesse ensaio, posiciona-se a amostra a 90° da superfície e em seguida varre-se a superfície com uma escova ou um pincel de cerdas macias para simular a retirada do excesso de agregado que é feita em campo (FIGURA 18a, 18b e 18c). Após esse processo, pesa-se a amostra e obtém-se a quantidade de agregado em excesso que foi aplicada.

O *Vialit test* (FIGURA 18d) é um ensaio de adesão em que a amostra é curada a 35°C por 24 horas na estufa após a realização de um FOT como o descrito acima para retirada do agregado em excesso. Em seguida, posiciona-se a amostra a 180° da superfície com a face virada para baixo e 50 cm acima da placa base. Para que o ensaio seja válido, uma esfera de metal de 500±5 g deve cair do repouso três vezes num intervalo de 10 segundos em cima da placa. Após esse processo a amostra é novamente pesada para verificação da perda de agregado.

Esses ensaios já foram aplicados por Lee (2008) para verificação do processo de compactação, por Lee e Kim (2008) para compreensão dos efeitos das taxas de emulsão e de agregado no desempenho do revestimento e por Adams (2014) para o desenvolvimento de um método de dosagem específico para TSPs.

Figura 18 - Equipamentos para realização do *Sweep test* e do *Vialit test*



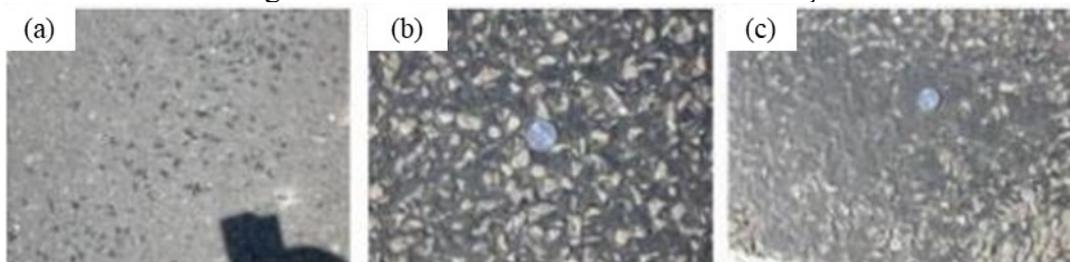
Fonte: ASTM D7000 (2011) e Adams (2014).

(a) *Sweep test*; (b) Compactador manual; (c) Escova utilizada no *Sweep test*; (d) *Vialit test*.

2.3.2. Exsudação

São conhecidos três principais mecanismos de exsudação, o afloramento do ligante para a parte superior do revestimento, o afundamento dos agregados na base em que foi aplicada, provocando excesso de ligante no topo, e a perda de agregado excessiva, deixando alguns pontos do revestimento com pouco agregado e muito ligante (CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES, 1981). A exsudação pode ocorrer em diversas severidades e em casos mais graves pode comprometer a segurança da via (FIGURA 19).

Figura 19 - Níveis de severidades da exsudação

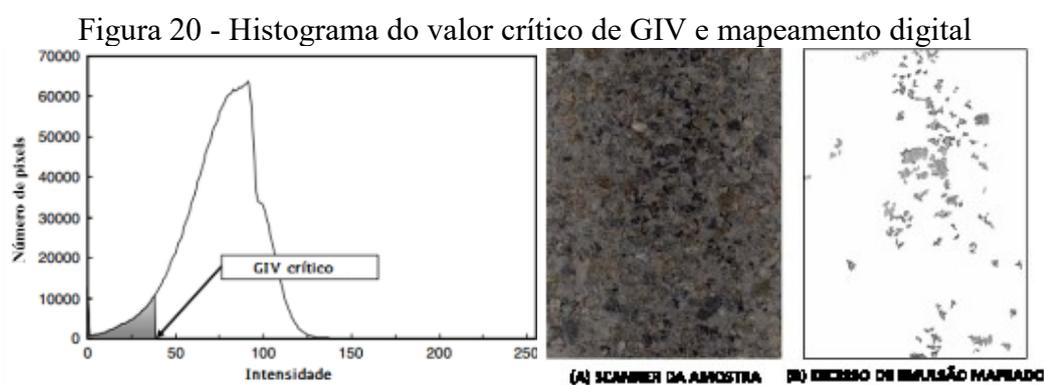


Fonte: Kodippily (2013).

(a) Leve exsudação; (b) Média exsudação; (c) Grave exsudação.

Até pouco tempo atrás, acreditava-se que a ocorrência da exsudação acontecia principalmente devido às dosagens realizadas erroneamente, cujas taxas de ligante eram excessivas. De fato, uma dosagem adequada pode evitar esse tipo de defeito, mas não completamente, gerando a necessidade de investigar outros fatores.

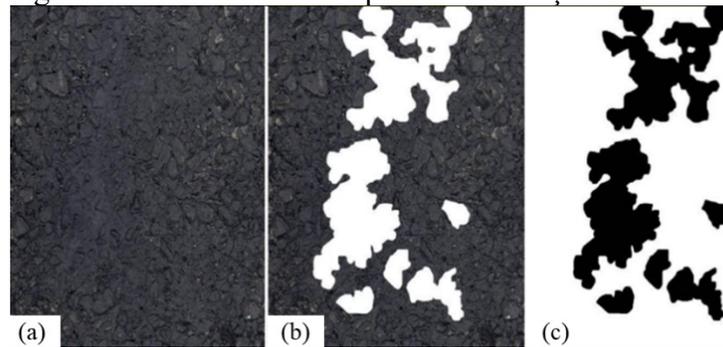
Voltado para a avaliação da exsudação, Lee e Kim (2008) utilizaram um *scanner* de 8-bit em escala de cinza que fornecia uma imagem pixelizada e codificada em valores de 0 a 225 de acordo com o tom de cinza observado para comparar o estado da amostra antes e depois do carregamento de três horas num simulador. Para a análise digital das imagens, utilizou-se o *Software National Instruments Vision Assistant* (NIVA) 7.0, no qual era gerado um histograma referente à intensidade da cor, e fornecia os chamados *Grayscale Intensity Values* (GIVs). A partir disso, identificava-se um valor crítico de GIV para indicar o limite aceitável de excesso de ligante num tratamento superficial (FIGURA 20).



O principal problema observado com essa metodologia era que o *scanner* identificava além da cor, a textura das amostras, podendo confundir sombreamento e texturas mais rugosas com excesso de ligante. A identificação de áreas exsudadas era altamente afetada pelos reflexos de luz no momento do ensaio. Para superar esse problema, o autor decidiu analisar as amostras por partículas e calibrou-se o ensaio de duas formas: (i) para identificar a área com excesso de ligante utilizou-se o *scanner* em uma amostra com poucas áreas de excesso, a fim de encontrar um GIV mínimo associado e (ii) para as áreas sem excesso de ligante utilizou-se o *scanner* em uma amostra com muitas áreas de excesso, observando então o caso crítico.

Já Adams (2014) fez o processamento através do *Software Matlab*, no qual se identificaram as áreas pretas (exsudadas, com excesso de emulsão) e comparou-se com a área total da amostra. A proporção entre a área preta e a área branca gerou um percentual de exsudação na amostra (FIGURA 21).

Figura 21 - Método de PDI para identificação da exsudação



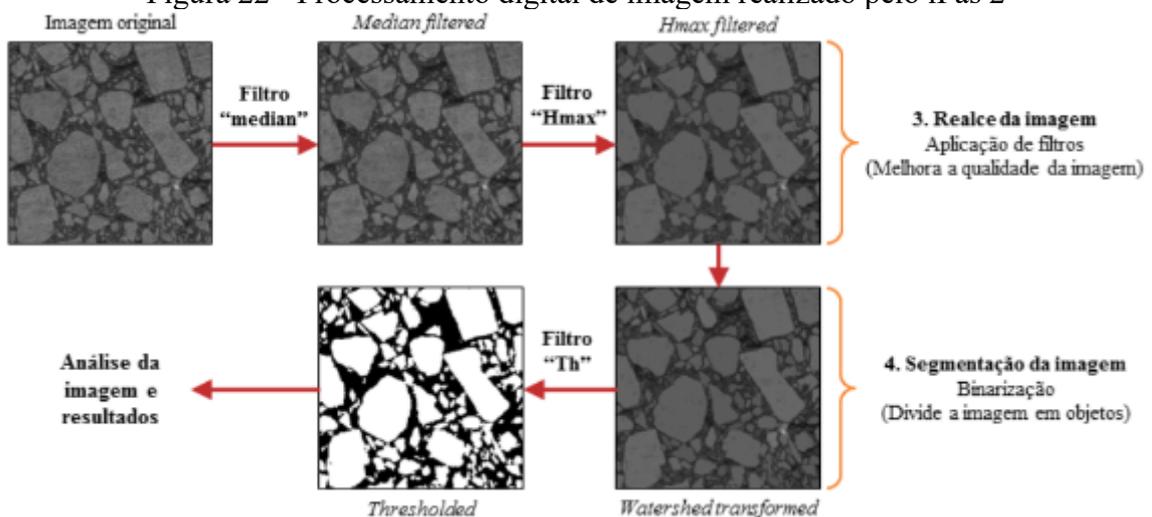
Fonte: Adams (2014).

(a) Imagem original escaneada, (b) identificação da área exsudada, (c) processamento da imagem no Matlab.

Outro software sugerido para avaliação da exsudação é o *Image Processing & Analysis System 2* (iPas 2), desenvolvido pelo *Modified Asphalt Research Center* (MARC), Universidade de Wisconsin – Madison. O software vem sendo utilizado em diversas pesquisas voltadas para misturas asfálticas, inclusive nacionalmente para auxiliar na avaliação da influência da matriz pétreo e o intertravamento interno na ocorrência de deformação permanente (FERREIRA, 2017) e para avaliar a macrotextura de misturas densas (RIBAS, 2016).

Apesar do iPas2 ter sido desenvolvido para misturas asfálticas, Chaturabong (2014) adaptou o software para a avaliação de exsudação em amostras de TSP produzidas em laboratório. Mais detalhes sobre o desenvolvimento e a utilização do software podem ser consultados em Coenen *et al.* (2012) e Sefidmazgi (2011). Na Figura 22 podem ser observados os filtros aplicados na imagem do iPas2.

Figura 22 - Processamento digital de imagem realizado pelo iPas 2



Fonte: Ribas (2016).

No programa experimental realizado por Chaturabong (2014), variou-se o volume de vazios, a graduação do agregado, o tipo de emulsão e a taxa de agregado para a preparação das amostras que foram produzidas da mesma forma que a necessária para o *Sweep test*. Para a verificação da exsudação, o corpo de prova foi carregado com o auxílio do LWT modificado em diferentes condições de temperatura, tráfego, cura e ciclos. Originalmente, o LWT é um ensaio realizado para Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), portanto foram necessárias algumas adaptações no equipamento.

A modificação principal no LWT foi na base de apoio da amostra que originalmente não era suficientemente larga. Dessa forma, modificou-se a base com uma placa de aço e parafusos, colocou-se uma proteção de borracha acima da amostra para proteger o LWT, colocou-se um colchão de neoprene de 25 mm de espessura abaixo da amostra para conferir flexibilidade ao revestimento e pinças para segurar a amostra no suporte durante o ensaio (FIGURA 23). O processo de modificação pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 23 - Ensaio LWT modificado para amostras de TSP



Fonte: Chaturabong (2014).

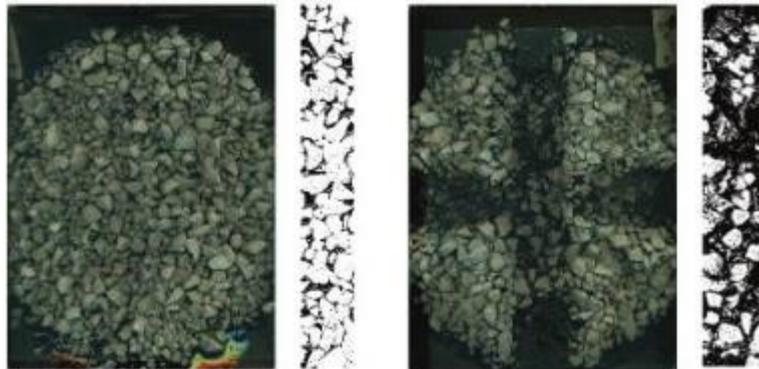
Os resultados obtidos pelo PDI podem ser visualizados na Figura 25, na qual observa-se uma grande área mais escura (exsudada) após a passagem do tráfego. Dos dados de área exsudada obtidos no ensaio, observou-se a tendência da exsudação superior em temperaturas mais elevadas (FIGURA 26), ressaltando a importância dessa análise em regiões de clima mais quente.

Figura 24 - Processo de modificação do LWT para ensaio de TSP



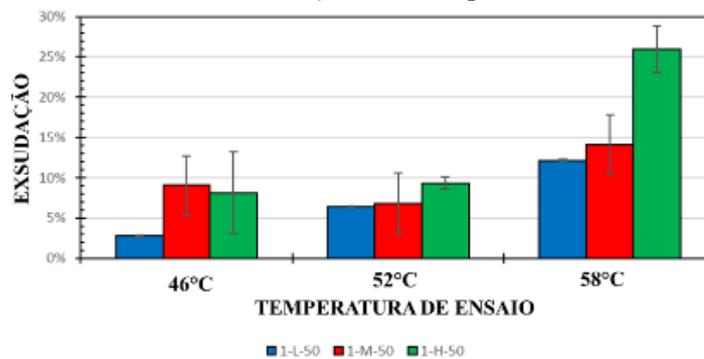
Fonte: Chaturabong (2014).

Figura 25 - Ensaio LWT modificado para identificação de exsudação em TS



Fonte: Chaturabong (2014).

Figura 26 - Resultados da exsudação de TSP para cada faixa e temperatura



Fonte: Chaturabong (2014).

Em estudos mais recentes, levantou-se a hipótese de que as propriedades reológicas do ligante empregado têm importante papel no controle desse defeito (CHATURABONG; HANZ; BAHIA, 2016), bem como da perda de agregado (MORAES; BAHIA, 2013), comentada no tópico anterior. No estudo de Chaturabong (2014), outro fator analisado foi o resíduo da emulsão asfáltica empregada, no qual realizou-se o ensaio *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) e obteve-se a compliância não recuperável para diferentes temperaturas e condições de carregamento.

Além de avaliar a relação do ABS com a perda de agregado, Hanz *et al.* (2012) analisaram as propriedades do resíduo da emulsão. Sabe-se que a exsudação ocorre em situações de altas temperaturas ou de alta sollicitação, quando o ligante é suficientemente viscoso para fluir para a superfície do tratamento superficial. Para simular esse comportamento em laboratório, o ensaio de MSCR foi selecionado e aplicado num esquema de carregamento e número de ciclos especificados pela AASHTO TP70. Mesmo sendo um ensaio empregado originalmente para avaliar a susceptibilidade do ligante à deformação permanente, foi empregado no contexto dos TSPs para a avaliação da perda de agregado tardia.

O MSCR pode ser descrito como um ensaio de aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento, daí o nome *creep and recovery*, em uma amostra de ligante. Do ensaio, retiram-se duas propriedades principais, o percentual de recuperação (R) e a compliância não-recuperável (J_{nr}). O R mede a resposta elástica do ligante e a J_{nr} pode ser compreendida como o percentual não-elástico, ou seja, o que o ligante não recupera após o carregamento e descarregamento de tensões. Além disso, ainda pode-se avaliar a sua sensibilidade à tensão e à temperatura comparando esses dois parâmetros nas diversas condições ensaiadas.

Hanz *et al.* (2012) realizaram uma análise das propriedades reológicas para diversos tipos de emulsão. Quanto à temperatura, observou-se que as emulsões aniônicas não modificada e modificada com látex apresentaram maior sensibilidade, ao contrário das modificadas com polímero que quase não apresentam mudanças. Já em relação à tensão aplicada, as emulsões não modificadas se mostraram menos sensíveis. Esse comportamento indicou que em algum momento, o estado de tensões provoca uma fragilidade na estrutura formada pelo polímero. Os modificadores não obtiveram o mesmo resultado em relação à resposta elástica, pois apenas o modificado por polímero passou no critério de norma, enquanto que o látex melhorou o desempenho do TSP, mas não o suficiente para torná-lo satisfatório.

Outra abordagem para explicar o processo de exsudação foi a da micromecânica (FIGURA 27), de como ocorriam os padrões de deformação e a distribuição dos vazios internos

nos TSPs quando submetidos a um carregamento (KODIPPILY *et al.*, 2014). Os autores extraíram amostras de campo, de 200 mm de diâmetro e de 32,4 a 55,5 mm de espessura (FIGURA 28) e utilizou tomografia computadorizada (FIGURA 29) para verificação da exsudação antes e após um carregamento. Foi identificada então a relação entre a redução do volume de vazios e a ocorrência de exsudação.

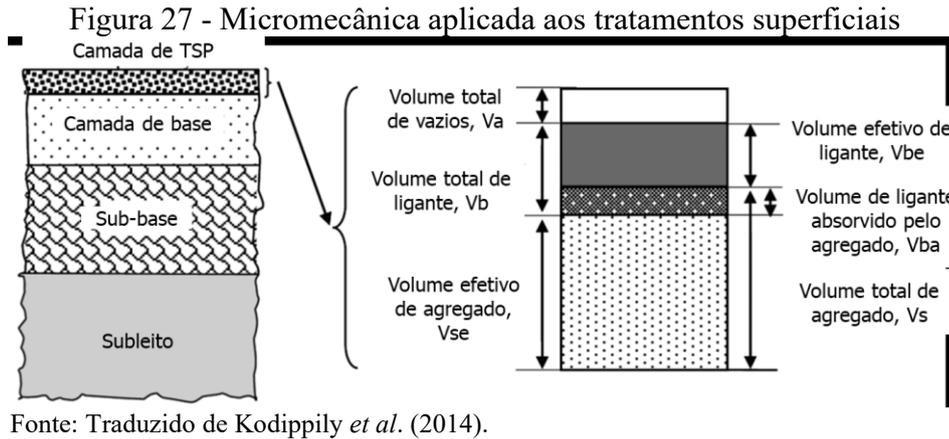
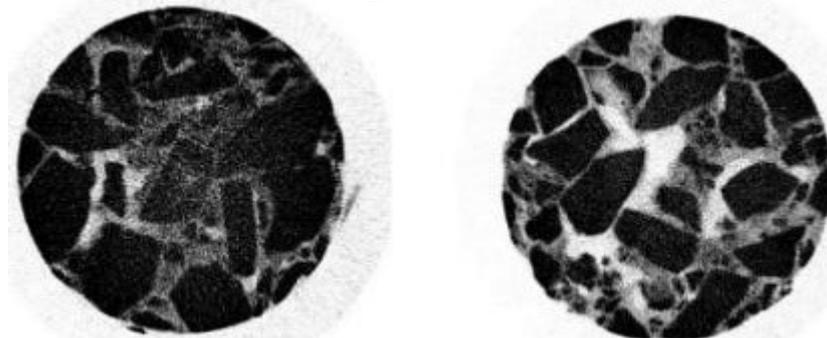


Figura 28 - Exemplo da amostra extraída em campo



Figura 29 - Tomografia de amostras de TSP



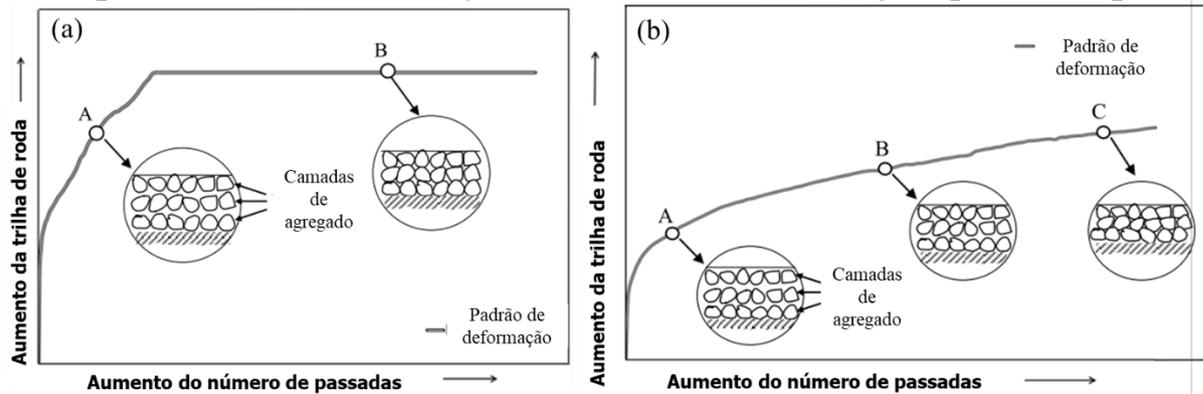
As camadas de agregado e emulsão são aplicadas separadamente em TSPs, diferente do que ocorre em misturas asfálticas, logo não é simples o controle do volume de vazios (V_v) no campo. Por não existirem normas específicas de determinação dos vazios, utilizou-se a teoria de volumetria aplicada para misturas asfálticas preconizada na *ASTM D3203: Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures* (ASTM, 2011).

Após avaliar os V_v das amostras, percebeu-se que todos estavam abaixo do recomendado pela norma de misturas neozelandesa (entre 8,5% e 10%), onde foi conduzida a pesquisa. Uma suposição foi que ao diminuir em excesso esse V_v , a emulsão não teria espaços para preencher e nem se movimentar, migrando para o topo do revestimento. Esse fato indica que uma graduação e um V_v adequados são essenciais para evitar esse tipo de defeito. A redução do volume de vazios após o carregamento foi relacionada com a ocorrência de exsudação e gerou um R^2 de 0,82, confirmando a hipótese inicial dos autores de que a redução do volume de vazios pode ser a causa de ocorrência de exsudação.

Ao fim do estudo foi possível identificar pela tomografia dois padrões de deformação, o primeiro é aquele em que após uma fase inicial de conformação dos agregados, a estrutura atinge um nível de deformação constante (FIGURA 30a). Para revestimentos que apresentam esse padrão de deformação, ao identificar presença de exsudação recomenda-se a remoção do excesso de ligante com o auxílio de um jato d'água para solucionar o problema. Acredita-se que nessas situações a exsudação não voltaria a ocorrer, pois a conformação densificada dos agregados não permitiria mais a movimentação do ligante. Existem ainda outras medidas temporárias, como colocação de areia, que deve ser recolocada periodicamente após ser removida pelo tráfego (CRR, 1981).

O outro padrão de deformação identificado foi aquele em que a evolução da deformação é contínua e crescente até o final do ensaio (FIGURA 30b). Nesse caso, em que a estrutura ainda não alcançou a sua densificação total, não existe alternativa para contornar a situação e uma reabilitação é necessária. Para melhor compreensão do fenômeno Kodippily *et al.* (2014) criaram um fluxograma de acompanhamento da exsudação que se encontra no Anexo A do presente estudo.

Figura 30 - Padrão de deformação no revestimento TSP com a passagem do tráfego



Fonte: Kodippily (2013).

2.3.3. Outros defeitos

Devido à significativa utilização do TSD em rodovias do estado do Ceará, Loiola (2009) investigou quais os principais defeitos observados em estradas com esse tipo de revestimento (FIGURA 31). O autor constatou que alguns desses defeitos poderiam ter apenas importância estética, como as discontinuidades causadas pelas juntas de construção defeituosas que se corrigidas rapidamente seriam inofensivas à estrutura do pavimento. No entanto, defeitos já evoluídos, como a panela e o desgaste da borda, deixam as camadas inferiores do pavimento desprotegidas e podem causar danos irreversíveis ao pavimento como um todo.

Figura 31 - Exemplos de defeitos em tratamentos superficiais



Fonte: Loiola (2009).

(a) Desagregação longitudinal (penteadura); (b) Desagregação do revestimento; (c) Rejeição excessiva do agregado; (d) Exsudação; (e) Desgaste do agregado; (f) Desgaste de borda; (g) Encravarmento; (h) Juntas defeituosas.

Na norma do DNIT 005/2003 – TER Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos Terminologia não são abordados alguns dos defeitos citados para TSPs, indicando

a necessidade de atualização por parte dos órgãos reguladores, como é o caso da penteadura e da perda de agregado. Além dos dois principais defeitos citados, Ilias (2015), assim como Loiola (2009), identificou vários defeitos presentes em TSPs americanos, bem como suas razões e posteriores efeitos no revestimento (TABELA 3).

Tabela 3 - Defeitos em tratamentos superficiais por penetração

Tipos de defeito	Causas	Consequências
Perda de agregado (Precoce, tardia e à baixa temperatura)	(a) Envolvimento insuficiente do agregado (b) Abertura precoce do tráfego (c) Fragilidade do resíduo da emulsão em baixas temperaturas	(a) Perda de agregado extensa (b) Danos aos para-brisas (c) Perda de resistência à derrapagem
Penteadura	(a) Devido à presença umidade	(a) Perda de agregado extensa (b) Perda de resistência à derrapagem
Exsudação	(a) Elevada taxa de emulsão (b) Envolvimento excessivo do agregado (c) Perda de agregado devido a altas temperaturas	(a) Perda de resistência à derrapagem
Trincamento	(a) Devido a baixas temperaturas (b) Reflexão das camadas inferiores	(a) Passagem de água pelas trincas (b) Diminuição da qualidade de rodagem
Deformação permanente	(a) Devido ao carregamento (tráfego)	(a) Acúmulo de água em áreas deformadas

Fonte: Traduzido de Ilias (2015).

Nessa tendência, Adams (2014) propôs uma especificação baseada no desempenho (*Performance-related specification - PRS*) incluindo o ensaio MSCR para avaliação do potencial de ocorrência de defeitos críticos à altas temperaturas como a exsudação e o ensaio de adesividade (*bond strength*) para avaliação da perda de agregado em diversas condições. Os limites sugeridos pelo autor podem ser visualizados na Tabela 4.

A inclusão do MSCR em especificações de TSPs já havia sido sugerida previamente por alguns autores como meio para avaliar a resposta elástica do ligante asfáltico (HANZ; AREGA; BAHIA; 2010; HANZ; JOHANNES; BAHIA, 2012). Os autores sugerem que os ligantes utilizados em TSPs estão submetidos à altos níveis de tensão em campo causados pelo carregamento direto do tráfego, efeito que é amplificado pela pequena espessura característica do revestimento. Bahia et al. (2001) identificou que ligantes com baixos valores de compliância não-recuperável (J_{nr}) tendiam a ser mais resistentes à ocorrência de deformação e de exsudação que os com altos valores de J_{nr} . Uma possível explicação seria de que ligantes com maior resposta elástica e menores valores de J_{nr} retornam à sua forma original mais facilmente após a

passagem do tráfego e por isso seriam menos suscetíveis à exsudação (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005).

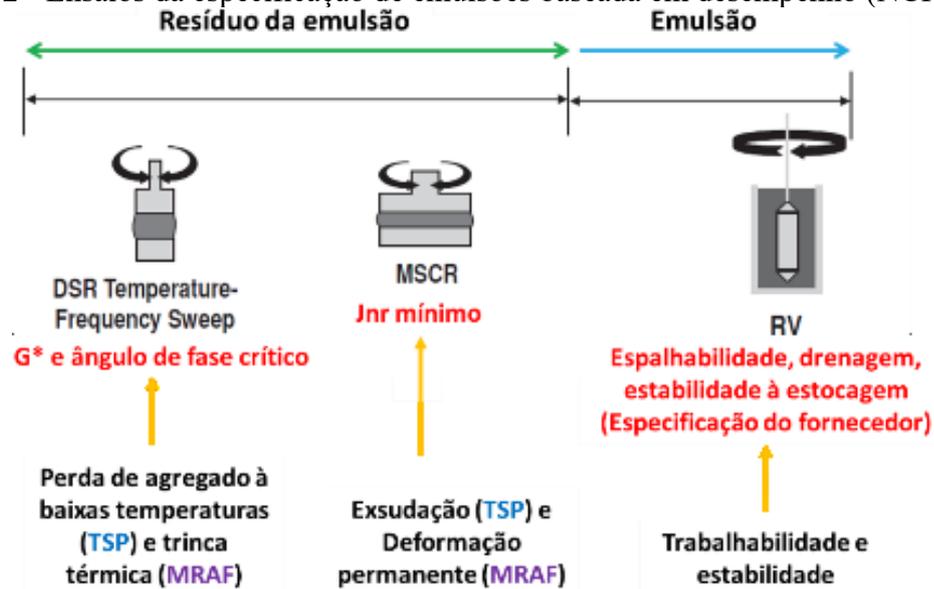
Tabela 4 - *Performance-related specification* proposta por Adams (2014)

Tipos de defeito	Faixa de temperatura	Parâmetro de performance	Nível de tráfego	Limite especificado
Exsudação	Alta	MSCR Jnr	Baixo	Máx Jnr: 8kPa ⁻¹
			Médio	Máx Jnr: 5,25kPa ⁻¹
			Alto	Máx Jnr: 3,25kPa ⁻¹
Perda de agregados tardia	Intermediária	<i>Bond strength</i>	Baixo	Mín. BBS: 400
			Médio	Mín. BBS: 600
			Alto	Mín. BBS: 800
Perda de agregados precoce	Intermediária	<i>Bond strength</i>	Baixo	Mín. BBS: 200
			Médio	Mín. BBS: 250
			Alto	Mín. BBS: 300
Perda de agregado por umidade	Intermediária	<i>Bond strength</i>	Baixo	Mín. BBS: 200
			Médio	Mín. BBS: 325
			Alto	Mín. BBS: 450

Fonte: Traduzido de Adams (2014).

A fim de garantir o bom desempenho dos TSPs, desenvolveu-se nos EUA especificações de desempenho específicas para as emulsões a serem aplicadas em TSP, lama asfáltica e MRAF (ILIAS, 2015). A especificação americana *NCHRP RESEARCH REPORT 837 Performance-Related Specifications for Emulsified Asphaltic Binders Used in Preservation Surface Treatments* (KIM *et al.*, 2017) recomenda o ensaio *DSR temperature frequency sweep* para avaliação do risco à perda de agregado em TSPs em baixas temperaturas e o ensaio MSCR foi indicado para avaliação do risco à exsudação da emulsão aplicada em TSPs, assim como o sugerido por Adams (2014) (FIGURA 32). Os limites permitidos podem ser verificados na referência original e no exemplo contido no Anexo B.

Figura 32 - Ensaio da especificação de emulsões baseada em desempenho (NCHRP 837)



Fonte: Traduzido de Kim *et al.* (2017).

2.4. Considerações finais

No capítulo 2 do presente estudo foi realizada uma revisão bibliográfica voltada para as especificidades dos tratamentos superficiais por penetração, apresentando alguns conceitos de dosagem, construção e avaliação em laboratório. O foco final da revisão foi na ocorrência dos defeitos mais críticos em TSPs, a perda de agregado e a exsudação, avaliando os principais fatores que influenciam na sua ocorrência e como é possível avaliá-los em nível de laboratório. No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos escolhidos para a execução do estudo proposto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Considerações iniciais

No presente capítulo serão apresentadas as etapas necessárias para se alcançar os objetivos traçados no Capítulo 1, evidenciando os materiais utilizados e os métodos escolhidos para o estudo. O método aplicado visou avaliar parâmetros associados à exsudação e à perda de agregado de tratamentos superficiais por penetração. Para tanto, dividiu-se o estudo em duas macro etapas, a Etapa 1 de revisão bibliográfica e de avaliação do cenário brasileiro e a Etapa 2 de realização do programa experimental.

3.2. Revisão Bibliográfica sobre Tratamentos Superficiais por Penetração - Etapa 1

A revisão bibliográfica realizada focou em dois grandes aspectos dos tratamentos superficiais por penetração. Inicialmente foram investigados os fatores que influenciam o seu desempenho, principalmente os referentes à escolha e taxa de aplicação dos materiais e ao processo construtivo. Em seguida foram abordados os dois principais defeitos dos TSPs, a perda de agregado e a exsudação, analisando seus mecanismos de ocorrência, as formas de medição em laboratório e como é possível minimizá-los a partir de um controle adequado de cada aspecto da sua concepção, desde a dosagem até o método construtivo mais adequado. Essa etapa foi relatada no capítulo 2 da presente pesquisa e deu embasamento para a elaboração de um questionário para mapeamento do cenário brasileiro quanto aos TSPs.

Diante do desconhecimento quanto às técnicas empregadas no Brasil para dosagem, construção e manutenção de TSPs, o questionário aqui sugerido foi inspirado em uma pesquisa realizada nos EUA (GRANSBERG; JAMES, 2005), na qual se aplicou um questionário para diversas unidades federativas dos EUA e de países como Canadá, Nova Zelândia, Austrália e Reino Unido, contemplando aspectos pertinentes ao serviço. A partir das respostas obtidas, os avanços nos EUA nessa temática evoluíram de forma mais coesa e houve um estreitamento da relação entre academia e órgãos rodoviários responsáveis.

O questionário sugerido e apresentado no Apêndice B foi adaptado para o contexto brasileiro e o objetivo da sua elaboração foi a criação futura de um banco de dados com diversas informações (taxas e tipos de materiais empregados, o tempo do processo de aplicação do revestimento, se há ou não técnicas de manutenção, como é realizada a compactação, etc) que

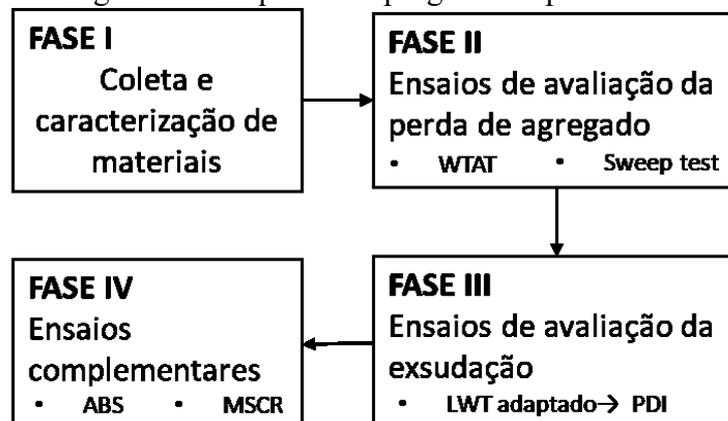
venham a ser preenchidas pelos órgãos rodoviários. A falta de resposta dos órgãos e empresas impossibilitou a inclusão das respostas ao questionário no presente estudo.

3.3. Programa experimental para avaliação dos tratamentos superficiais por penetração - Etapa 2

Após a etapa de revisão bibliográfica, foi iniciada a Fase I da etapa 2 de coleta e caracterização dos materiais. Nessa fase foram realizados ensaios de acordo com o exigido nas especificações de serviço vigentes, assim como o ensaio de fluorescência de raios-X para verificar a composição química do agregado. Depois foi implementada a Fase II de ensaios de avaliação da perda de agregados em laboratório, na qual foram realizados os ensaios *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) e *Sweep test* adaptado. Em seguida ocorreu a Fase III para avaliação da exsudação pelo ensaio *Loaded Wheel Test* (LWT) adaptado e medida com o auxílio de um PDI. Uma sub etapa importante das Fases II e III foi a de dosagem dos corpos de prova, que foi replicada para cada ensaio.

Em seguida, na Fase IV, foram realizados os ensaios de *Creep and Recovery* (MSCR) no ligante e de adesividade *Asphalt Bitumen Strength* (ABS) no conjunto ligante-agregado escolhidos, como tentativa de previsão do desempenho do revestimento. Após a finalização do programa experimental, os resultados obtidos foram compilados e analisados para obtenção de correlações e compreensão das variáveis que tinham maior influência no desempenho de TSPs. Maiores detalhes de cada uma das fases foi abordado nas seções posteriores e um esquema geral do programa experimental pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33 - Esquema do programa experimental

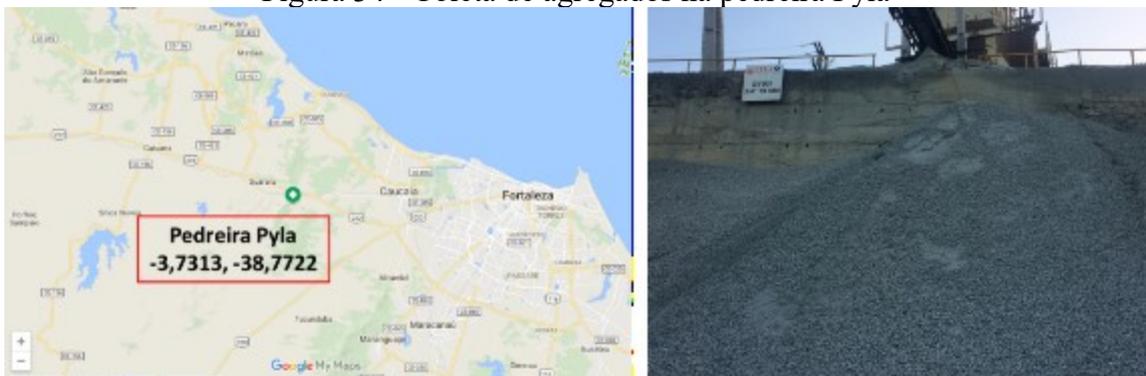


Fonte: elaborada pela autora.

3.3.1. Fase I do programa experimental - Coleta e caracterização dos materiais

O agregado utilizado no presente estudo foi coletado na Pedreira Pyla (FIGURA 34) cujas coordenadas geográficas são: Latitude -3,7313 e Longitude -38,7722. O agregado é composto principalmente por feldspatos, quartzos e micas e a rocha pode ser classificada como monzogranito. Foram coletados agregados de duas granulometrias diferentes, 3/4” e 3/8”, a fim de produzir amostras de tratamento superficial duplo (TSD).

Figura 34 - Coleta de agregados na pedreira Pyla



Fonte: elaborada pela autora.

Todos os ensaios tradicionais de caracterização do agregado foram realizados, sendo esses: análise granulométrica (FIGURA 35), índice de forma, adesividade (FIGURA 36), absorção e densidade e abrasão Los Angeles (FIGURA 37). Para possibilitar a avaliação da influência da uniformidade, além da utilização do agregado como ele foi coletado na pedreira, modificou-se a sua granulometria para torná-la mais uniforme, diminuindo a presença de grãos muito maiores que a mediana.

Figura 35 - Ensaio de análise granulométrica



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 36 - Ensaio de adesividade convencional



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 37 - Ensaio de abrasão Los Angeles



Fonte: elaborada pela autora.

Além dos ensaios tradicionais, optou-se por realizar o ensaio de fluorescência de raios-x para identificar a composição química do agregado em estudo. Ao realizar a coleta, observou-se que a amostra apresentava uma certa heterogeneidade de coloração, com algumas partículas em tons claros de cinza e rosa, enquanto outras tinham coloração escura quase preta. Dessa forma, o ensaio foi realizado na amostra completa, assim como nessas duas fases separadamente, a clara e a escura. Na Tabela 5 podem ser visualizados os ensaios realizados nos agregados, bem como as normas empregadas.

Tabela 5 - Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Normas de ensaio
Agregados - Análise granulométrica	DNER-ME 083/98
Agregados - Determinação do índice de forma	DNER-ME 086/94
Agregado graúdo - Adesividade a ligante betuminoso	DNER-ME 078/94
Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo	DNER-ME 081/98
Agregados - Determinação da Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98
Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	DNER-ME 089/94
Fluorescência de raios-x	Procedimento do Laboratório de Raios-x da UFC

Fonte: elaborada pela autora.

A emulsão asfáltica utilizada foi do tipo RR-2C (catiônica de ruptura rápida), fornecida pela Asfaltos Nordeste em 17/12/2016. Escolheu-se utilizar apenas a emulsão sem modificação por ser o ligante mais empregado para os serviços de tratamentos superficiais por penetração no Brasil. Consta na Tabela 6 os ensaios realizados na emulsão e as normas correspondentes. Os ensaios de viscosidade e de peneiração não foram repetidos em laboratório, e sim disponibilizados pela empresa fornecedora. Após a caracterização do agregado e da emulsão asfáltica selecionados, partiu-se para a fase II do programa experimental.

Tabela 6 - Ensaios de caracterização das emulsões

Ensaios	Normas de ensaio
Material betuminoso - Determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada	DNER-ME 004/94
Emulsão asfáltica - determinação da peneiração	DNER-ME 005/94 (ABNT-NBR 14393)

Fonte: elaborada pela autora.

3.3.2. Fase II do programa experimental - Ensaios de avaliação da perda de agregado

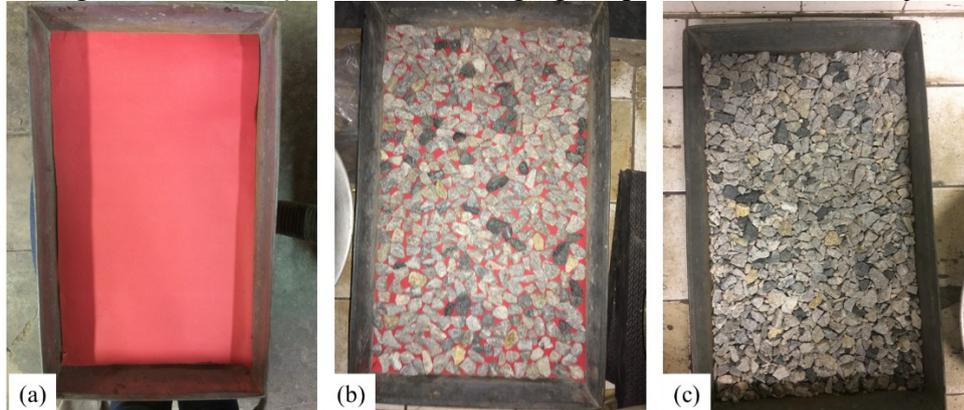
3.3.2.1. Dosagem

O procedimento de dosagem pelo método do DER-CE foi realizado de acordo com as recomendações da ES - P 11/00 Tratamento superficial duplo (DERT, 2000), explicitada anteriormente na seção 2.2.2. Na Figura 38, observa-se a bandeja de fundo vermelho utilizada para determinação da taxa em massa para os agregados escolhidos e na Figura 39 a determinação da massa específica solta, que não foi obtida por uma caixa de madeira, e sim por um cilindro de volume conhecido. Após a determinação das taxas como recomendado nas equações 4, 5, 6 e 7, obtiveram-se as taxas de material para cada camada para a área do corpo de prova utilizado (Diâmetro = 0,25 m; $A_{CP} = 0,06158 \text{ m}^2$) e organizaram-se os dados na Tabela 7.

A segunda dosagem aplicada foi a indicada na 147/2012 Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo (DNIT, 2012), que não recomenda um método específico. Assim, optou-se pela menor taxa de agregados a fim de se evitar desperdício de material, pois percebeu-se que a menor taxa recomendada já era bem superior à taxa obtida pelo método do DER-CE. Já para a emulsão, optou-se por uma taxa média de aplicação, a fim de garantir a interação entre

os componentes do tratamento e entre as camadas. As taxas e os valores obtidos para o corpo de prova pela dosagem do DNIT podem ser observados na Tabela 7.

Figura 38 - Definição das taxas de agregado pelo método da bandeja



Fonte: elaborada pela autora.

(a) Bandeja vazia com o fundo vermelho, (b) dosagem da 1ª camada de agregado, (c) dosagem da 2ª camada de agregado.

Figura 39 - Determinação da massa específica seca dos agregados



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 7 - Taxas teóricas obtidas pelas dosagens do DER-CE e do DNIT

Dosagem	Material	1ª camada	2ª camada	Banho diluído	
DER-CE não modificado	Ligante	Taxa L/m ²	0,79	0,69	0,50
		Volume (ml)	48,90	42,57	30,79
	Agregado	Taxa kg/m ²	16,79	4,35	-
		Massa (g)	1033,75	267,95	-
DER-CE modificado	Ligante	Taxa L/m ²	0,52	0,28	0,50
		Volume (ml)	31,95	17,14	30,79
	Agregado	Taxa kg/m ²	12,51	4,20	-
		Massa (g)	770,31	258,62	-
DNIT	Ligante	Taxa L/m ²	1,50	1,00	-
		Volume (ml)	92,36	61,58	-
	Agregado	Taxa kg/m ²	20,00	10,00	-
		Massa (g)	1231,50	615,75	-

Fonte: elaborada pela autora.

Após a moldagem dos corpos de prova, verificou-se o quão diferente foram as taxas efetivas de aplicação dos materiais em relação às teóricas recomendadas pelas especificações de serviço escolhidas aplicando a Equação (10) tanto para as camadas de emulsão, quanto para as de agregado.

$$\Delta = \frac{TA_e - TA_t}{TA_t} \quad (10)$$

Sendo:

- Δ a diferença percentual entre taxas efetiva e teórica;
- TA_e a taxa de aplicação efetiva do material;
- TA_t a taxa de aplicação teórica do material.

3.3.2.2. *WTAT e Sweep test*

Sabe-se que a perda de agregado é um dos principais defeitos observados em TSPs, no entanto ainda não há no Brasil nenhuma norma para avaliação desse parâmetro. Propõe-se nesse estudo a realização do *Sweep Test*, ensaio já normatizado nos EUA, e do WTAT proposto por Loiola (2009). Em resumo, a moldagem dos corpos de prova (CPs) para ambos os ensaios foi realizada de acordo com o procedimento a seguir:

- a) Separar a aparelhagem necessária para o ensaio:
 - Balança, estufa, compactador de laboratório, termômetro;
 - Base de madeira para montagem e manuseio da amostra;
 - Manta asfáltica circular, molde metálico e base metálica com diâmetro de 29 cm;
 - Béquer para aquecimento da emulsão asfáltica;
 - Espátula para espalhamento da emulsão asfáltica;
 - Pincel para aplicação do banho diluído.
- b) Separar materiais necessários para a moldagem de no mínimo três réplicas do ensaio. No caso foram separadas amostras de brita 3/4", brita 3/8", emulsão asfáltica e água para a produção de amostras de TSD nas quantidades recomendadas pela especificação de dosagem escolhida;

- c) Montar a base do CP em cima da balança tarada, anotando o peso a cada adição de um elemento. A montagem é realizada na seguinte ordem: base de madeira, disco metálico, disco de manta asfáltica, molde metálico;
- d) Aquecer a emulsão na temperatura definida para o ensaio com o auxílio de uma estufa e de um termômetro;
- e) Aplicar a quantidade de emulsão definida para a 1ª camada, espalhar rapidamente com a espátula para alcançar toda a superfície do CP e anotar o peso do corpo de prova. O béquer com a emulsão deve ser imediatamente recolocado na estufa para manutenção da temperatura até a aplicação da camada seguinte;
- f) Despejar a 1ª camada de agregado evitando a sobreposição dos grãos;
- g) Posicionar o CP na calha do compactador e realizar a compactação com 8 passadas do rolo. Reposicioná-lo na balança e anotar o peso após a 1ª compactação;
- h) Retirar a emulsão asfáltica da estufa e aplicar com o auxílio de um pincel a quantidade dosada para a 2ª camada de emulsão. Anotar o peso do CP;
- i) Despejar a 2ª camada de agregado evitando a sobreposição dos grãos;
- j) Posicioná-lo na calha do compactador e realizar a compactação com 8 passadas do rolo. Reposicionar o CP na balança e anotar o peso após a 2ª compactação;
- k) Aplicar o banho diluído numa proporção 1:1 (água, emulsão) na temperatura de ensaio escolhida. Pesá-lo. Essa etapa é optativa, pois algumas especificações de serviço não aplicam banho diluído ao final do revestimento;
- l) Levar o CP ao local de cura. No presente estudo utilizaram-se dois tipos de cura, a em estufa à 50°C por 24h e a em temperatura ambiente (27°C) por 48h.

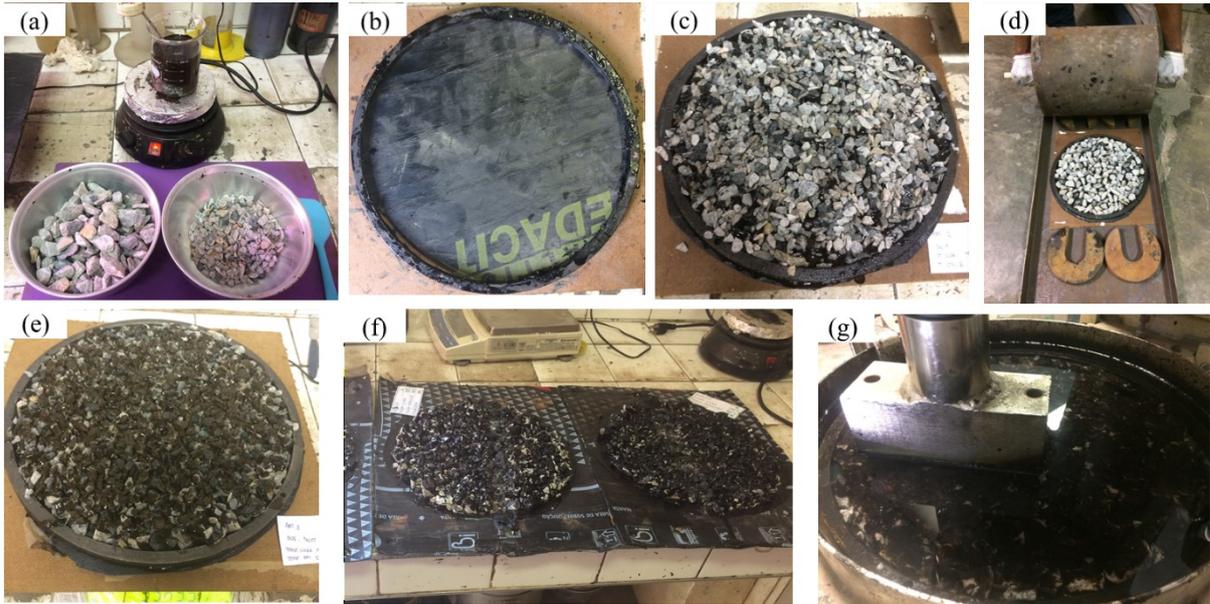
Após a moldagem dos CPs foram realizados o WTAT e o *Sweep test* seguindo o mesmo método de ensaio explicitado a seguir:

- a) Após a cura do CP, caso tenha sido em estufa, deixar esfriar por 20 minutos antes do início do ensaio;
- b) Pesá-lo antes da realização do ensaio;
- c) Posicionar o CP na bandeja de ensaio e despejar água cobrindo-o completamente até aproximadamente 2 mm acima da superfície. Aguardar 10 minutos;
- d) Configurar a batedeira na velocidade mais baixa, travar o CP, elevar a plataforma e ligar o equipamento. Operar por 5 minutos com o auxílio de um cronômetro para controle;

- e) Retirar a amostra do equipamento e lavar em água corrente para remoção de qualquer agregado que tenha ficado solto;
- f) Levar o CP para a estufa à 50°C até constância de massa, em geral 24 horas;
- g) Resfriar o CP à temperatura ambiente e pesá-lo;

Uma ilustração das etapas citadas pode ser visualizada na Figura 40.

Figura 40 - Ilustração da moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio WTAT



Fonte: elaborada pela autora.

(a) Separação dos materiais e equipamentos necessários ao ensaio; (b) Pesagem da base de madeira, molde metálico e manta asfáltica; (c) Espalhamento da emulsão e do agregado no molde; (d) Compactação do corpo de prova; (e) Aplicação do banho diluído; (f) CPs em processo de cura; (g) Ensaio WTAT.

Após a finalização do ensaio, calculou-se a perda de agregados obtidas no WTAT pela aplicação da Equação (11).

$$PA_{WTAT} (\%) = \frac{P_{antes} - P_{depois}}{P_{antes}} \times 100 \quad (11)$$

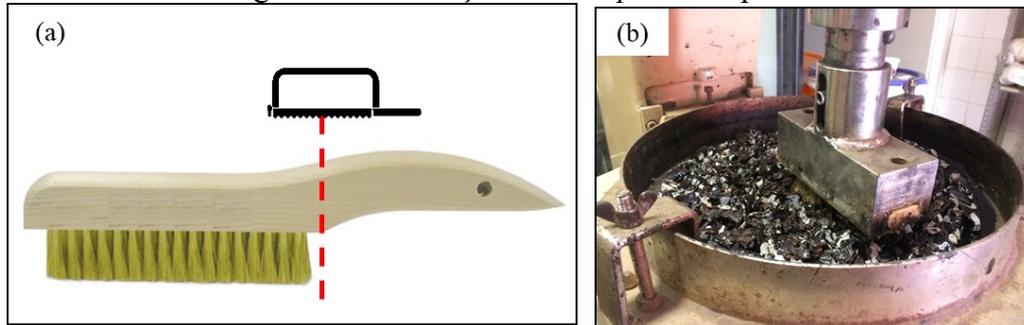
Sendo:

- PA_{WTAT} a perda de agregados obtida no WTAT;
- P_{antes} o peso do corpo de prova antes do ensaio em gramas;
- P_{depois} o peso do corpo de prova seco após o ensaio em gramas.

O *Sweep test* apresenta método de ensaio semelhante ao WTAT, no entanto a amostra não é submersa em água e o desgaste provocado no corpo de prova é realizado com

uma escova de cerdas de nylon, ilustrada na Figura 41. Devido ao desgaste das cerdas da escova, para cada conjunto de três corpos de prova, utilizava-se uma nova escova.

Figura 41 - Ilustração do *Sweep test* adaptado



Fonte: elaborada pela autora.

a) Escova de nylon adaptada para o ensaio, com ilustração do local de corte para encaixe no equipamento; b) Ensaio em andamento com a escova de nylon.

É importante ressaltar que esse ensaio foi adaptado e introduzido no Brasil por Mesquita Júnior (2017) para avaliação de emprego de fresado como agregado em TSPs. A perda de agregados obtida no *Sweep test* pode ser obtida pela Equação (12), em que a ASTM D 7000 inclui um fator de majoração de 1,33 para considerar as bordas do corpo de prova que não é alcançada pela escova do ensaio (FIGURA 42).

$$PA_{\text{sweep}} (\%) = \frac{P_{\text{antes}} - P_{\text{depois}}}{P_{\text{antes}}} \times 1,33 \times 100 \quad (12)$$

Sendo:

- PA_{sweep} a perda de agregados obtida no WTAT;
- P_{antes} o peso do corpo de prova antes do ensaio em gramas;
- P_{depois} o peso do corpo de prova seco após o ensaio em gramas.

Figura 42 - Área solicitada e não-solicitada no *Sweep test*



Fonte: elaborada pela autora.

A fim de se comparar características do material com o desempenho do revestimento, traçou-se uma matriz experimental variando a uniformidade do agregado, a dosagem, a temperatura de cura e a temperatura de aplicação da emulsão. Nas Tabelas 8 e 9 podem ser visualizadas as matrizes experimentais para ambos os ensaios.

Tabela 8 - Matriz experimental para a realização dos ensaios de WTAT

Variáveis	Níveis	Descrição
Agregado	2*	Natural e mais uniforme
Dosagem	2	DER e DNIT
Temperatura de cura	2	50°C e ambiente (27°C)
Temperatura da emulsão	2	46°C e 58°C
Réplicas	3	-

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 9 - Matriz experimental para a realização do Sweep test

Variáveis	Níveis	Descrição
Agregado	2	Natural e mais uniforme
Dosagem	1	DER-CE
Temperatura de cura	2	50°C e ambiente (27°C)
Temperatura da emulsão	2	46°C e 58°C
Réplicas	3	-

Fonte: elaborada pela autora.

A uniformidade do agregado foi variada a fim de comparar os resultados de desempenho dos ensaios com o coeficiente de uniformidade PUC. Optou-se então por empregar o agregado proveniente da pedreira sem modificação e uma versão modificada em que a sua graduação foi alterada retirando da amostra os grãos muito grandes e muito pequenos. As dosagens escolhidas foram as recomendadas nas especificações de serviço estadual e federal, devido às diferenças entre os métodos propostos em cada uma delas. Além disso, a fim de otimizar a matriz experimental, o ensaio com agregado mais uniforme foi repetido apenas para a dosagem preconizada pelo DER-CE.

A variação da temperatura de cura é uma proposta visando a aplicação laboratorial, já que não existem métodos de ensaio normatizados. Foi adotada uma temperatura de cura próxima à típica de campo no estado em que está sendo realizado o estudo e também uma temperatura mais baixa, para avaliar a influência do calor no processo de cura. Já a temperatura da emulsão, visando correlacionar os ensaios de desempenho com as propriedades reológicas da emulsão, buscou-se adotar as temperaturas típicas do ensaio MSCR, variando a cada 6°C. A princípio a proposta era de aplicação de temperatura em 4 níveis (46°C, 52°C, 58°C e 64°C),

mas devido à dificuldade de manter a temperatura estável em laboratório e durante a moldagem dos corpos de prova, optou-se por utilizar apenas duas variações de temperatura, 46°C e 58°C.

Por dificuldades de se obter o implemento resistente para a realização do *Sweep test*, os ensaios foram realizados apenas para a dosagem do DER-CE. Assim, foram moldados 30 corpos de prova para o ensaio WTAT e 18 para o *Sweep test*.

Após a realização dos ensaios, foi feita uma otimização linear minimizando a diferença entre a perda de agregados estimada pelo modelo e a efetiva obtida pelos ensaios. A perda de agregados estimada foi definida como uma função das perdas de agregados teóricas obtidas pela curva granulométrica dos agregados (EQUAÇÃO 13). A otimização foi feita com o auxílio do comando “solver” do *Microsoft Office Excel 2016*, minimizando a diferença entre a perda de agregados estimada pelo modelo e a efetiva obtida pelos ensaios.

$$P_{est} = a \times Pt_{1^{a}cam} + b \times Pt_{2^{a}cam} \quad (13)$$

Sendo:

- P_{est} a perda de agregados estimada pelo modelo, em percentual;
- “a” o coeficiente de contribuição da perda de agregados teórica da 1ª camada;
- $Pt_{1^{a}cam}$ a perda de agregados obtida da curva granulométrica do agregado da 1ª camada do CP, em percentual;
- “b” o coeficiente de contribuição da perda de agregados teórica da 1ª camada;
- $Pt_{2^{a}cam}$ a perda de agregados obtida da curva granulométrica do agregado da 2ª camada do CP, em percentual;

3.3.3. Fase III do programa experimental - Ensaio de avaliação da exsudação

3.3.3.1. LWT adaptado

A exsudação é um dos principais defeitos observados em TSPs, porém ainda não há no Brasil uma metodologia de avaliação dedicada à identificação desse fenômeno. Com base na literatura, propõe-se a utilização de Processamento Digital de Imagens (PDI) para avaliação da área exsudada. Portanto, foram produzidos CPs para análise da exsudação e com o auxílio de uma máquina fotográfica foram produzidas imagens da superfície das amostras antes e após o ensaio de LWT adaptado.

Os CPs para ensaio foram dosados seguindo as mesmas condições já comentadas na seção 3.3.2.1 Dosagem. Além disso, a moldagem dos corpos de prova seguiu o mesmo procedimento descrito para a realização dos ensaios de perda de agregado, havendo apenas uma alteração no formato da manta asfáltica de base para possibilitar a fixação do corpo de prova no equipamento. A manta asfáltica passou a ter um formato quadrado com dimensões aproximadas de 41×35 cm.

- a) Posicionar o CP na bandeja de ensaio e despejar água cobrindo-o completamente até aproximadamente 2 mm acima da superfície. Aguardar 10 minutos;
- b) Configurar a bateadeira na velocidade mais baixa, travar o CP, elevar a plataforma e ligar o equipamento. Operar por 5 minutos com o auxílio de um cronômetro para controle;
- c) Retirá-lo do equipamento e lavar em água corrente para remoção de qualquer agregado que tenha ficado solto;
- d) Levar o CP para a estufa à 50°C até constância de massa, em geral 24 horas;
- e) Resfriá-lo à temperatura ambiente e pesá-lo;

Foram necessárias adaptações no equipamento para permitir o encaixe das amostras de TSP. Mais detalhes das adaptações podem ser observados na Figura 43 e a matriz experimental definida encontra-se na Tabela 10. Descreve-se a seguir o procedimento de o ensaio no LWT:

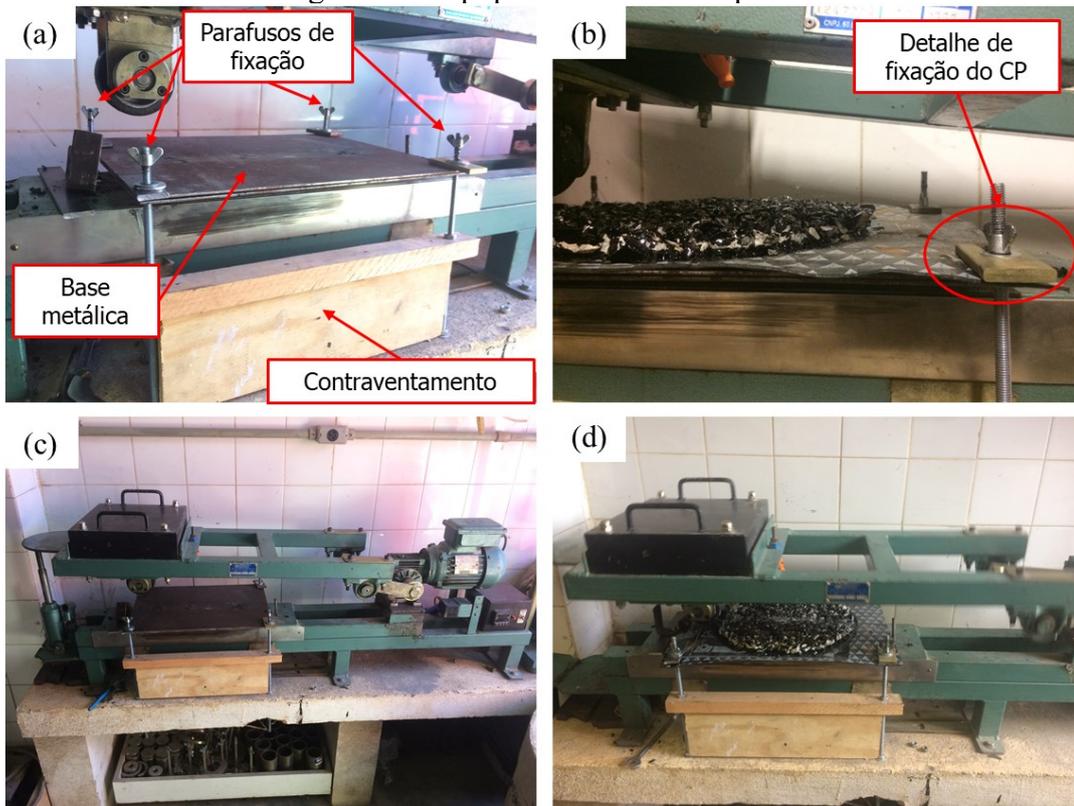
- a) Após a cura do CP, caso tenha sido em estufa, deixar esfriar por 20 minutos antes do início do ensaio;
- b) Pesar o CP e fotografar a sua superfície antes da realização do ensaio;
- c) Posicioná-lo na base retangular metálica do LWT e fixá-lo pela manta com borboletas nos quatro parafusos das bordas. Acrescentou-se em cada parafuso pequenas barras metálicas para impedir o deslocamento excessivo do corpo de prova durante o ensaio;
- d) Configurar a quantidade de ciclos desejada no equipamento e rebaixar a roda até o nível de ensaio retirando o macaco. Ligar o equipamento;
- e) Após o final dos ciclos, retirá-lo do equipamento;
- f) Pesar o CP e fotografar a sua superfície após a realização do ensaio.

Tabela 10 - Matriz experimental para avaliação da exsudação pelo equipamento LWT

Variáveis	Níveis	Descrição
Agregado	2	Natural e mais uniforme
Dosagem	2	DER e DNIT
Temperatura de cura	2	50°C e ambiente (27°C)
Temperatura da emulsão	2	46°C e 58°C
Ciclos	1	50
Réplicas	3	-

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 43 - Equipamento LWT adaptado



Fonte: elaborada pela autora.

a) Componentes adicionados ao equipamento; b) Detalhe da placa metálica para fixação do corpo de prova; c) Visão geral do equipamento; d) Corpo de prova posicionado para realização do ensaio.

3.3.3.2. *Processamento digital de imagens*

Os corpos de prova produzidos no ensaio LWT foram fotografados antes e depois do ensaio para comparação das imagens. Uma observação importante é que durante o procedimento experimental buscou-se padronizar a produção das imagens, a fim de manter as mesmas condições de iluminação e de altura de captura. Vale ressaltar que o equipamento ideal para a captura das imagens seria um *scanner* portátil, mas não havia disponibilidade deste no momento do desenvolvimento da presente pesquisa.

O software de processamento das imagens *iPas2* foi escolhido pelo fato de Chaturabong (2014) já ter utilizado o mesmo software para avaliação da exsudação em TSPs. O *iPas2* é uma extensão do Matlab, desenvolvida pelo *Modified Asphalt Research Center* (MARC) especificamente para o PDI de misturas asfálticas e maiores detalhes sobre a utilização do software podem ser consultados em Sefidmazgi (2011) e Coenen *et al.* (2012).

Em resumo o *iPas2* recebe como entrada a imagem e dados dos materiais, sendo estes o volume de vazios total da amostra (%), o teor de ligante (%), a massa específica do agregado (%), massa específica do ligante (%) e a granulometria. No presente estudo foram necessárias algumas adaptações quanto às propriedades volumétricas dos corpos de prova, pois não é comum medir algumas dessas propriedades para amostras de TSP.

Quanto ao volume de vazios, foi a propriedade de mais difícil aquisição, já que não existe um padrão para tal. Assim, fixou-se o volume de vazios para todas as amostras como sendo de 8,5% a partir de dados recomendados e obtidos na literatura (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005; KODIPPILY, 2013). O teor de ligante inserido no programa foi considerado como o teor de CAP, já que os ensaios são realizados apenas após a cura completa da emulsão. Assim, a partir dos pesos das camadas de cada corpo de prova, obteve-se o teor de emulsão e foi descontado o teor de água. Acredita-se que essa forma é mais indicada pois o programa foi desenvolvido para misturas asfálticas produzidas com CAP. A massa específica do agregado foi obtida nos ensaios de caracterização e a densidade específica do ligante não foi medida, no entanto considerou-se que a variação é pequena pela literatura, então considerou-se um valor médio. Os dados de teor de CAP para cada réplica foram calculados individualmente e podem ser visualizados no Apêndice C.

Após a entrada dos dados acima citados, aplicam-se quatro filtros na imagem, o *median filter size* para remoção de ruídos aleatórios, o *Hmax filter size* para eliminar a variação da intensidade dos pixels do agregado e conseguir um valor de cinza uniforme, em seguida a imagem é invertida e são definidas as fronteiras das regiões aplicando a *watershed transform*. Por fim, converte-se a escala de cinza em uma imagem preto e branca pela definição de limiares com a binarização (*thresholding*). Na Figura 44, as etapas relatadas acima podem ser visualizadas na prática.

Ao fim da análise é possível identificar a área dos agregados, a qual possibilita o cálculo da área de ligante (EQUAÇÃO 14). Identifica-se a área exsudada por uma subtração simples entre a área de ligante no estado final, após a aplicação de 50 ciclos, e a área de ligante

inicial (EQUAÇÃO 15). Como variável de análise calcula-se o percentual de exsudação pela divisão entre a área exsudada e a área total (EQUAÇÃO 16).

$$A_l = A_{\text{total}} - A_{\text{ag}} \quad (14)$$

$$A_{\text{ex}} = A_{l \text{ final}} - A_{l \text{ inicial}} = (A_{\text{total}} - A_{\text{ag final}}) - (A_{\text{total}} - A_{\text{ag inicial}}) \rightarrow$$

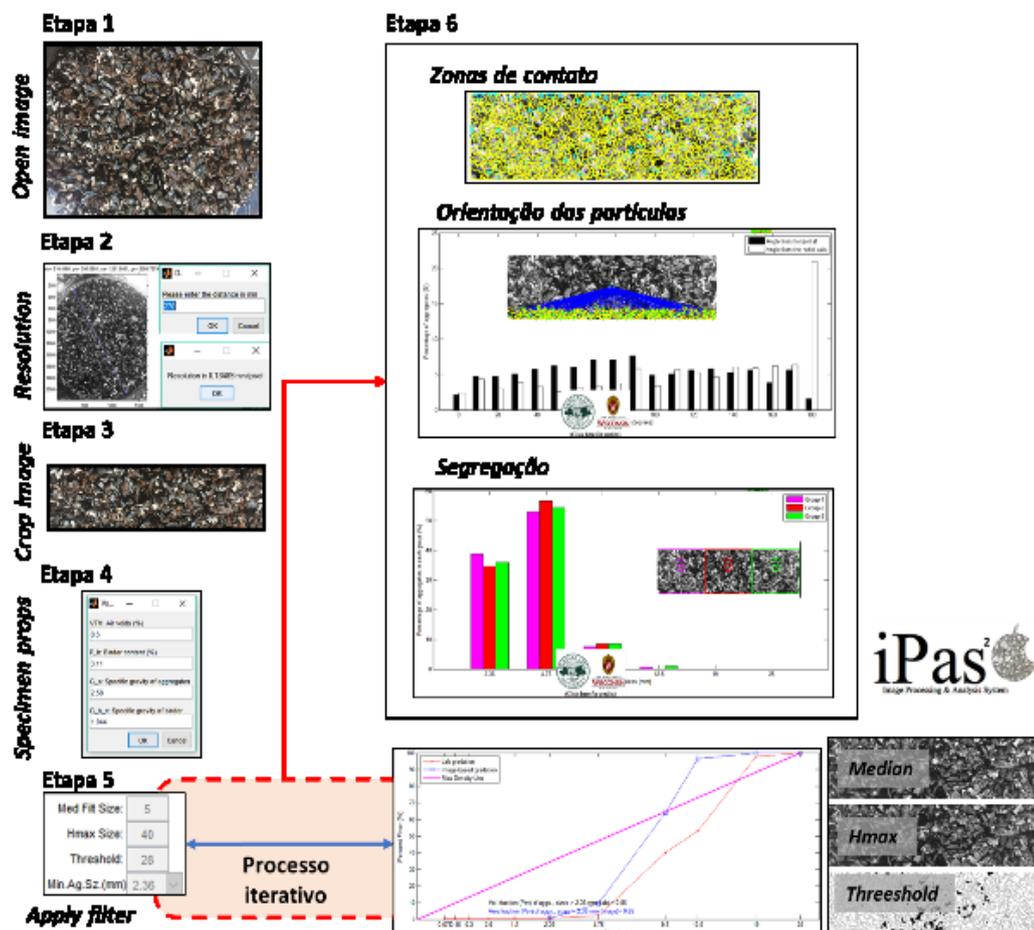
$$A_{\text{ex}} = A_{\text{ag inicial}} - A_{\text{ag final}} \quad (15)$$

$$\% \text{ Exsudação} = \frac{A_{\text{ag inicial}} - A_{\text{ag final}}}{A_{\text{total}}} \times 100 \quad (16)$$

Sendo:

- A_l a área de ligante na superfície do corpo de prova, em cm^2 ;
- A_{total} a área total do corpo de prova, em cm^2 ;
- A_{ag} a área de agregado na superfície do corpo de prova, em cm^2 ;
- A_{ex} a área exsudada na superfície do corpo de prova, em cm^2 .

Figura 44 - Fluxograma do processamento digital de imagem realizado pelo iPas 2



Fonte: adaptado de Ribas (2016).

3.3.4. Fase IV do programa experimental – Ensaios complementares

A fim de avaliar a compatibilidade entre o ligante e o agregado e a sua possível relação com a ocorrência da perda de agregados, propõe-se neste estudo a realização do ensaio ABS, que ainda não possui norma brasileira, mas foi realizado seguindo a norma americana AASHTO TP 91-11 *Test Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test*. Antes da realização do ensaio propriamente dito, foi necessário fabricar os moldes de silicone com 20 mm de diâmetro (FIGURA 45) para aplicação da emulsão no substrato, assim como usinar os *dollies* com as ranhuras requeridas pela especificação.

Figura 45 - Dolly, moldes de silicone e materiais de apoio



Fonte: elaborada pela autora.

O equipamento utilizado para medição da tensão de arrancamento foi o Positest AT-A (FIGURA 46) recomendado na ASTM D4541 (ASTM, 2014). Para realização do ensaio ABS foi realizado o procedimento, ilustrado na Figura 47:

- a) Colocar os substratos (agregado) em um banho ultrassônico por 1h para remoção das impurezas e em seguida secá-los em estufa por aproximadamente 24h à 100°C. Após esse processo deixar o agregado em temperatura ambiente por 24h;
- b) Após as 24h, posicionar os moldes de silicone no substrato;
- c) Aplicar a emulsão asfáltica aquecida na temperatura desejada controlando o peso com uma balança de precisão. Nessa etapa a norma recomenda a aplicação de $0,4g \pm 0,05g$, no entanto como a emulsão asfáltica utilizada é composta por aproximadamente 67% de água, percebeu-se que após a cura essa quantidade era insuficiente para o ensaio. Assim adotou-se nesse estudo uma amostra de emulsão de $0,8g \pm 0,05g$;
- d) Deixar as amostras curarem dentro do molde sobre a rocha, método chamado no inglês de *curing on rock* (COR);

- e) Após a cura, retirar os moldes de silicone e aplicar imediatamente o *dolly*, que deve ter sido condicionado por no mínimo 1h em estufa à 60°C. A norma recomenda a aplicação do *dolly* com a colocação de um peso de 50g, no entanto nesse estudo pressionou-se manualmente o *dolly* por 10s;
- f) Deixar que o conjunto *dolly*-agregado estabilize em temperatura ambiente por no mínimo 1h antes da realização do ensaio;
- g) Posicionar o pistão do equipamento, configurar a taxa de aplicação da pressão e dar “start” no Positest AT-A. Por limitações do equipamento, o ensaio foi filmado para plotagem do gráfico POTS *versus* tempo. O ensaio fornece como saída a pressão máxima exercida no *dolly* a *Pull-Off Tension Strength* (POTS), nomeada de tensão de arrancamento em português.

Figura 46 - Equipamento Positest AT-A



Fonte: elaborada pela autora.

Definiu-se a matriz dos experimentos em condições semelhantes às dos ensaios nos corpos de prova dos ensaios WTAT e *Sweep test*. Foram variadas a temperatura da emulsão (46°C e 58°C), a temperatura de cura (Ambiente e 50°C) e o tempo de cura (24h e 48h) correspondente, para identificar quais dessas variáveis influenciam na adesividade e por consequência na qualidade de um TSP. A tensão de arrancamento foi variada a fim de avaliar a sensibilidade do equipamento. A matriz dos experimentos no ABS pode ser observada na Tabela 11.

Figura 47 - Etapas do ensaio ABS



Fonte: elaborada pela autora.

(a) Banho ultrassônico do substrato; (b) Posicionamento dos moldes de silicone no substrato; (c) Pesagem das amostras de emulsão no substrato; (d) Amostras de emulsão em processo de cura; (e) Colagem dos *dollies* em cada amostra com sobre peso de 50g; (f) Estabilização do conjunto dolly-substrato; (g) Realização do ensaio ABS com o equipamento Positest; e (h) Aparência das amostras e dos *dollies* após o fim do ensaio.

Tabela 11 - Matriz experimental para avaliação da adesividade dos TSPs por meio do ABS

Variáveis	Níveis	Descrição
Temperatura da emulsão	2	46°C, 58°C
Temperatura de cura	2	Ambiente (27°C) e 50°C
Taxa de aplicação da Tensão	2	0,2 MPa/s e 0,7 MPa/s

Fonte: elaborada pela autora.

Tendo em vista as especificações de desempenho definidas por Adams (2014) e Kim *et al.* (2017), propõe-se como complemento ao estudo a realização do ensaio MSCR em uma faixa de temperatura próxima às usuais de campo para compreensão dos efeitos de variação da temperatura da emulsão no seu desempenho.

Devido à viscosidade da emulsão asfáltica RR-2C utilizada, foi necessário extrair o resíduo da emulsão para preparação das amostras para o ensaio MSCR. O procedimento de extração do resíduo foi o recomendado na ASTM D7497-09 *Recovering Residue from Emulsified Asphalt Using Low Temperature Evaporative Technique* (FIGURA 48). Resumidamente, seguiram-se as seguintes etapas:

- Espalhou-se a emulsão asfáltica “fresca” numa fôrma de silicone à uma taxa de 2kg/m^2 ;
- A amostra foi reservada por 24h à temperatura ambiente, de maneira a não sofrer contaminação com impurezas do meio;

- c) Após esse período a amostra foi submetida por mais 24h a um aquecimento na estufa à 60°C para obtenção do resíduo.

Assim, realizou-se o ensaio MSCR no resíduo da emulsão com o auxílio de um reômetro de cisalhamento (FIGURA 49) em 3 níveis de temperatura (46°C, 52°C, 58°C) e dois níveis de tensão (1,0kPa e 3,2kPa). A amostra para o ensaio foi preparada seguindo as recomendações da ASTM D7175-15 *Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer* e o ensaio MSCR foi realizado de acordo com a AASHTO T350 *Standard Method Of Test For Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Ao fim do ensaio, obteve-se a compliância não recuperável (J_{nr}), o percentual de recuperação (R) e a sensibilidade à tensão ($J_{nr-diff}$) da emulsão utilizada.

Figura 48 - Extração do resíduo da emulsão



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 49 - Reômetro de cisalhamento utilizado para a realização do ensaio MSCR



Fonte: elaborada pela autora.

3.4. Considerações finais

No presente capítulo foram apresentados os materiais e métodos escolhidos para a realização da pesquisa, detalhando as etapas metodológicas necessárias para atingir os objetivos propostos. Explanou-se a necessidade da realização da revisão bibliográfica e da identificação do cenário brasileiro atual, e em seguida foi delineado o programa experimental. Inicialmente, foram abordados os materiais pétreos e betuminosos selecionados, assim como os ensaios de caracterização exigidos pelas normas vigentes. Em seguida, foram citados os ensaios propostos e as variáveis a serem analisadas. No capítulo seguinte, serão apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da execução das etapas metodológicas descritas anteriormente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Fase I do programa experimental - Coleta e caracterização dos materiais

Os materiais utilizados foram caracterizados pelas recomendações das especificações técnicas para o serviço de TSP. Na Tabela 12 estão explicitados os resultados obtidos e os requisitos necessários. Observa-se que os agregados em estudo satisfizeram todos os requisitos, classificando-os como adequados ao uso em TSPs. Em relação ao resultado de Abrasão Los Angeles, ambos os agregados apresentaram valores inferiores ao limite máximo de 40% recomendado pelas especificações, no entanto o agregado miúdo (brita 3/8'') apresentou valor próximo ao limite.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Parâmetros	3/4''	3/8''	Requisitos da norma
Abrasão Los Angeles	30%	38%	Máximo 40%
Índice de Forma	0,87	0,86	Mínimo 0,5
Densidade aparente	2,63	2,54	-
Absorção	0,73%	2,11%	-
Adesividade	Satisfatória	Satisfatória	Sem descolamento da película

Fonte: elaborada pela autora.

Em relação ao índice de forma, ambos os agregados apresentaram resultados satisfatórios, com f maior que 0,5, o que indica forma predominantemente cúbica, ideal para serviços de pavimentação. A adesividade também foi considerada satisfatória, pois não houve descolamento da película do ligante, no entanto o ensaio é puramente subjetivo e existem contradições na literatura atual sobre a sua eficácia em avaliar essa característica, daí foi proposto o ensaio ABS cujos resultados foram discutidos na seção posterior 4.6. Os ensaios de densidade e absorção foram realizados apenas para fins de caracterização e foram observados resultados próximos ao esperado para agregados graníticos.

Os ensaios de caracterização do ligante não foram repetidos em laboratório, no entanto os resultados fornecidos pelo fabricante podem ser visualizados na Tabela 13. Nota-se que os resultados apresentaram valores dentro dos limites aceitáveis pelas especificações de serviço. Os resultados dos ensaios de granulometria e de fluorescência de raios-x do agregado, assim como o MSCR do resíduo da emulsão asfáltica podem ser verificados nas próximas seções.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de caracterização dos ligantes

Ensaio	Resultados obtidos	Resultados esperados
Viscosidade (a 50°C)	245	100 a 400
Peneiração	0,01%	Até 0,10%
Resíduo (por evaporação, em peso)	67,4%	67%

Fonte: elaborada pela autora.

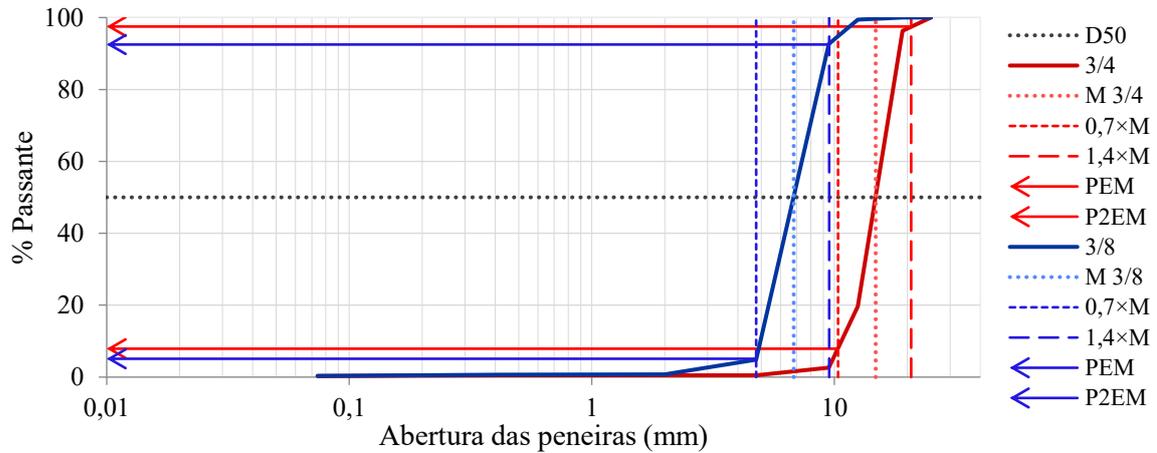
4.1.1. Granulometria

No gráfico das Figura 50 podem ser visualizadas as curvas granulométricas das britas 3/4'' e 3/8'' e as retas para obtenção dos parâmetros P_{EM} e P_{2EM} . Com isso, calculou-se o PUC pela Equação (3) e os resultados foram organizados na Tabela 14. Apesar de não se conhecer a correlação do PUC com o desempenho de TSPs de múltiplas camadas, percebe-se que ambos os agregados apresentaram PUC próximo de 0, indicando alta uniformidade e baixo risco ao desenvolvimento dos dois principais defeitos. Analisando separadamente os valores obtidos de P_{EM} , nota-se que a brita 3/4'' tem maior percentual, indicando maior possibilidade de ocorrência de exsudação que a brita 3/8''. Em contrapartida, nota-se que a brita 3/8'' apresenta maior potencial de perda de agregado que a brita 3/4'', pois o seu valor teórico de perda ($100 - P_{2EM}$) foi superior. Com os valores obtidos da curva, constata-se que ambos os agregados têm potencial de aplicação em TSPs.

Apesar da avaliação preliminar positiva quanto à possibilidade de aplicação em TSPs do agregado sem modificação, foi possível aumentar ainda mais a uniformidade do agregado ao se retirar da amostra os grãos maiores. Assim, esperava-se diminuir a perda de agregado teórica ($100 - P_{2EM}$). Não foi possível modificar significativamente a fração fina dos agregados, pois no processo de lavagem parte dessa fração já era descartada. Dessa forma, não se esperava grandes melhorias no risco à exsudação (P_{EM}). As curvas granulométricas das britas 3/4'' e 3/8'' modificadas podem ser visualizadas na Figura 51 e os parâmetros para cálculo do PUC foram dispostos na Tabela 14.

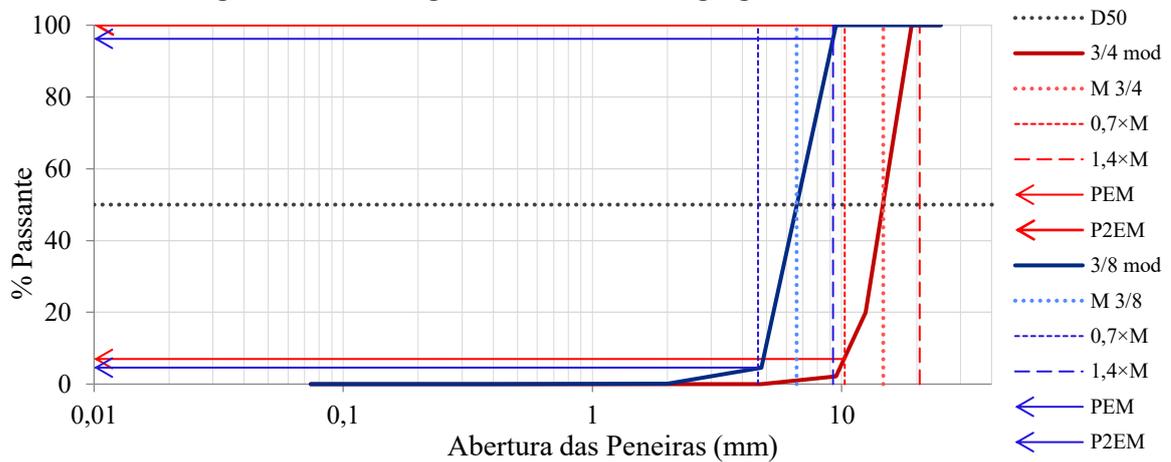
Observa-se que os PUCs de ambas as amostras modificadas foram inferiores aos das amostras não modificadas, indicando maior uniformidade. No entanto, a diferença mais significativa foi na perda de agregado teórica, cuja brita 3/4'' modificada apresentou valor tendendo a 0% e a brita 3/8'' modificada aproximadamente 3,8%. Os efeitos dessa modificação da uniformidade na perda de agregado efetiva foram mais comentados após a realização dos ensaios de desempenho em laboratório que serão analisados nos itens 4.3, 4.4 e 4.5.

Figura 50 - Curva granulométrica dos agregados não modificados



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 51 - Curva granulométrica dos agregados modificados



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 14 - Parâmetros para cálculo do PUC dos agregados

Parâmetros	3/4"	3/8"	3/4" modificada	3/8" modificada
Mediana (M)	14,80	6,80	14,70	6,60
0,7×M	10,36	4,76	10,29	4,62
1,4×M	20,72	9,52	20,58	9,24
Excesso de ligante teórico (P_{EM})	7,90	5,10	7,00	4,60
P_{2EM}	97,5	92,5	100	96,2
Perda de agregado teórica ($100 - P_{2EM}$)	2,5	7,5	0,0	3,8
PUC (P_{EM} / P_{2EM})	0,0810	0,0551	0,0700	0,0478

Fonte: elaborada pela autora.

4.1.2. Fluorescência de raios-x

Os teores de cada óxido obtidos no ensaio de fluorescência de raios-x podem ser observados na Tabela 15. A amostra original, denominada “completa” apresentou como

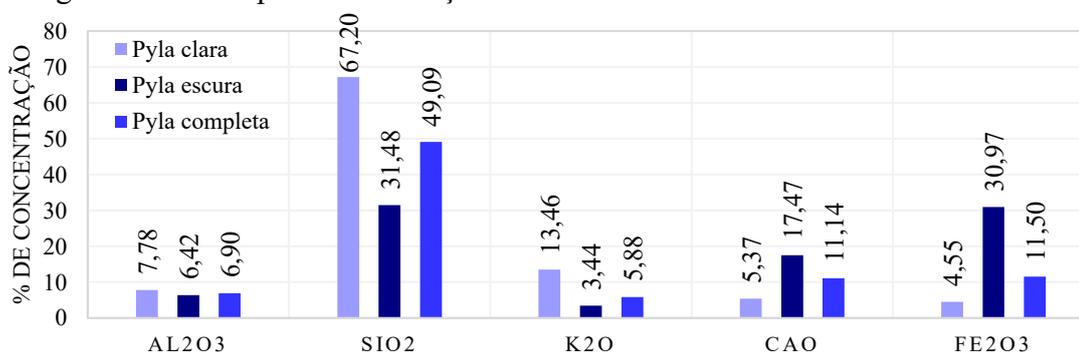
principais componentes dióxido de silício (SiO_2 ou sílica), óxido de cálcio (CaO ou cal virgem), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O). Mais especificamente, a fração “clara” contém maiores concentrações de SiO_2 e de K_2O , já a “escura” de SiO_2 , de Fe_2O_3 e de CaO . A concentração de cada um desses compostos pode ser melhor visualizada no gráfico da Figura 52.

Tabela 15 - Resultados da fluorescência de raios-x

Óxidos	% em massa do óxido			Óxidos	% em massa do óxido		
	Pyla clara	Pyla escura	Pyla completa		Pyla clara	Pyla escura	Pyla completa
MgO	-	1,58	0,87	Nb ₂ O ₅	0,06	0,10	0,10
Al ₂ O ₃	7,78	6,42	6,90	MoO ₃	-	0,10	3,07
SiO ₂	67,20	31,48	49,09	Rh ₂ O ₃	0,74	1,00	-
P ₂ O ₅	-	-	0,80	Tc	-	-	1,39
K ₂ O	13,46	3,44	5,88	Ag ₂ O	0,18	0,41	1,03
CaO	5,37	17,47	11,14	CdO	-	0,37	0,55
TiO ₂	-	5,56	2,96	In ₂ O ₃	-	0,39	-
MnO	0,25	0,46	0,61	TeO ₂	-	-	1,69
Fe ₂ O ₃	4,55	30,97	11,50	Bi ₂ O ₃	-	-	0,20
SeO ₂	-	-	0,09	At	-	-	0,14
Br	-	-	0,06	Fr	-	-	0,14
Rb ₂ O	0,08	0,08	0,14	ThO ₂	-	-	0,19
SrO	0,14	-	0,18	U ₃ O ₈	-	-	0,18
Y ₂ O ₃	0,05	-	0,58	PuO ₂	0,14	0,16	0,32
ZrO ₂	-	-	0,20	-	-	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 52 - Principais concentrações obtidas no ensaio de fluorescência de raios-x



Fonte: elaborada pela autora.

Pelos limites preconizados na NBR 6502 Rochas e solos (ABNT, 1995), rochas ígneas com teor de sílica superior a 65% são classificadas quimicamente como ácidas, com teor entre 52% e 65% como intermediárias ou neutras, entre 45% e 52% como básicas e com menos

de 45% como ultrabásicas. Assim, ao considerar as amostras analisadas como rochas diferentes, a Pyla clara seria classificada como ácida, com teor de sílica de 67,20%, a Pyla escura como ultrabásica, com teor de sílica de 31,48% e a Pyla completa como neutra, com teor de sílica de 49,09%.

Logo, pelo que foi comentado na seção 2.2.2 Adesividade, a fração clara do agregado apresentaria interações predominantemente físicas com um ligante asfáltico, sem ocorrência de reações químicas significativas. Já a fração escura, além de teor mais baixo de sílica, apresenta concentração expressiva de CaO, que poderia formar o CaCO_3 (carbonato de cálcio) característico de agregados como o calcário e cujos elétrons de Ca^{2+} poderiam gerar reações químicas com um ligante asfáltico e levar a uma melhor adesividade.

4.2. Fase II do programa experimental - Ensaio de avaliação da perda de agregado

4.2.1. Dosagem dos corpos de prova

Quanto à dosagem realizada pelo método da bandeja, que é a recomendada pelos técnicos do DER-CE, observaram-se inconsistências entre às taxas de aplicação de agregado (TAAg) e de emulsão (TAE). Na Tabela 16 foram dispostos os valores de taxa teórica e efetiva de cada camada para os CPs moldados com o agregado não modificado e pôde-se calcular o Δ definido na equação (10). Então, plotou-se na Figura 53 o Δ (TAAg) e na Figura 54 o Δ (TAE) de cada CP moldado e na Figura 55 o Δ médio para cada camada.

Analisando a Δ (TAAg) para a primeira camada, percebe-se que nenhum dos CPs conseguiu absorver a quantidade teórica, no entanto seus valores foram bastante próximos. Durante a moldagem dos CPs, observou-se que ao aplicar a quantidade teórica de agregados para a 1ª camada ocorreria a sobreposição de grãos, fenômeno que deve ser evitado. Logo, optou-se por colocar apenas a quantidade suficiente para cobrir a superfície do molde dos CPs sem haver sobreposição. Tal fato provocou uma sobra de agregados média de 5,74% da 1ª camada e acredita-se que isso se deve ao caráter aleatório do espalhamento do agregado ser afetado na construção do mosaico proposto pelo método da bandeja ou pelo fator de majoração de 5% incluído no método.

Tabela 16 - TAAg e TAE dosadas pelo método do DER-CE com agregado não modificado

Amostra	Réplica	1ª cam.	1ª cam.	2ª cam.	2ª cam.	Banho
		emulsão	agregado	emulsão	agregado	diluído
		Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)	Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)	Tx. Efetiva (L/m ²)
1	A	0,792	15,357	1,151	4,370	0,728
	B	0,794	16,351	1,190	4,333	0,896
	C	0,789	16,203	1,142	4,290	0,978
2	A	0,788	14,497	1,158	4,316	0,987
	B	0,789	15,650	1,010	4,315	0,981
	C	0,784	15,364	1,366	4,346	0,989
3	A	0,778	14,703	1,211	4,311	0,757
	B	0,789	13,784	1,252	4,321	0,747
	C	0,797	13,651	1,184	4,385	0,664
4	A	0,796	14,500	1,190	4,104	1,072
	B	0,796	14,810	1,190	4,102	0,947
	C	0,817	15,201	1,190	3,971	1,097
5	A	0,802	16,304	1,211	4,292	0,833
	B	0,874	16,754	1,323	4,432	0,770
	C	0,820	16,767	1,197	4,302	0,955
6	A	0,802	16,582	1,234	4,326	0,729
	B	0,805	16,790	1,198	4,281	0,794
	C	0,833	16,729	1,185	4,344	0,783
7	A	0,838	16,684	1,216	4,420	0,879
	B	0,801	16,757	1,249	4,372	1,065
	C	0,797	16,726	1,205	4,333	0,715
8	A	0,786	16,699	1,187	4,294	0,635
	B	0,797	16,671	1,200	4,355	0,737
	C	0,804	16,525	1,207	4,302	0,752
Taxa teórica		0,794	16,800	0,691	4,350	1,000
Valor máximo		0,874	16,790	1,366	4,432	1,097
Valor mínimo		0,778	13,651	1,010	3,971	0,635
Média		0,803	15,836	1,202	4,301	0,854
Mediana		0,797	16,328	1,198	4,319	0,814
Desvio Padrão		0,021	1,035	0,064	0,103	0,138
Coef. Variação (%)		2,61	6,54	5,32	2,41	16,13

Fonte: elaborada pela autora.

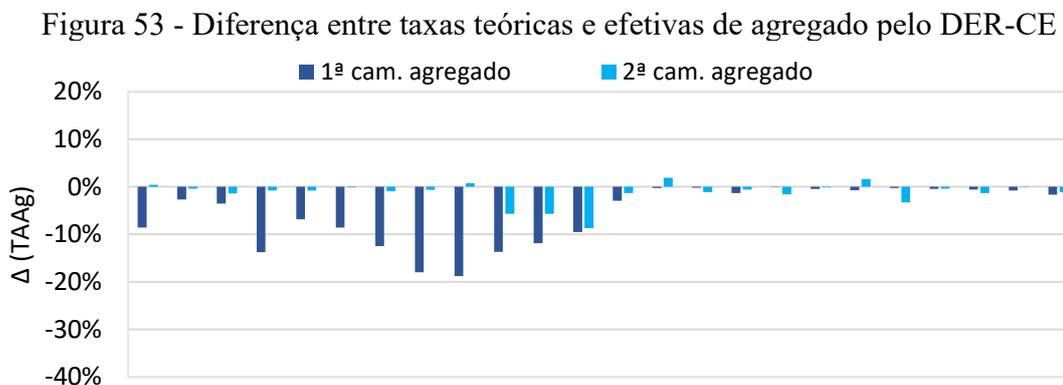
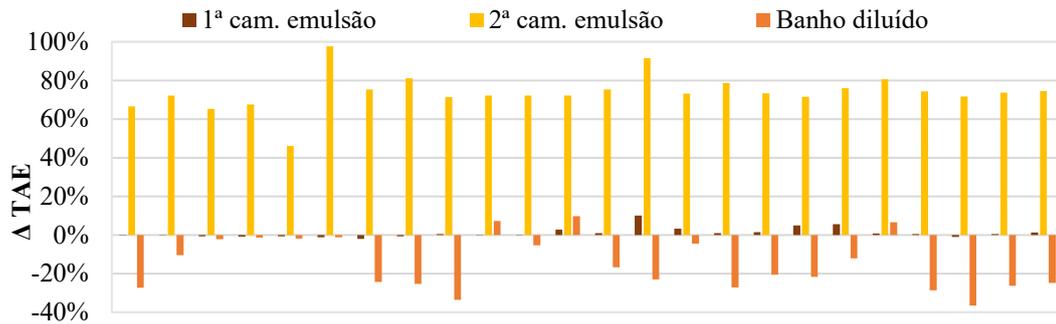
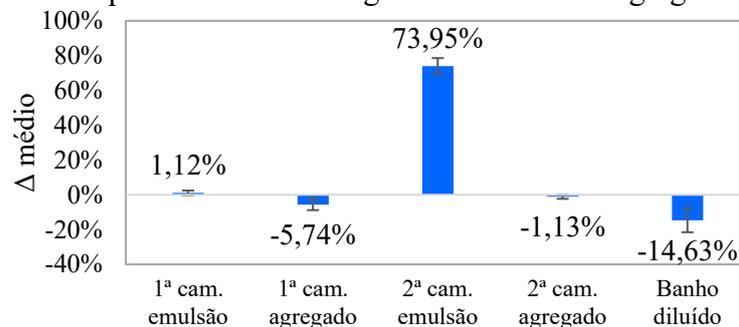


Figura 54 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de emulsão pelo DER-CE



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 55 - Δ médio por camada da dosagem DER-CE com agregado não modificado

Fonte: elaborada pela autora.

Em adição, observou-se que a TAE dosada para a 2ª camada não era suficiente para recobrir a superfície dos agregados da 1ª camada, logo optou-se por não descontar a quantidade de ligante destinada ao banho diluído do total previsto para a segunda camada. A taxa de aplicação efetiva do banho também foi diminuída em aproximadamente 13,8%, pois a superfície dos CPs não conseguiu absorver a quantidade teórica recomendada.

Em síntese quando se consideram as taxas teóricas, pelo método do DER-CE, identificou-se uma ligeira superdosagem dos agregados da 1ª camada (5,74%) e do banho diluído (14,63%), bem como uma subdosagem considerável do ligante da 2ª camada (73,95%), que foi considerado o problema mais crítico desse método. A 1ª camada de emulsão e a 2ª camada de agregado apresentaram baixas discrepâncias entre as taxas teóricas e efetivas.

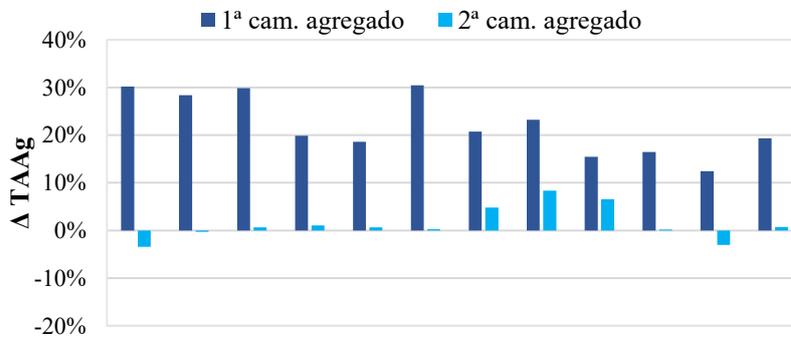
Mesmo se tratando do mesmo método da bandeja, ao realizar a dosagem com os agregados modificados observaram-se inconsistências diferentes entre as taxas de aplicação de agregado (TAAg) e de emulsão (TAE). Na Tabela 17 foram dispostos os valores de taxa teórica e efetiva de cada camada para os CPs moldados com o agregado modificado e pôde-se calcular o Δ definido na equação (10). Então, plotou-se na Figura 56 o Δ (TAAg) e na Figura 57 o Δ (TAE) de cada corpo de prova moldado e na Figura 58 o Δ médio para cada camada.

Tabela 17 - TAAg e TAE dosadas pelo método do DER-CE com agregado modificado

Amostra	Réplica	1ª cam. emulsão	1ª cam. agregado	2ª cam. emulsão	2ª cam. agregado	Banho diluído
		Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)	Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)	Tx. Efetiva (L/m ²)
9	A	0,536	16,29	0,703	4,06	0,614
	B	0,551	16,06	0,864	4,19	0,703
	C	0,554	16,24	0,898	4,23	0,581
10	A	0,521	14,99	0,773	4,24	0,542
	B	0,544	14,84	0,776	4,23	0,437
	C	0,507	16,32	0,866	4,21	0,551
11	A	0,528	15,10	0,921	4,40	0,870
	B	0,528	15,42	0,919	4,55	0,632
	C	0,544	14,44	1,159	4,47	0,638
12	A	0,528	14,57	0,833	4,21	0,844
	B	0,547	14,07	0,744	4,07	0,737
	C	0,604	14,93	0,734	4,23	0,606
	Taxa teórica	0,519	12,510	0,278	4,200	1,000
	Valor máximo	0,604	16,320	1,159	4,552	0,870
	Valor mínimo	0,507	14,068	0,703	4,057	0,437
	Média	0,541	15,271	0,849	4,257	0,646
	Mediana	0,540	15,046	0,848	4,227	0,623
	Desvio Padrão	0,024	0,784	0,123	0,148	0,125
	Coef. Variação (%)	4,46%	5,13%	14,48%	3,48%	19,35%

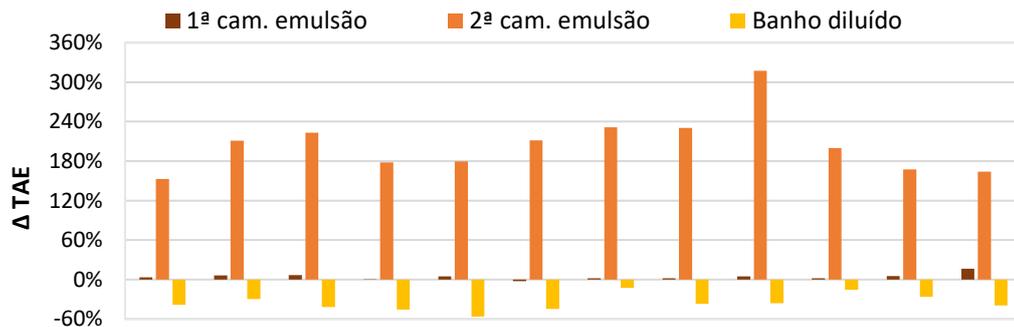
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 56 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de agregado modificado pelo DER-CE

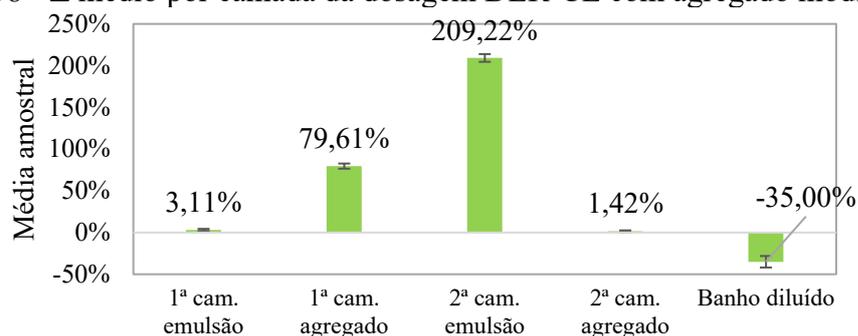


Fonte: elaborada pela autora.

Figura 57 - Diferença entre taxas teóricas e efetivas de emulsão pelo DER-CE



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 58 - Δ médio por camada da dosagem DER-CE com agregado modificado

Fonte: elaborada pela autora.

Além do método proposto pelo DER-CE, moldaram-se corpos de prova com taxas preconizadas pelo DNIT, que não apresenta nenhum método específico de dosagem e sim uma indicação de taxas para cada material em função de cada camada. Pode-se observar na Tabela 18 as taxas teóricas e as efetivas de acordo com o indicado pelo DNIT e nas Figuras 59 e 60 o Δ (TAAg) e o Δ (TAE), respectivamente. Plotou-se ainda o gráfico da Figura 61 explicitando o Δ médio para cada camada.

Comparando a TAE da 1ª camada para ambas as dosagens propostas, observou-se uma taxa teórica do DNIT foi aproximadamente duas vezes superior à obtida pelo método do DER-CE com agregado não modificado. Na aplicação da 1ª camada de agregado, verificou-se uma taxa efetiva média 14,75% inferior à teórica, evidenciando que a menor quantidade preconizada em norma ainda é excessiva para o serviço.

Tabela 18 - TAAg e TAE dosadas pelo DNIT

Amostra	Réplica	1ª cam. emulsão	1ª cam. agregado	2ª cam. emulsão	2ª cam. agregado
		Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)	Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)
1	A	1,447	16,002	1,023	8,538
	B	1,509	16,754	0,999	8,782
	C	1,505	15,373	0,995	9,060
2	A	1,487	17,041	1,028	8,191
	B	1,476	17,202	1,013	4,191
	C	1,530	17,041	1,010	6,952
3	A	1,479	16,655	0,995	7,863
	B	1,145	17,329	1,000	8,228
	C	1,237	17,870	1,041	8,058
4	A	1,494	16,453	1,005	7,865
	B	1,486	15,913	0,997	8,826
	C	1,500	15,759	1,004	7,701
5	A	1,497	17,840	1,004	7,044
	B	1,500	17,340	1,017	7,267
	C	1,518	18,789	1,012	6,889

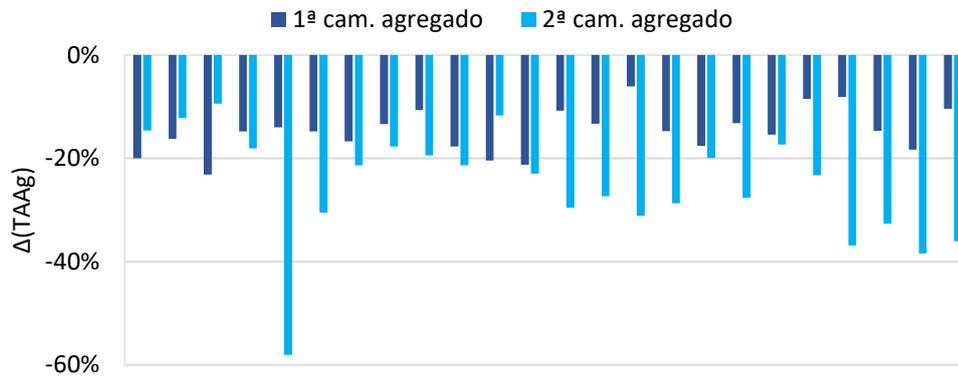
continua

conclusão

Amostra	Réplica	1ª cam. emulsão	1ª cam. agregado	2ª cam. emulsão	2ª cam. agregado
		Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)	Tx. Efetiva (L/m ²)	Tx. Efetiva (kg/m ²)
6	A	1,513	17,054	1,017	7,129
	B	1,496	16,487	1,148	8,004
	C	1,627	17,360	1,012	7,233
7	A	1,509	16,915	0,997	8,264
	B	1,487	18,303	1,004	7,675
	C	1,525	18,378	1,020	6,312
8	A	1,479	17,069	0,997	6,734
	B	1,479	16,340	0,991	6,158
	C	1,509	17,920	1,002	6,392
Taxa teórica		1,500	20,000	1,000	10,000
Valor máximo		1,627	18,789	1,148	9,060
Valor mínimo		1,145	15,373	0,991	4,191
Média		1,476	17,049	1,014	7,473
Mediana		1,496	17,048	1,004	7,688
Desvio Padrão		0,095	0,860	0,031	1,074
Coef. Variação (%)		6,41%	5,04%	3,06%	14,37%

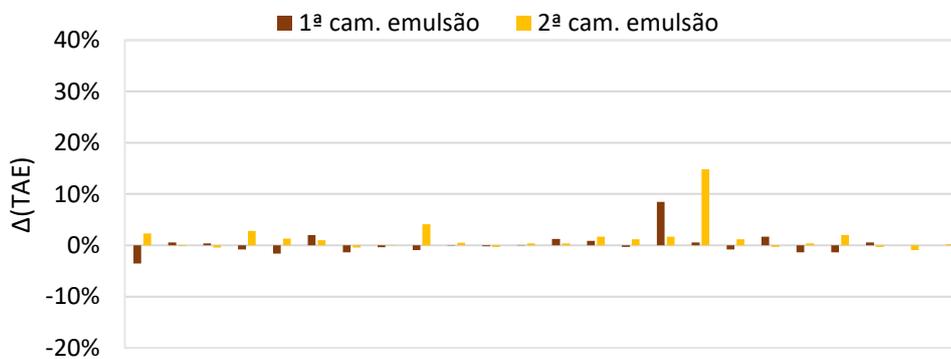
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 59 - Diferença entre taxa teórica e efetiva de agregado pelo DNIT

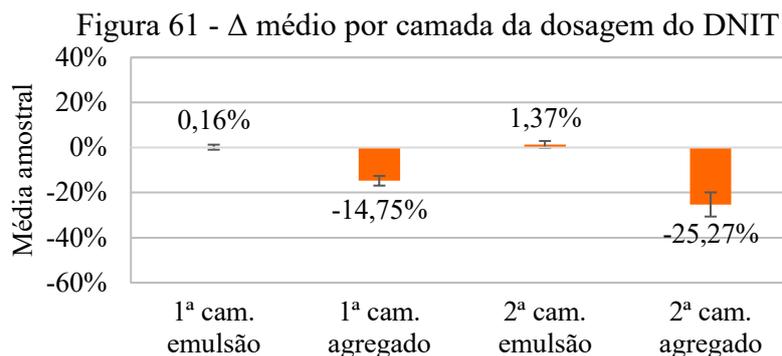


Fonte: elaborada pela autora.

Figura 60 - Diferença entre taxa teórica e efetiva de emulsão pelo DNIT



Fonte: elaborada pela autora.



Fonte: elaborada pela autora.

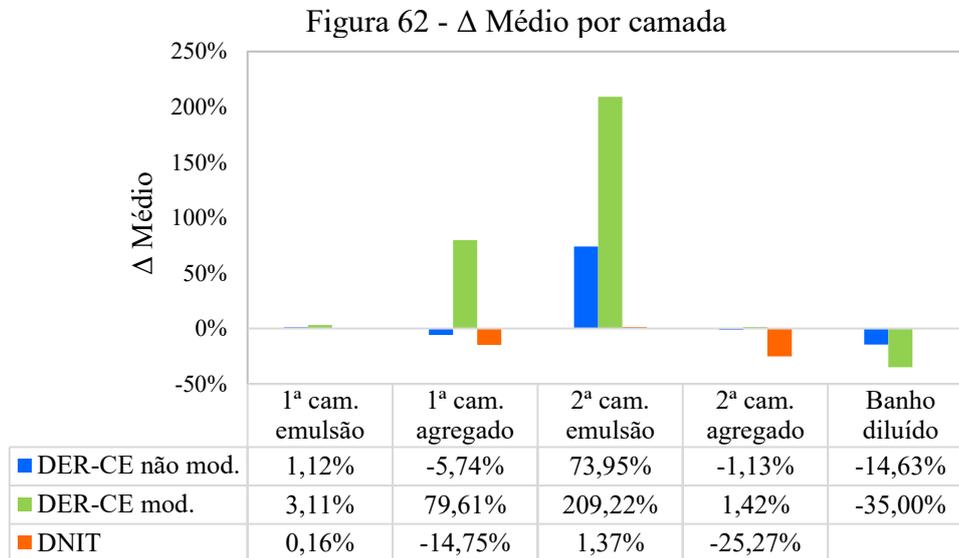
Notou-se ainda uma elevada taxa de aplicação da emulsão na 2ª camada quando comparada ao método do DER-CE, o que pode ser inclusive mais adequada ao serviço, já que foi o principal problema do método de dosagem anterior. Quanto à 2ª camada de agregado, verificou-se que a quantidade recomendada gerou sobreposição de grãos e que nem todos esses aderiram ao revestimento. Enfim, após a cura verificaram-se muitos grãos soltos na superfície, indicando que a 2ª TAAg foi superior (25,27%) ao que era necessário para o CP ou que a 2ª TAE foi insuficiente para “envolver” os grãos.

No que se refere às especificações do DNIT, concluiu-se que elas estão desatualizadas quanto às taxas de aplicação de agregado, já que ambas foram super dosadas e não foi possível confeccionar corpos de prova com as taxas preconizadas. As TAE de ambas as camadas apresentaram baixa discrepância entre os valores teóricos e efetivos. Uma diferença considerável entre as especificações estudadas é que a do DNIT suprime a necessidade de aplicação do banho diluído de emulsão acima do tratamento, cuja função é de promover a coesão superficial e de propiciar uma superfície mais escura para a etapa de sinalização.

Para fins de comparação plotou-se o gráfico da Figura 62 incluindo o Δ de todas as dosagens. A 1ª camada de emulsão foi a que apresentou menores discrepâncias, o que era de se esperar, pois é difícil identificar se a quantidade aplicada foi a correta ou não sem a existência de uma camada de agregados que precise ser recoberta. Em relação à 1ª camada de agregado, supõe-se que o método da bandeja não é repetível, pois apresentou grande discrepância para a dosagem com o agregado modificado e baixa para o não modificado.

Quanto à 2ª camada de aplicação de emulsão, ambas as dosagens pelo DER-CE apresentaram uma superdosagem significativa, indicando que essa taxa deve ser reavaliada no método proposto a fim de considerar outras variáveis, tais como o tamanho da partícula de agregado, a absorção do agregado, etc. No que se refere à 2ª camada de agregado, o dado mais marcante é o da superdosagem ocorrida no método do DNIT, que se refletiu no baixo

desempenho quanto à perda de agregado apresentado na seção seguinte. A taxa de aplicação do banho diluído também pode ser questionada, já que se mostrou difícil moldar corpos de prova com uma taxa tão elevada.



Fonte: elaborada pela autora.

4.2.2. *WTAT adaptado*

Os resultados médios (para cada variável foram moldados 3 CPs) dos ensaios WTAT para cada combinação de variáveis (temperatura de cura – temperatura de aplicação da emulsão) foram organizados na Tabela 19 e podem ser visualizados no gráfico da Figura 63. A nomenclatura das amostras foi composta pela indicação do método de dosagem proposto (DER-CE, DNIT e DER-CE com agregado modificado) e da temperatura de emulsão aplicada (46° ou 58°C).

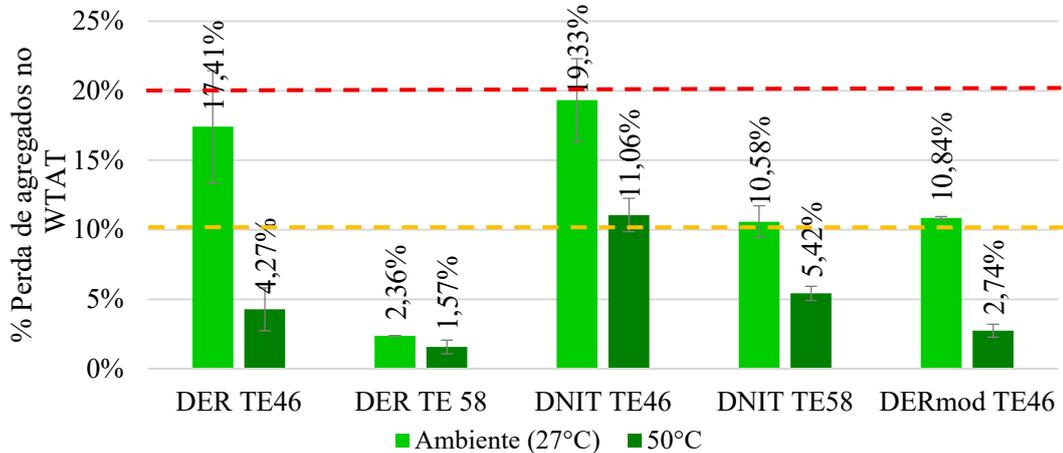
Nos gráficos de perda de agregado apresentados no presente estudo foram inseridas as faixas de previsão de desempenho recomendadas por Pereira (2013) citadas na seção 2.3.1 do presente estudo, representando o limite do “muito bom” a linha amarela pontilhada e do “bom” a linha vermelha pontilhada. Os resultados obtidos dos 3 CPs para cada variável investigada podem ser visualizados no Apêndice D.

Tabela 19 - Resultados da perda de agregado no WTAT

Dosagem	Temperatura		Perda média no WTAT (%)	Desvio padrão
	Cura	Emulsão		
DER-CE	Ambiente (27°C)	46°C	17,41	0,0809
		58°C	2,36	0,0005
	50°C	46°C	4,27	0,0308
		58°C	1,57	0,0098
DNIT	Ambiente (27°C)	46°C	19,33	0,0597
		58°C	10,58	0,0229
	50°C	46°C	11,06	0,0240
		58°C	5,42	0,0102
DER-CE Ag. Modificado	Ambiente (27°C)	46°C	10,84	0,0022
	50°C	46°C	2,74	0,0092

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 63 - Gráfico de perda média no WTAT



Fonte: elaborada pela autora.

Analisando inicialmente os resultados por dosagem, percebeu-se que os CPs moldados pela dosagem do DNIT apresentaram perda mais elevada que os do DER-CE em todas as réplicas. Isso posto, ao analisar conjuntamente as taxas de dosagem de cada especificação, verificaram-se resultados condizentes, pois para TAAg maiores verificaram-se maiores percentuais de perda no WTAT.

No que tange à temperatura de cura, notou-se que as amostras curadas a 50°C apresentaram perda menor que as curadas em temperatura ambiente (aproximadamente 27°C). Esses resultados indicam que o aquecimento do tratamento após a construção é desejável, pois fortaleceria a interação entre o agregado e a emulsão asfáltica. Em locais de clima quente, o aquecimento do revestimento ocorre naturalmente pela exposição solar, indicando ser o clima mais propício para a construção de TSPs. Em contraponto, em locais frios, faz-se necessário um maior controle em cada etapa da construção desse tipo de revestimento, observando outros

fatores que podem gerar a perda dos grãos, como a limpeza dos agregados, a presença de água, a compactação, etc.

Quanto à temperatura de aplicação da emulsão, percebeu-se que amostras de mesma dosagem, submetidas à mesma temperatura de cura apresentaram menor perda quando o aquecimento da emulsão no momento da aplicação foi maior, no caso à 58°C. No entanto, ao analisar as amostras curadas em temperatura ambiente, nota-se uma discrepância maior nos resultados, pois a emulsão aquecida a 46°C apresentou perda muito superior à aquecida a 58°C. Tal fato indica que o aquecimento muito elevado da emulsão pode ser desnecessário quanto o processo de cura ocorre em condições de temperatura mais elevadas, que já contribuem para a potencialização da interação entre elementos. No entanto, em temperaturas mais baixas, o aquecimento da emulsão torna-se indispensável para o bom funcionamento do revestimento.

De acordo com os valores obtidos de perda classificaram-se as amostras pelos critérios de desempenho de Pereira (2013) e de aceitabilidade de Adams (2014) (TABELA 20). Em geral, percebeu-se que, por Pereira (2013), as amostras apresentaram desempenho bom e muito bom, e por Adams (2014) a maioria das amostras apresentou perda aceitável para aplicação em vias de alto volume de tráfego.

Tabela 20 - Critérios de aceitabilidade

Identificação	Perda média no WTAT (%)	Critério	
		Pereira (2013)	Adams (2014)
DER TE46 TCamb	17,41	Bom	Médio volume de tráfego
DER TE58 TCamb	2,36	Muito bom	Alto volume de tráfego
DER TE46 TC50	4,27	Muito bom	Alto volume de tráfego
DER TE58 TC50	1,57	Muito bom	Alto volume de tráfego
DNIT TE46 TCamb	19,33	Bom	Baixo volume de tráfego
DNIT TE58 TCamb	10,58	Bom	Alto volume de tráfego
DNIT TE46 TC50	11,06	Bom	Alto volume de tráfego
DNIT TE46 TC50	5,42	Muito bom	Alto volume de tráfego
DERmod TE46 TCamb	10,84	Bom	Alto volume de tráfego
DERmod TE46 TC50	2,74	Muito bom	Alto volume de tráfego

Fonte: elaborada pela autora.

No que se refere à uniformidade, observou-se que a média da perda de agregados dos CPs moldados com o agregado modificado foi 37,7% inferior para amostras curadas à temperatura ambiente e 35,83% inferior para as amostras curadas à 50°C. Apesar de resultados satisfatórios para os agregados modificados, a perda de agregados ainda foi maior que as dos CPs moldados com emulsão aquecida à 58°C. Tal resultado indica que a uniformidade dos grãos

tem influência quanto à ocorrência da perda de agregados, no entanto a temperatura de aplicação de emulsão mais elevada traz ainda mais benefícios ao desempenho de um TSP.

Um detalhe importante quanto aos dados é o elevado desvio padrão observado nas amostras com temperatura de aplicação da emulsão de 46°C e temperatura de cura ambiente, para os CPs moldados com o agregado não modificado, em contraponto ao baixíssimo desvio padrão para os CPs moldados com o agregado modificado (mais uniforme). Tal fenômeno indica que uma maior uniformidade dos grãos ocasiona menor variabilidade nos CPs, tornando seus resultados mais confiáveis. Caso fosse recomendado um método de ensaio para avaliação da perda de agregado, sugere-se que a quantidade de réplicas para graduações mais uniformes possa ser menor, por exemplo duas, que para graduações menos uniformes, que geram maior variabilidade nos resultados.

Escolheram-se as amostras moldadas pela especificação do DER-CE, com temperatura de aplicação da emulsão a 46°C e temperatura de cura de 50°C para avaliação da relação entre a perda de agregado efetiva e a perda de agregado teórica, por acreditar que essas temperaturas seriam as mais usuais de campo. Denominou-se amostra 1 as moldadas com agregado não modificado e como amostra 2 as moldadas com o agregado modificado.

Após a análise dos resultados, a otimização da perda de agregados estimada foi realizada em quatro cenários, sendo os cenários 1 e 2 correspondentes aos CPs moldados com temperatura de aplicação da emulsão à 46°C e temperatura de cura ambiente e os cenários 3 e 4 aos moldados com temperatura de aplicação da emulsão à 46°C, porém com temperatura de cura à 50°C. Nos cenários 2 e 4 incluiu-se uma restrição nos coeficientes da regressão, em que se impôs que a perda de agregados dependia exclusivamente das perdas teóricas, ou seja, o somatório dos coeficiente “a” e “b” foi definido como 1 para esses cenários. Na Tabela 21 podem ser visualizados os coeficientes “a” e “b” para cada cenário, assim como o seu erro associado.

Tabela 21 - Modelos para previsão da perda de agregados efetiva pelo WTAT

Cenário	Identificação	Coeficientes		Modelo	Erro (%)
		a	b	$a \times Pt_{1^{cam}} + b \times Pt_{2^{cam}}$	
1	TE46 TCamb	0,0000	2,3213	$0,0 \times Pt_{1^{cam}} + 2,3213 \times Pt_{2^{cam}}$	2,019
2	TE46 TCamb c/ restrição	0,0000	1,0000	$0,0 \times Pt_{1^{cam}} + 1 \times Pt_{2^{cam}}$	16,950
3	TE46 TC50	0,0000	0,5698	$0,0 \times Pt_{1^{cam}} + 0,5698 \times Pt_{2^{cam}}$	0,571
4	TE46 TC50 c/ restrição	0,6453	0,3547	$0,6453 \times Pt_{1^{cam}} + 0,3547 \times Pt_{2^{cam}}$	1,388

Fonte: elaborada pela autora.

Comparando individualmente o cenário 1 e 2, verificou-se que a imposição da restrição não gerou um modelo satisfatório, já que o erro passou de 2,019% para 16,95%. Dessa forma, o modelo do cenário 1 seria o mais adequado. A partir do resultado obtido, entende-se que para as condições de temperatura consideradas apenas a 2ª camada de agregados teria influência na perda de agregados, sendo ainda majorada por um coeficiente de 2,3213. Fisicamente esse resultado poderia ser justificado pelo WTAT ser um ensaio bastante abrasivo em relação ao que de fato ocorre em campo.

Já em relação aos cenários 3 e 4, ambos apresentaram erro percentual baixo, indicando adequação entre a perda estimada e a efetiva. Apesar disso, o cenário 4 com restrição ainda apresentou erro aproximadamente três vezes maior que o modelo sem restrição. Matematicamente, o resultado obtido no cenário 3 representa que a perda teórica da 2ª camada deve ser minorada por um coeficiente 0,5698 para se obter a perda de efetiva. Essa diferença quanto ao resultado do cenário 2 poderia ser justificada pela influência do tempo de cura, que a temperatura ambiente piora o desempenho do revestimento, enquanto que a 50°C provoca uma melhoria.

Os modelos consideraram que a perda efetiva era função exclusiva da perda teórica, no entanto na realidade entende-se que outros fatores como a taxa de aplicação do agregado, a compactação, o tipo de emulsão, o tempo de cura, entre outros, podem influenciar nesse resultado. É evidente que os modelos propostos não podem ser extrapolados para a obtenção da perda de agregados em qualquer situação, já que se verificou pelas análises anteriores que fatores como a temperatura de cura e da emulsão influenciam na ocorrência desse defeito. Além disso, a teoria do PUC proposta originalmente por Lee e Kim (2009) considera uma perda de agregados obtida a partir de um simulador de tráfego de laboratório, e não pelo equipamento WTAT como foi a medida no presente estudo.

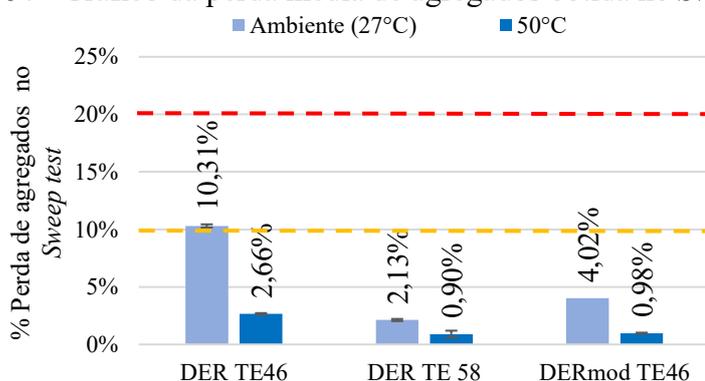
4.2.3. Sweep test adaptado

Os resultados de perda de agregado média obtidos no *Sweep test* adaptado para cada combinação de variáveis (temperatura de cura – temperatura de aplicação da emulsão) calculados pela Equação (12) foram organizados na Tabela 22 e plotados no gráfico da Figura 64. Os resultados individuais obtidos para cada um dos três CPs, em função de cada variável analisada, podem ser visualizados no Apêndice D.

Tabela 22 - Resultados da perda de agregados obtida no *Sweep test*

Dosagem	Temperatura		Perda média no Sweep (%)	Desvio padrão
	Cura	Emulsão		
DER-CE	Ambiente (aprox. 27°C)	46°C	10,31	0,0027
		58°C	2,13	0,0018
	50°C	46°C	2,66	0,0015
		58°C	0,90	0,0061
DER-CE uniforme	Ambiente (aprox. 27°C)	46°C	4,02	0,0032
	50°C	46°C	0,98	0,0009

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 64 - Gráfico da perda média de agregados obtida no *Sweep test*

Fonte: elaborada pela autora.

No que tange à temperatura de cura e de aplicação da emulsão, notou-se que as amostras apresentaram uma tendência semelhante à observada no WTAT, ou seja, que temperaturas de cura e de aplicação da emulsão mais elevadas diminuem a perda de agregados no revestimento. De acordo com as faixas de desempenho recomendadas por Pereira (2013) as amostras apresentaram desempenho muito bom. No entanto, essas faixas foram idealizadas para o WTAT e podem não ser aplicáveis aos resultados obtidos no *Sweep test*.

Sugere-se então a diminuição dos limites propostos por Pereira (2013) quando a perda for medida pelo *Sweep test*, sendo considerado como desempenho “muito bom” $PA_{\text{sweep}} < 6\%$, desempenho “bom” $6\% \leq PA_{\text{sweep}} < 12\%$, desempenho “regular” $12\% \leq PA_{\text{sweep}} < 18\%$ e desempenho “ruim” $PA_{\text{sweep}} \geq 18\%$. Assim, com exceção da amostra DER TE46 TCamb, que apresentou desempenho “bom”, as demais amostras apresentaram desempenho “muito bom”.

Além disso, observou-se que a perda média para os CPs moldados com o agregado modificado e curados à 50°C foi semelhante à perda média dos CPs cuja temperatura de aplicação da emulsão foi de 58°C com o agregado não modificado. Isso pode indicar que a utilização de agregados mais uniformes pode melhorar o desempenho do revestimento assim como o aumento da temperatura de aplicação da emulsão.

Igualmente ao realizado para o WTAT, selecionaram-se amostras moldadas pela especificação do DER-CE, com temperatura de aplicação da emulsão a 46°C e temperatura de cura de 50°C para avaliação da relação entre a perda de agregado efetiva no *Sweep test* e a perda de agregado teórica. Denominou-se amostra 1 as moldadas com agregado não modificado e como amostra 2 as moldadas com o agregado modificado. Da mesma forma, foram definidos oito modelos lineares variando o coeficiente de contribuição da perda teórica da 1ª camada ($Pt_{1^{a}cam}$) e da 2ª camada ($Pt_{2^{a}cam}$) (TABELA 23).

Analogamente ao realizado para os CPs submetidos ao WTAT, traçaram-se quatro cenários para estimativa da perda de agregados, sendo os cenários 1 e 2 correspondentes aos CPs moldados com temperatura de aplicação da emulsão à 46°C e temperatura de cura ambiente e os cenários 3 e 4 aos moldados com temperatura de aplicação da emulsão à 46°C, porém com temperatura de cura à 50°C. Nos cenários 2 e 4 incluiu-se uma restrição nos coeficientes da regressão, em que se impôs que a perda de agregados dependia exclusivamente das perdas teóricas, ou seja, o somatório dos coeficiente “a” e “b” foi definido como 1 para esses cenários. Na Tabela 23 podem ser visualizados os coeficientes “a” e “b” para cada cenário, assim como o seu erro associado.

Tabela 23 - Modelos para previsão da perda de agregados efetiva pelo *Sweep test*

Cenário	Identificação	Coeficientes		Modelo	Erro (%)
		a	b	$a \times Pt_{1^{a}cam} + b \times Pt_{2^{a}cam}$	
1	TE46 Tcamb	0,0000	1,3743	$0 \times Pt_{1^{a}cam} + 1,3743 \times Pt_{2^{a}cam}$	1,201
2	TE46 Tcamb c/ restrição	0,0000	1,0000	$0 \times Pt_{1^{a}cam} + 1 \times Pt_{2^{a}cam}$	3,029
3	TE46 TC50	0,2887	0,2578	$0,2887 \times Pt_{1^{a}cam} + 0,2578 \times Pt_{2^{a}cam}$	0,000
4	TE46 TC50 c/ restrição	0,9689	0,0311	$0,9689 \times Pt_{1^{a}cam} + 0,0311 \times Pt_{2^{a}cam}$	0,862

Fonte: elaborada pela autora.

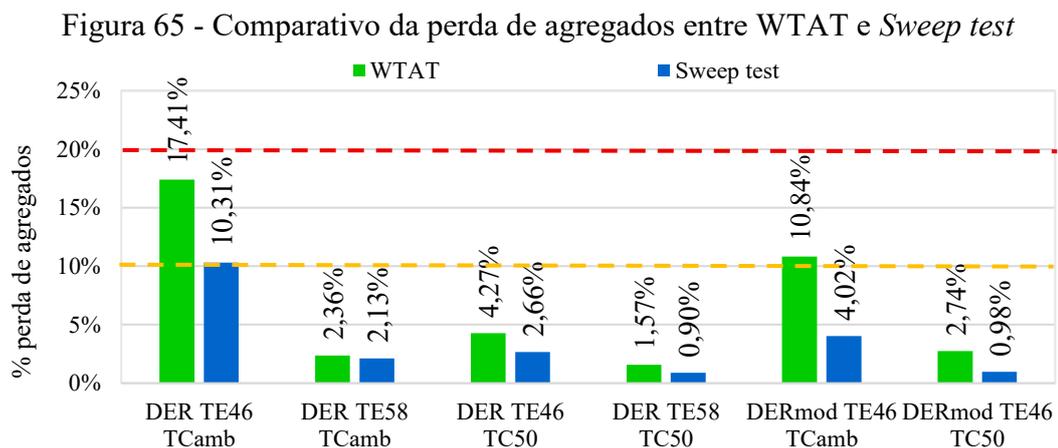
Comparando os cenários 1 e 2, observou-se que a inclusão da restrição provocou um aumento no erro, passando de 1,201% no cenário 1 para 3,029% no cenário 2. Dessa forma, o modelo do cenário 1 seria o mais adequado. A partir do resultado obtido, entende-se que, para as condições de temperatura consideradas, apenas a 2ª camada de agregados teria influência na perda de agregados, sendo ainda majorada por um coeficiente de 1,3743. Entende-se que o modelo é coerente, pois o coeficiente de majoração obtido para o *Sweep test* (1,3743) é inferior ao do WTAT, provavelmente devido a menor severidade do *Sweep test*.

Já em relação aos cenários 3 e 4, ambos apresentaram erro percentual baixo, indicando adequação entre a perda estimada e a efetiva. Apesar disso, o cenário 4 com restrição

ainda apresentou erro maior que o modelo sem restrição. Fisicamente, os resultados indicam que a uniformidade de ambas as camadas tem influência no desempenho do revestimento. Essa diferença, quanto ao resultado do cenário 2 poderia ser justificada pela influência da temperatura de cura, pois quando ocorre a ambiente piora o desempenho do revestimento, enquanto que a 50°C provoca uma melhoria.

Os modelos consideraram que a perda efetiva era função exclusiva da perda teórica, no entanto na realidade entende-se que outros fatores como a taxa de aplicação do agregado, a compactação, o tipo de emulsão, o tempo de cura, entre outros, podem influenciar nesse resultado. É evidente que os modelos propostos não podem ser extrapolados para a obtenção da perda de agregados em qualquer situação, já que se verificou pelas análises anteriores que fatores como a temperatura de cura e da emulsão influenciam na ocorrência desse defeito. Além disso, a teoria do PUC proposta originalmente por Lee e Kim (2009) considera uma perda de agregados obtida a partir de um simulador de tráfego de laboratório, e não pelo equipamento WTAT como foi a medida no presente estudo.

Um gráfico comparativo de perda de agregados obtida em cada um dos ensaios pode ser observado no gráfico da Figura 65, em que além da indicação da dosagem e da temperatura da emulsão, incluiu-se a nomenclatura referente à temperatura de cura (50°C ou Ambiente).



Fonte: elaborada pela autora.

Em geral, a perda de agregados obtida no *Sweep test* foi inferior à obtida no WTAT para todas as condições de análise, como já era de se esperar pelo caráter menos abrasivo da escova de nylon com a superfície do revestimento. Além disso, o *Sweep test* é realizado na amostra seca, enquanto no ensaio WTAT a amostra é submersa em água. É importante ressaltar

também que diferente do recomendado na ASTM D7000 para o *Sweep test*, no ensaio WTAT não se majora a perda considerando a parcela no CP que não é solicitada, indicando que a perda obtida no WTAT poderia ser de fato ainda maior que as apresentadas neste estudo.

A partir dos dados obtidos, foi feito um ranking com base no desempenho das amostras nos ensaios de perda de agregado, apresentado na Tabela 24. Para ambos os casos a amostra com melhor desempenho foi a DER TE58 TC 50, apresentando os menores percentuais de perda. Da mesma forma, a amostra DER TE46 TCamb apresentou resultados de perda mais elevados em ambas os ensaios, sendo inferior apenas quando comparada à amostra DNIT TE46 TCamb no WTAT. Apesar disso, recomenda-se como melhor solução a DERmod TE46 TC50, que foi 3º lugar no ranking do WTAT e 2º lugar no ranking do *Sweep test*. Essa amostra apresentou desempenho apenas ligeiramente inferior ao da amostra DER TE58 TC50, porém a nível de execução seria uma alternativa mais econômica.

Tabela 24 - Ranqueamento com base na perda de agregados

ID	Perda média no WTAT (%)	Ranking	Perda média no <i>Sweep test</i> (%)	Ranking
DER TE46 TCamb	17,406	9º	10,308	6º
DER TE58 TCamb	2,363	2º	2,128	3º
DER TE46 TC50	4,273	4º	2,656	4º
DER TE58 TC50	1,569	1º	0,896	1º
DNIT TE46 TCamb	19,327	10º	-	-
DNIT TE58 TCamb	10,582	6º	-	-
DNIT TE46 TC50	11,061	8º	-	-
DNIT TE46 TC50	5,418%	5º	-	-
DERmod TE46 TCamb	10,837%	7º	4,021%	5º
DERmod TE46 TC50	2,736%	3º	0,980%	2º

Fonte: elaborada pela autora.

Devido à tendência semelhante dos resultados, acredita-se que ambos os ensaios poderiam ser incluídos num método de avaliação de desempenho de TSPs, considerando diferentes valores de fator campo-laboratório.

4.3. Fase III do programa experimental – Ensaios de avaliação da exsudação

O ensaio LWT adaptado foi idealizado para avaliar a ocorrência de exsudação, no entanto realizou-se a pesagem dos CPs antes e após o ensaio para garantir que não estava ocorrendo a perda de agregado. Sendo assim, resolveu-se apresentar aqui a perda obtida no LWT somente para validar essa hipótese.

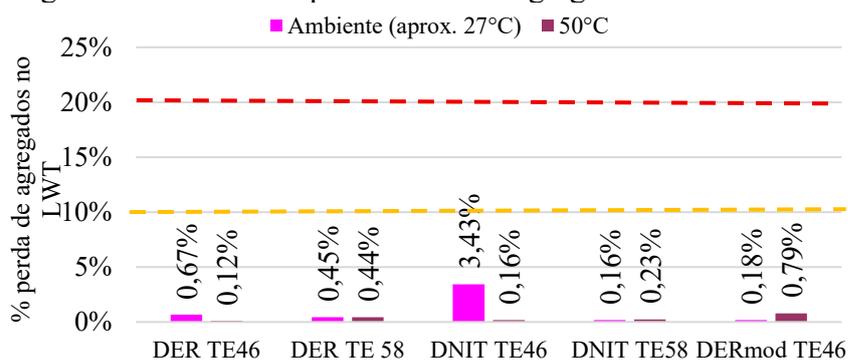
Os resultados da perda de agregado (TABELA 25) indicam percentual de perda de agregados inferior a 1% para todas as amostras, com exceção da dosada pelo DNIT com cura à temperatura ambiente e aplicação da emulsão à 46°C. Tal fato é justificável pelos resultados anteriores obtidos no WTAT e pela TAAg excessiva proposta pelo DNIT. No gráfico da Figura 66 podem ser visualizados os resultados obtidos. Assim como para os dados dos ensaios anteriores, os valores de perda obtidos para cada um dos 30 CPs foram organizados na Tabela 33 do Apêndice D.

Tabela 25 - Resultados da perda de agregado obtida no LWT

Dosagem	Temperatura		Perda média no LWT (%)	Desvio padrão
	Cura	Emulsão		
DER-CE	Ambiente (aprox. 27°C)	46°C	0,67	0,0006
		58°C	0,45	0,0011
	50°C	46°C	0,12	0,0005
		58°C	0,44	0,0020
DNIT	Ambiente (aprox. 27°C)	46°C	3,43	0,0052
		58°C	0,16	0,0014
	50°C	46°C	0,16	0,0011
		58°C	0,23	0,0013
DER-CE uniforme	Ambiente (aprox. 27°C)	46°C	0,18	0,0007
	50°C	46°C	0,79	0,0045

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 66 - Gráfico da perda média de agregados obtida no LWT



Fonte: elaborada pela autora.

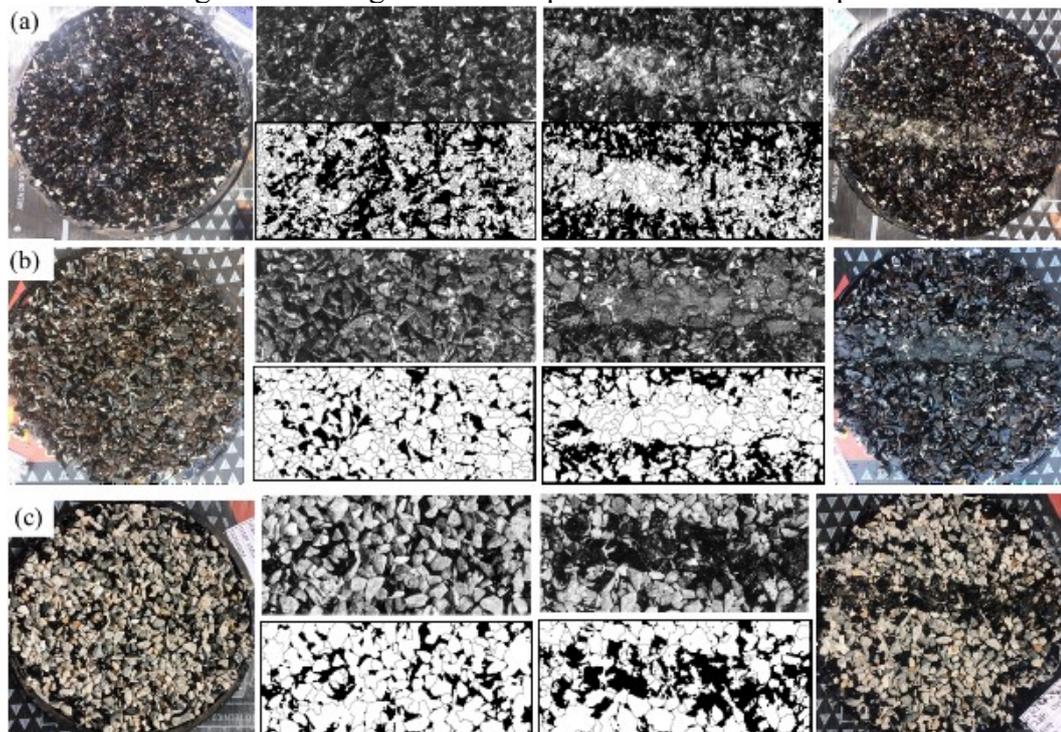
4.3.1. Processamento digital de imagens

Apesar de simples, a adaptação do ensaio LWT se mostrou limitada para as dosagens escolhidas neste estudo, pois a especificação do DER-CE recomenda a aplicação do banho diluído para finalizar o revestimento, o que dificultou a identificação das áreas exsudadas

por meio do PDI. Observou-se que, em muitas amostras, o ensaio provocou uma quebra dos grãos dificultando a identificação das áreas exsudadas, devido à presença excessiva de pó. Logo, a maioria das réplicas dosadas pelo método do DER-CE apresentou resultados de exsudação negativa, justamente pelo fato do pó dos agregados levar a supor que houve uma diminuição de ligante na superfície (FIGURA 67a e 67b). Apesar de alguns conjuntos de amostras moldadas pela especificação do DER-CE terem apresentado percentual de exsudação positivo, considerou-se que seus resultados são comparáveis apenas com os corpos de prova moldados nas mesmas condições.

Já nos corpos de prova moldados de acordo com a especificação do DNIT sem aplicação do banho diluído, que eram semelhantes aos produzidos por Chaturabong (2014), foi possível identificar as áreas com excesso de ligante (FIGURA 67c). Mesmo esses corpos de prova sofreram com a quebra de agregados em algumas réplicas, como as do DNIT TE58 TCamb, que também apresentaram percentual de exsudação negativo. A nomenclatura aqui utilizada foi a mesma dos ensaios de perda de agregado, composta pelo método de dosagem (DER-CE, DNIT e DER-CE com agregado modificado), pela temperatura de aplicação da emulsão “TE” (46°C ou 58°C) e pela temperatura de cura “TC” (50° ou ambiente).

Figura 67 - Imagens antes e após o ensaio LWT adaptado



Fonte: elaborada pela autora.

(a) DER TE46 TC50; (b) DERmod TE46 TC50; (c) DNIT TE46 TCamb.

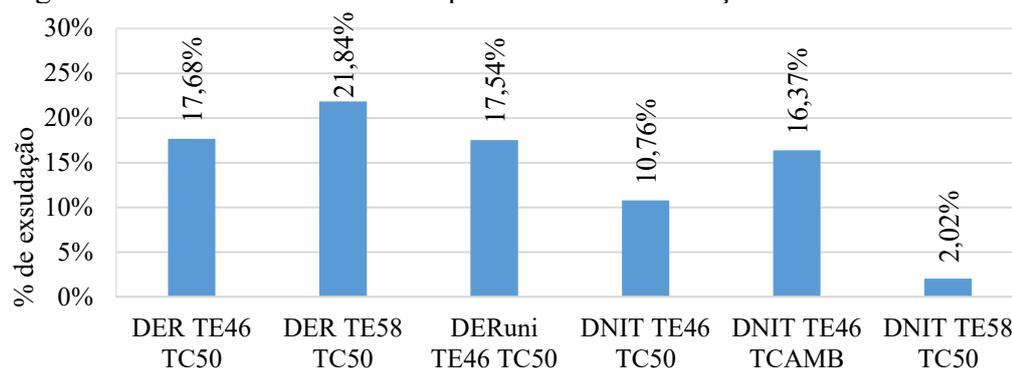
De acordo com o procedimento proposto por Chaturabong (2014), calculou-se o % de exsudação a partir dos resultados do PDI antes e após o ensaio no LWT por 50 ciclos (TABELA 26). A partir dos resultados válidos, plotou-se o gráfico da Figura 68 para melhor visualização, considerando como resultado válido o das amostras que não apresentaram % de exsudação negativo em quaisquer das réplicas ensaiadas. Presumiu-se que a diferença entre os processos construtivos quanto à execução do banho diluído não possibilitou uma comparação direta entre os corpos de prova do DER-CE e do DNIT, logo, as análises foram separadas para cada um dos grupos.

Tabela 26 - Resultado do PDI realizado no iPas2

ID	Réplica	Fração de agregado antes	Fração de agregado depois	% exsudação	Média (%)	Desvio padrão
DER TE46 TC50	1	0,82	0,64	21,95	17,68	0,053
	2	0,75	0,59	21,33		
	3	0,82	0,74	9,76		
DER TE46 TCAMB	1	0,78	0,86	-10,26	-3,47	0,113
	2	0,82	0,71	13,41		
	3	0,81	0,92	-13,58		
DER TE58 TC50	1	0,82	0,55	32,93	21,84	0,074
	2	0,82	0,66	19,51		
	3	0,84	0,73	13,10		
DER TE58 TCAMB	1	0,77	0,71	7,79	0,38	0,049
	2	0,76	0,77	-1,32		
	3	0,75	0,79	-5,33		
DERuni TE46 TC50	1	0,82	0,67	18,29	17,54	0,006
	2	0,84	0,70	16,67		
	3	0,85	0,70	17,65		
DERuni TE46 TCAMB	1	0,79	0,81	-2,53	-11,44	0,086
	2	0,80	0,86	-7,50		
	3	0,70	0,87	-24,29		
DNIT TE46 TC50	1	0,84	0,81	3,57	10,76	0,048
	2	0,82	0,71	13,41		
	3	0,85	0,72	15,29		
DNIT TE46 TCAMB	1	0,74	0,67	9,46	16,37	0,046
	2	0,74	0,60	18,92		
	3	0,82	0,65	20,73		
DNIT TE58 TC50	1	0,83	0,82	1,20	2,02	0,011
	2	0,83	0,80	3,61		
	3	0,80	0,79	1,25		
DNIT TE58 TCAMB	1	0,80	0,77	3,75	-2,69	0,044
	2	0,80	0,82	-2,50		
	3	0,75	0,82	-9,33		

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 68 - Resultados válidos de percentual de exsudação obtida no LWT



Fonte: elaborada pela autora.

Quanto às três amostras dosadas pelo DER-CE, verificou-se que a moldada com agregados mais uniformes apresentou % de exsudação semelhante ao da amostra com agregado não modificado moldado sob mesmas condições de temperatura de emulsão e de cura. Conforme comentado anteriormente, a modificação realizada no agregado previa apenas benefícios quanto à perda de agregado e pouca ou nenhuma influência na exsudação, o que foi ratificado pela análise.

No que se refere à influência da temperatura, notou-se que a amostra DER TE46 TC50 apresentou menor % de exsudação que a DER TE58 TC50. Tal desempenho é oposto ao obtido para a perda de agregado, cujas amostras com emulsão aquecida à 58°C apresentaram menor % de perda de agregado. No entanto, acredita-se que o elevado desvio padrão das réplicas e a pouca discrepância entre as amostras não permitem uma conclusão assertiva sobre a influência da temperatura da emulsão na exsudação para essas amostras.

Já as amostras moldadas pela especificação do DNIT apresentaram um ranking de desempenho semelhante ao obtido nos ensaios de perda de agregado, ou seja, as amostras curadas à 50°C e com emulsão aplicada à 58°C apresentaram menor percentual de exsudação. Mesmo que o desvio padrão das réplicas também seja elevado, pelo fato das amostras do DNIT possibilitarem um PDI mais preciso, acredita-se que os seus resultados apresentam uma tendência mais coerente que com os das amostras do DER.

Além da temperatura, comentou-se na seção 4.2 que as dosagens escolhidas indicaram taxas de ligante insuficientes para um recobrimento mínimo dos agregados e acabaram sendo modificadas a critério do autor para viabilizar a construção dos corpos de prova de TSD. A aplicação de taxas de ligante mais baixas poderiam justificar que, mesmo ocorrendo um afundamento, não se observa um afloramento do ligante, pois este se encontra em falta nas amostras ensaiadas. Pela literatura recomenda-se ainda que o ensaio seja realizado em

temperaturas mais elevadas (CHATURABONG, 2014; HERRINGTON; KODIPPILY; HENNING, 2015; IM, 2013), situação em que é mais propícia a ocorrência de exsudação em campo, o que não foi possível pela falta de uma câmara com temperatura ambiente controlável. As imagens dos corpos de prova antes e após o ensaio LWT adaptado, assim como o PDI correspondente podem ser visualizados por completo no Apêndice E.

4.4. Fase IV do programa experimental – Ensaio complementares

4.4.1. Ensaio de fluência e recuperação múltipla (MSCR)

Os percentuais de recuperação R , as compliâncias não-recuperáveis J_{nr} e as diferenças percentuais R_{diff} e $J_{nr, diff}$ foram organizados na Tabela 27. O maior percentual de recuperação R observado foi na temperatura 46°C sob tensão de $0,1\text{kPa}$, no entanto esse valor só chegou a $4,71\%$. Observa-se ainda que por se tratar de um resíduo de emulsão asfáltica sem nenhum modificador, R é não-nulo apenas para as temperaturas mais baixas. Tais resultados indicam que apenas uma pequena parcela da deformação é recuperável após cada um dos ciclos de fluência e recuperação, ou seja, o acúmulo de deformações plásticas é elevado. Plotou-se o gráfico da Figura 69 com os resultados obtidos para cada temperatura e nível de tensão.

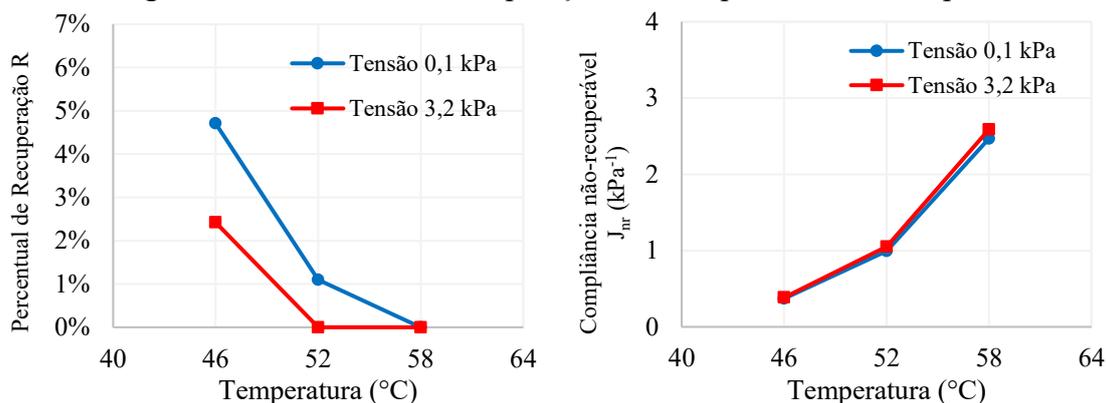
Tabela 27 - Resultados do MSCR para o resíduo da emulsão asfáltica

Temperatura	Nível de tensão	R (%)	J_{nr} (kPa^{-1})	R_{diff} (%)	$J_{nr, diff}$ (%)
46°C	$0,1\text{kPa}$	4,71	0,371	48,57	3,94
46°C	$3,2\text{kPa}$	2,42	0,385		
52°C	$0,1\text{kPa}$	1,10	0,992	-	5,92
52°C	$3,2\text{kPa}$	0,00	1,051		
58°C	$0,1\text{kPa}$	0,00	2,469	-	4,85
58°C	$3,2\text{kPa}$	0,00	2,589		

Fonte: elaborada pela autora.

Da mesma forma, o J_{nr} obtido está dentro dos valores esperados para ligantes não modificados. Os resultados obtidos foram muito semelhantes nos diferentes níveis de tensões devido às baixas deformações em temperaturas mais baixas (FIGURA 69). Além disso, maiores alterações nessa variável podem ser melhor observadas quando avaliados tipos diferentes de ligantes.

Figura 69 - Percentual de recuperação R e compliância não-recuperável J_{nr}



Fonte: elaborada pela autora.

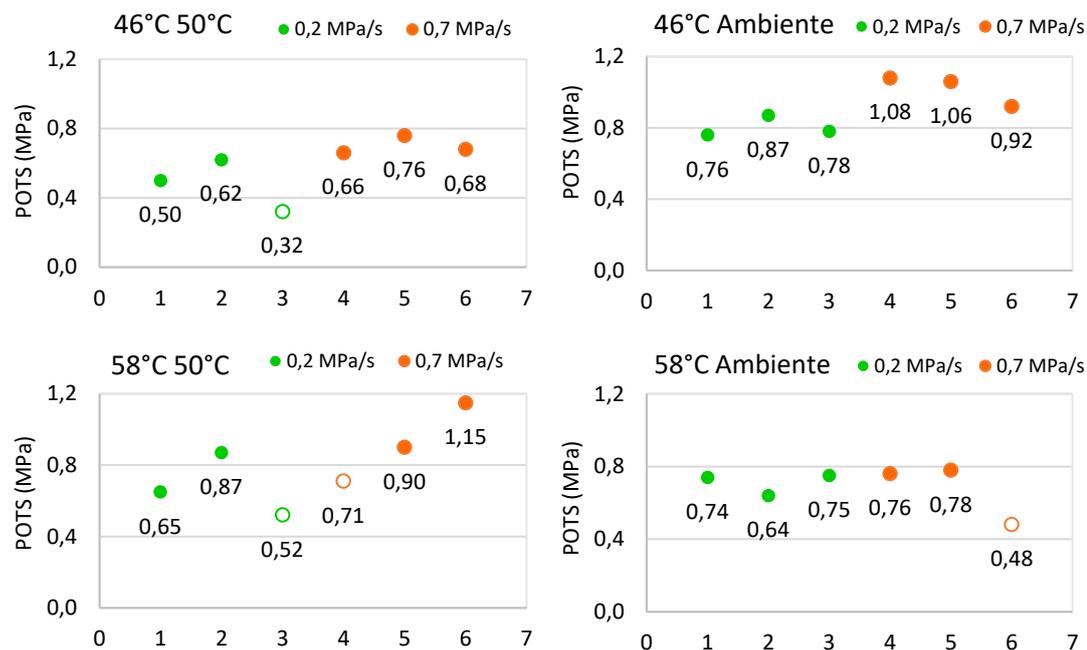
Como citado por Adams (2014) e preconizado pela PRS para emulsões asfálticas (KIM *et al.*, 2017) o J_{nr} pode ser associado no contexto dos TSPs como um parâmetro de desempenho associado à ocorrência de exsudação. Então, menores valores de J_{nr} podem ser compreendidos como uma menor suscetibilidade da emulsão a sofrer exsudação. Verificou-se que o resíduo da emulsão apresentou resultado satisfatório para aplicação em qualquer nível de tráfego, já que o limite mais rigoroso da PRS sugere um J_{nr} máximo de $3,5\text{kPa}^{-1}$ para vias de alto volume de tráfego, bastante superior aos resultados obtidos.

Observou-se que o R_{diff} da amostra à 46°C foi elevado (48,57%), indicando grande sensibilidade dessa propriedade ao se elevar o nível de tensão. Alguns dos valores de R_{diff} não foram obtidos devido ao percentual nulo de recuperação R em certos níveis de temperatura e tensão, que geram um valor constante de 100% ou nem mesmo possibilitam o cálculo. Em nenhum dos níveis de temperatura o $J_{nr-diff}$, ultrapassou o limite de 75% indicando que a sua sensibilidade não é excessiva.

4.4.2. Ensaio ABS

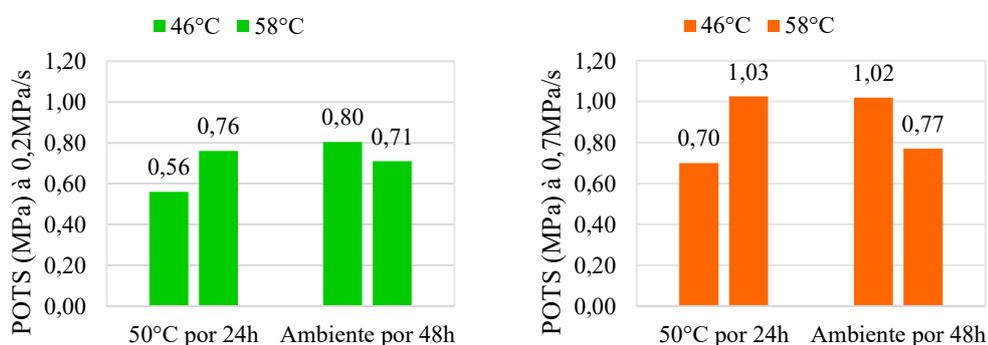
No gráfico da Figura 70 plotaram-se os valores obtidos de tensão de arrancamento (POTS) para cada réplica avaliada. De acordo com o recomendado na AASHTO TP 91, as réplicas que apresentaram falha de coesão na interface do *dolly* com o ligante foram desconsideradas e foram representadas nos gráficos com os pontos sem preenchimento. Essas réplicas não foram consideradas para o cálculo do POTS médio apresentado no gráfico da Figura 71.

Figura 70 - Tensão de arrancamento para cada conjunto de amostras obtida no ensaio ABS



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 71 - Tensão de arrancamento média obtida pelo ensaio ABS



Fonte: elaborada pela autora.

Observou-se pelos resultados obtidos que as tensões de arrancamento obtidas à uma taxa de aplicação de 0,2MPa/s foram inferiores às obtidas à uma taxa de 0,7 MPa/s, assim como o concluído por Huang e Lv (2017). Assim, a tendência de comportamento foi semelhante. Desse modo, para fins de especificação, serão considerados os resultados obtidos pela taxa 0,7MPa/s, por ser a recomendada na AASHTO TP 91. À luz das faixas de desempenho recomendadas por Adams (2014), a emulsão em estudo apresentou desempenho satisfatório para aplicação em qualquer volume de tráfego especificado.

Analisando as amostras curadas à 50°C por 24h, percebeu-se que um maior aquecimento da emulsão (58°C) provocou um aumento na tensão de arrancamento, seguindo a

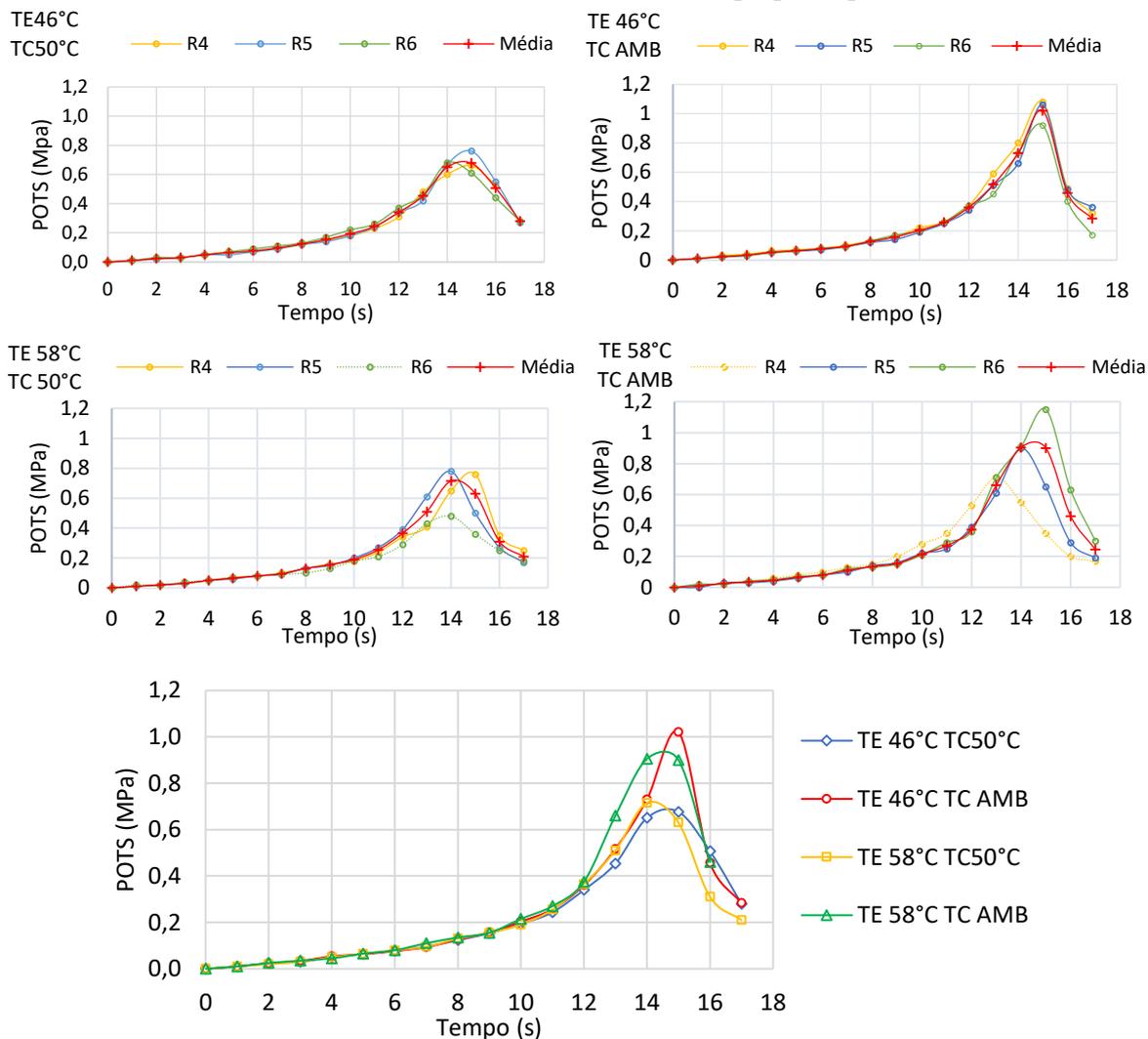
tendência obtida nos ensaios de perda de agregado. Já para as amostras curadas a temperatura ambiente por 48h, observou-se uma inversão e a tensão de arrancamento foi superior para a amostra menos aquecida (46°C), sendo contrário ao esperado pelos ensaios de perda de agregados.

Tais diferenças podem ser explicadas pelo fato do ensaio de perda de agregados ser resultado de um conjunto de fatores, nos quais se inclui a adesividade. Nas amostras de TSP existem aspectos como a interação entre os grãos, a forma, os vazios existentes, entre outros, que não podem ser comparados diretamente com somente a interação observada no ensaio ABS.

Além disso, há de se considerar o efeito do calor armazenado na própria rocha. Acredita-se que ao se esperar o tempo de estabilização recomendado na norma de 1h após a aplicação dos *dollies* no substrato, as amostras curadas à 50°C ainda apresentavam calor residual armazenado, indicando que o ensaio foi realizado em diferentes temperaturas em relação às amostras curadas a temperatura ambiente.

Outra possível explicação para os resultados obtidos é a heterogeneidade da amostra de agregado. Como foi comprovado pelo ensaio de fluorescência de raios-x, existem duas frações bem distintas do agregado no que concerne à composição química. Acredita-se que o ensaio ABS realizado em uma parte da rocha com predominância da fração clara resulte numa POTS inferior à obtida na fração escura, justamente devido às interações químicas que podem afetar a adesividade.

No gráfico da Figura 72, plotaram-se as curvas POTS *versus* tempo para cada réplica, assim como a tendência média de cada conjunto de curvas. As linhas pontilhadas representam as réplicas que apresentaram falha entre o dolly e a emulsão. Avaliando a evolução da tensão de arrancamento, verificou-se que a amostra TE46°C TCAMB, apresentou melhor desempenho por ter obtido a maior POTS em um tempo mais avançado. Nos gráficos fica nítido que a adesividade sofreu aumento mais significativo ao se aumentar o tempo de cura, mesmo em temperatura ambiente (27°C).

Figura 72 - Gráficos POTS *versus* Tempo por réplica

Fonte: elaborada pela autora.

4.5. Considerações finais

No presente capítulo foram apresentados os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização do agregado e da emulsão asfáltica, incluindo a avaliação da uniformidade dos grãos e sua composição química. Moldaram-se corpos de prova de TSD em diversas condições de temperatura e dosagem a fim de avaliar o seu desempenho quanto a ocorrência de perda de agregados e de exsudação. Para tanto, realizaram-se os ensaios WTAT, *Sweep test* e LWT. Em adição a isso propôs-se a realização do ensaio MSCR para verificar a susceptibilidade da emulsão à exsudação e o ABS para avaliar a compatibilidade entre o agregado e a emulsão. No capítulo próximo constam as principais conclusões da presente pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

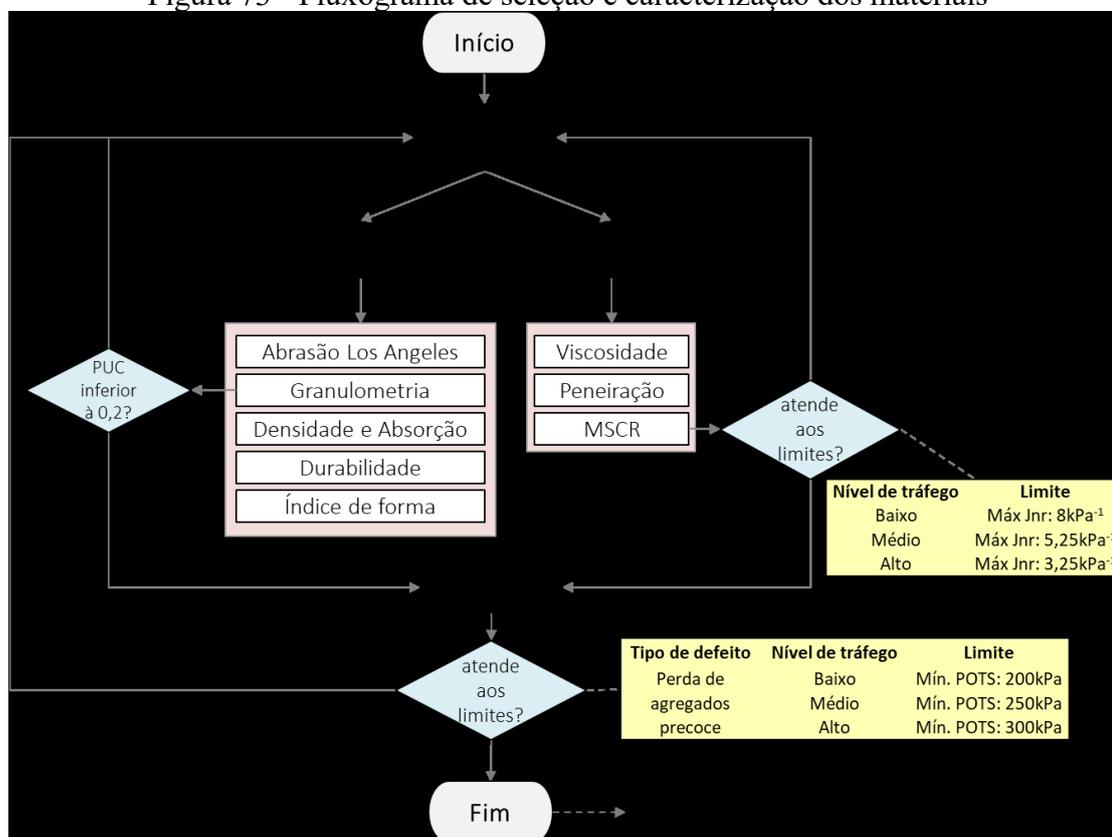
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Principal Contribuição da Dissertação

Diante dos resultados apresentados, concluiu-se que são muitas as lacunas existentes nas especificações vigentes referentes aos tratamentos superficiais por penetração. Na etapa de seleção e caracterização dos materiais, por exemplo, não há referência à critérios mínimos para os ensaios preconizados com base no desempenho dos TSPs. Tal fato pode ocasionar a concepção de revestimentos suscetíveis à ocorrência de defeitos, sendo estes originados por problemas primários que poderiam ser evitados, como uma baixa uniformidade dos grãos, ou uma incompatibilidade entre ligante e agregado, entre outros.

Por esse motivo, ilustrou-se na Figura 73 um fluxograma de seleção e caracterização de materiais adequados para aplicação em TSPs, evidenciando critérios mínimos aceitáveis para a PUC dos agregados, a compliância não recuperável J_{nr} do resíduo da emulsão asfáltica e a tensão de arrancamento POTS do conjunto ligante agregado.

Figura 73 - Fluxograma de seleção e caracterização dos materiais



Fonte: elaborada pela autora.

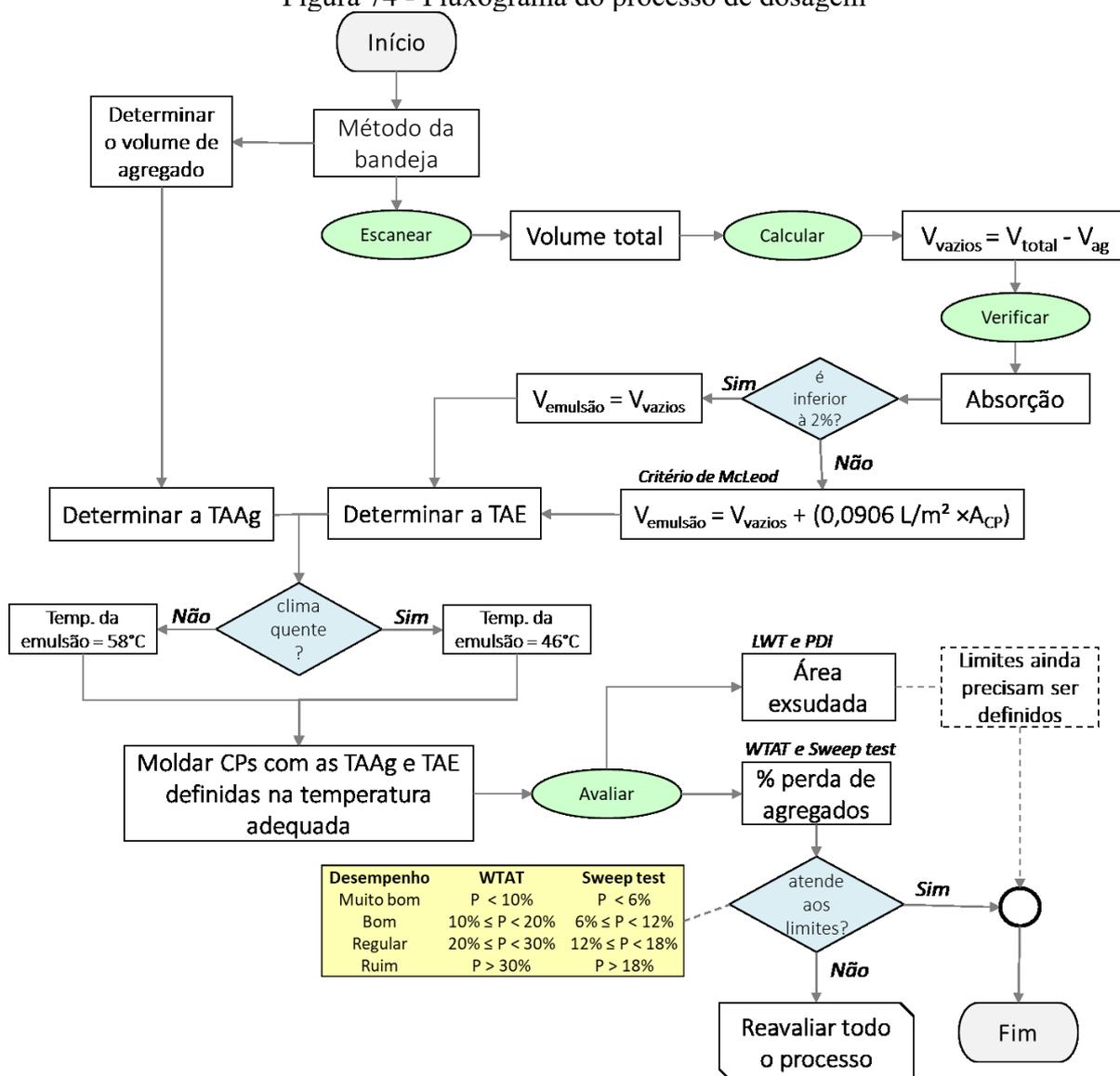
Considerando a perda de agregados limite que ainda é considerada com bom desempenho por Pereira (2013) igual a 20%, define-se P_{2EM} máximo como sendo 80% e esse é o denominador para o cálculo do PUC. Já o numerador P_{EM} , que indica o potencial de exsudação, não apresenta ainda um limite definido pela literatura, mas avaliando outros estudos nessa temática (CHATURABONG, 2014; HERRINGTON; KODIPPILY; HENNING, 2015; KODIPPILY, 2013) definiu-se como um valor limite de P_{EM} 16% para que o revestimento ainda seja considerado seguro para o usuário. Substituindo tais valores na equação 3, obteve-se um valor limite para o PUC de 0,2. É notório que esse valor pode variar para diferentes tipos de agregado e emulsão, sendo considerado representativo para materiais semelhantes aos aplicados no presente estudo.

Em relação aos valores de compliância não recuperável J_{nr} do resíduo da emulsão asfáltica, reproduziu-se no fluxograma os limites preconizados pela PRS americana (KIM et al., 2017), que definiu faixas a partir do volume de tráfego a ser atendido. Já as faixas de desempenho para o ensaio ABS foram as mesmas propostas por Adams (2014), que avaliou em seu estudo materiais para aplicação específica em TSPs. Entende-se, no entanto, que os limites definidos consideram aceitáveis POTS muito baixos, necessitando de uma avaliação mais aprofundada à luz dos materiais disponíveis localmente.

Após uma seleção de materiais adequada, o desafio passa a ser a escolha de um método de dosagem que gere o melhor desempenho possível do revestimento. É sabido que mesmo os “melhores” materiais podem não ser suficientes para garantir a eficácia de uma estrutura, devendo-se levar em consideração também as taxas de aplicação associadas a eles. Diante disso, observou-se que não há no Brasil um método de dosagem específico aos TSPs, considerando as especificidades dos materiais, as condições climáticas, os possíveis defeitos, etc.

Sendo assim, com base na revisão de literatura realizada e nos inúmeros questionamentos levantados no presente estudo, propõe-se no fluxograma da Figura 74 um método de dosagem para TSPs, a fim de minimizar a ocorrência de perda de agregados e de exsudação. Nesse método incluem-se aspectos de volumetria dos materiais, do clima em que se pretende executar o serviço e ensaios de desempenho.

Figura 74 - Fluxograma do processo de dosagem



Fonte: elaborada pela autora.

Com relação à definição da TAAg, recomenda-se manter as proposições do método do DER-CE, no entanto sem a majoração das taxas recomendadas na especificação vigente, a fim de evitar o desperdício de agregado. Já para a definição da TAE, propõe-se o procedimento recomendado por Adams (2014), em que se propõe um escaneamento da bandeja após a definição da TAAg a fim de se descobrir o volume total da amostra. Dessa forma, poderia ser calculado o volume de vazios da amostra a ser preenchido por emulsão. No procedimento incluiu-se ainda um fator de absorção do agregado, que deve ser somada ao volume de vazios para realizar o cálculo da TAE. Esse volume de emulsão absorvida pelos agregados só será considerado em casos que a absorção é superior à 2%, de acordo com o critério de McLeod (1971 *apud* ADAMS, 2014).

Após a determinação da TAAg e da TAE devem ser moldados corpos de prova para verificar se o desempenho desses materiais nessas taxas é satisfatório. Antes da moldagem, verificou-se por esse estudo que a temperatura de aplicação da emulsão e a temperatura de cura têm grande influência no desempenho do TSP, devendo ser considerados na fase de dosagem. Assim, com base nos resultados obtidos considerou-se que em regiões de clima quente a emulsão pode ser menos aquecida (46°C) e em regiões mais frias é essencial um aquecimento mais elevado (58°C). Como esse critério de clima pode ser subjetivo, em regiões de clima mais ameno, sugere-se a moldagem de corpos de prova em ambas as temperaturas para a garantia de uma construção adequada.

Propõe-se que os CPs sejam submetidos a ensaios de avaliação da exsudação e da perda de agregados. Sugere-se o LWT associado a um PDI para verificação da área exsudada nas amostras, a fim de evitar problemas de segurança viária. Esse defeito ainda necessita de maiores estudos a fim de se definir limites aceitáveis para TSPs. Para a avaliação da perda de agregado existem diversos ensaios já explorados na literatura, mas no presente estudo foram considerados o WTAT e o *Sweep test*. Os limites preconizados para cada um foram diferentes devido ao *Sweep test* ser um ensaio menos abrasivo que o WTAT. Após a avaliação, caso o desempenho seja satisfatório, considera-se que as TAAg e TAE definidas podem ser consideradas como as de projeto. Em caso de desempenho insatisfatório, recomenda-se uma revisão completa do processo, desde a etapa de seleção até a confecção dos CPs. Mais detalhes de cada uma das etapas apresentadas nos fluxogramas foram abordados na próxima seção.

Por fim, recomenda-se que os órgãos rodoviários criem especificações de serviço que incluam parâmetros como o PUC, a tensão de arrancamento POTS, faixas de desempenho para a perda de agregados e para a exsudação com base no volume de tráfego a ser atendido, etc. Com isso, espera-se tornar viável a criação de um método de dosagem específico para TSPs nos moldes do que foi sugerido no presente estudo.

5.2. Principais Constatações do Programa Experimental

5.2.1. Quanto aos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais

A etapa de caracterização dos materiais demonstrou que tanto o agregado quanto a emulsão empregada no estudo atenderam às normas vigentes. Concluiu-se pelo PUC obtido, que o agregado estudado apresenta boa aplicabilidade em serviços de TSP, o que foi

corroborado pelos resultados obtidos no ensaio WTAT e no *Sweep test*. O ensaio de fluorescência também explicitou a necessidade de avaliar o agregado e a emulsão asfáltica quimicamente, a fim de explicar como ocorre a interação entre eles e como cada um afeta os mecanismos de falha do revestimento. A heterogeneidade do agregado empregado poderia ocasionar diversos problemas no revestimento, como o surgimento de zonas mais suscetíveis à quebra dos grãos, ou até mesmo com problemas de adesividade. Ademais, consolidou-se a inclusão do PUC como critério de seleção de agregados para emprego em TSPs.

5.2.2. Quanto à avaliação dos diferentes métodos de dosagem dos TSPs

Constatou-se que o método de dosagem especificado pelo DER-CE é deficiente por não considerar parâmetros volumétricos do agregado para definição de taxas de aplicação de agregado e de emulsão. No decorrer do estudo questionaram-se diversos aspectos, tais como os índices preconizados na especificação, a inclusão de um fator de majoração prevendo a ocorrência de perda de agregado e a definição da TAAg da 2ª camada ser puramente visual.

Além disso, ao realizar o mesmo procedimento de dosagem com agregados diferentes, observou-se que os problemas identificados em cada conjunto de corpos de prova não era o mesmo, levando a crer que o método não é aplicável para todos os agregados ou que outros critérios além do método da bandeja devam ser levados em consideração.

A precariedade de informações é ainda mais evidente na especificação do DNIT, que sugere apenas taxas de aplicação dos materiais, sem nenhum critério de escolha específico. A especificação do DNIT não faz alusão aos diferentes tipos de emulsão, agregado, compactadores, técnicas de execução, entre outros, e como isso pode influenciar na dosagem e no desempenho do revestimento. As taxas recomendadas ficam então completamente a critério do executor do serviço.

Tais inconsistências se refletiram nos corpos de prova moldados para o estudo, cujas TAAg e TAE apresentaram divergências significativas em relação aos valores teóricos proposto por cada especificação. Para o DER-CE, identificaram-se TAAg excessivas para a 1ª camada de agregado e para o banho diluído em oposição a uma escassez de ligante para a 2ª camada. A TAE foi aumentada consideravelmente para viabilizar a moldagem dos corpos de prova. Com relação à especificação do DNIT, verificou-se uma TAAg ainda mais excessiva para a 1ª camada de agregado, assim como para 2ª camada, mesmo que as taxas escolhidas tenham sido as do limite mínimo recomendado. A 2ª camada de agregado ainda apresentou

problemas para se manter no corpo de prova, indicando excesso de agregado ou falta de ligante para garantir o envolvimento mínimo das partículas.

Em resumo, concluiu-se que as especificações em vigor do DER-CE fornecem taxas de aplicação dos materiais que geram menor desperdício que as recomendadas pelo DNIT, no entanto ainda apresenta diversos impasses. Daí a necessidade de se desenvolver métodos de dosagem mais apropriados para TSP, a fim de evitar a ocorrência de defeitos.

5.2.3. Quanto aos resultados dos ensaios de avaliação da perda de agregados obtidos pelo WTAT e pelo Sweep Test

No que se refere à perda de agregados obtida pelo ensaio WTAT, percebeu-se menor influência da temperatura de aplicação da emulsão na perda de agregado quando a cura acontece a quente, indicando menor necessidade de aquecimento prévio da emulsão. Em contraponto, a temperatura de aplicação da emulsão gerou maiores diferenças nos resultados de perda obtidos quando a cura ocorre em temperaturas mais baixas, indicando os benefícios de um processo de cura em temperaturas mais elevadas. Portanto, o fator clima deve sempre ser considerado no planejamento da construção de revestimentos do tipo TSP.

Em relação aos modelos propostos, considerou-se como o que melhor representou a perda efetiva para as amostras com temperatura de aplicação da emulsão de 46°C e cura ambiente o cenário 1 ($P_{estimada} = 0,0 \times Pt_{1^{a}cam} + 2,3213 \times Pt_{2^{a}cam}$) e para as com cura à 50°C foi o do cenário 3 ($P_{estimada} = 0,0 \times Pt_{1^{a}cam} + 0,5698 \times Pt_{2^{a}cam}$). As diferenças entre os modelos foram justificadas pelo efeito melhorador do processo de cura em temperaturas mais elevadas.

Notou-se tendência de comportamento semelhante entre a perda de agregados obtida no *Sweep test* e no WTAT, guardadas as devidas proporções de severidade de cada ensaio. Com base nos estudos realizados, sugeriram-se novos limites de desempenho para a perda de agregados obtida no *Sweep test*, considerando como desempenho “muito bom” $PA_{sweep} < 6\%$, desempenho “bom” $6\% \leq PA_{sweep} < 12\%$, desempenho “regular” $12\% \leq PA_{sweep} < 18\%$ e desempenho “ruim” $PA_{sweep} \geq 18\%$.

Em relação aos modelos propostos, considerou-se como o que melhor representou a perda efetiva para as amostras com temperatura de aplicação da emulsão de 46°C e cura ambiente o cenário 1 ($P_{estimada} = 0,0 \times Pt_{1^{a}cam} + 1,3743 \times Pt_{2^{a}cam}$) e para as com cura à 50°C foi o do cenário 3 ($P_{estimada} = 0,2887 \times Pt_{1^{a}cam} + 0,2578 \times Pt_{2^{a}cam}$). As diferenças entre os modelos também podem ser explicadas pelo efeito melhorador do processo de cura em temperaturas mais

elevadas. No entanto, observou-se no cenário 3 que a uniformidade da 1ª camada também influenciou na perda de agregados estimada.

Quanto à influência da graduação dos agregados, detectou-se que uma graduação mais uniforme proporciona melhorias ao desempenho do revestimento, no entanto, não tão relevantes quanto um aumento na temperatura de aplicação da emulsão. Portanto, sugere-se que a viabilidade técnica e econômica dessas alternativas seja considerada em fase de projeto a fim de contribuir para a construção de TSPs mais eficientes.

Acredita-se que ambos os ensaios são aplicáveis para avaliação da perda de agregado em laboratório, porém recomenda-se a utilização do WTAT devido à alta fragilidade da escova utilizada no *Sweep test*. Uma vantagem da utilização do *Sweep test* é a existência da norma americana, enquanto para o WTAT não existe norma para avaliação de TSPs.

5.2.4. *Quantos aos resultados do ensaio LWT e o processamento digital de imagens*

No que tange a avaliação da exsudação, considerou-se que o método de ensaio proposto possibilitou a identificação da área exsudada, no entanto algumas modificações poderiam tornar essa avaliação mais eficiente. A temperatura de ensaio utilizada não foi julgada a mais propícia para avaliação desse defeito, pois a ocorrência desse defeito é mais preocupante em temperaturas elevadas. Observou-se ainda que o equipamento LWT provocou uma quebra excessiva dos grãos e espalhou partículas de pó na trilha de roda avaliada, o que dificultou a identificação da área exsudada. Um possível motivo causador desse fenômeno foi a rigidez excessiva da roda do equipamento.

Além disso, percebeu-se que as taxas de aplicação da emulsão preconizadas pelos métodos do DNIT e do DER-CE se mostraram baixas, tornando o revestimento mais suscetível à perda de agregados que à exsudação. Por esse motivo, e pelos baixos valores obtidos no ensaio MSCR para a compliância não-recuperável J_{nr} , acredita-se que atualmente a perda de agregados é o defeito mais crítico nos TSPs construídos no Brasil.

No que se refere ao processamento digital de imagem (PDI), o método proposto por Chaturabong (2014) se mostrou pouco aplicável para amostras de TSP moldadas sob as recomendações do DER-CE devido presença de aplicação do banho diluído. No entanto, o método se mostrou adequado para a identificação da área exsudada em amostras moldadas de acordo com as recomendações do DNIT.

5.2.5. Quanto aos resultados do ensaio ABS

De acordo com os requisitos mínimos indicados na PRS para emulsões e por Adams (2014), todas as amostras apresentaram POTS satisfatórios. Observou-se que diferente dos ensaios de perda, que sofreram grande influência da temperatura da emulsão e de cura, a adesividade medida pelo ABS foi mais afetada pelo tempo de cura, indicando que o tempo é essencial para o fortalecimento das interações entre o agregado e a emulsão. Constatou-se que o ensaio ABS não apresentou relação direta com os resultados dos ensaios de perda de agregados, indicando que esta não ocorreu devido a uma incompatibilidade do agregado com a emulsão.

Apesar disso, o ensaio ABS é uma importante ferramenta para tomada de decisão da seleção dos materiais de uma obra de tratamento superficial. Com a implementação desse ensaio seria possível definir um critério de compatibilidade para a aceitação de diferentes combinações de ligante e agregado. Em casos de baixa compatibilidade, poderia ser recomendada a inclusão de melhoradores de adesividade no projeto ou até a mesmo a mudança de fornecedores para o serviço.

5.3. Sugestões para trabalhos futuros

A temática dos tratamentos superficiais ainda pode ser considerada pouco explorada no Brasil. No entanto pesquisas nessa área vem ganhando espaço no cenário mundial. Diante desse contexto e das limitações do presente estudo, sugerem-se como propostas futuras de estudo:

- a) Aplicação de questionário para documentação e avaliação do cenário brasileiro acerca dos tratamentos superficiais;
- b) Implementar o PDI para avaliação da perda de agregados;
- c) Realizar os ensaios no LWT para avaliação da exsudação em uma câmara que possibilite controle de temperatura;
- d) Validação dos resultados de laboratório com a construção e o acompanhamento de trechos experimentais;
- e) Implementação de um simulador de laboratório para verificar influência do tempo (envelhecimento) e do tráfego na ocorrência de perda de agregado e exsudação em TSPs;

- f) Desenvolver um método para verificação de parâmetros de rigidez para TSPs;
- g) Incluir no método de dosagem para TSPs aspectos volumétricos como os das misturas asfálticas;
- h) Verificar a influência da abrasão e do empacotamento dos agregados na ocorrência da exsudação;
- i) Avaliar a influência de índices físicos do agregado na dosagem, tais como forma, absorção, mineralogia, abrasão, etc;
- j) Analisar o efeito do aquecimento do agregado no desempenho de TSPs;
- k) Identificar como o tipo de emulsão influencia na ocorrência da exsudação e da perda de agregado;
- l) Modificar o método de ensaio de avaliação da adesividade ABS de emulsões asfálticas para verificar o seu comportamento sob diferentes condições de umidade e tempos de cura;
- m) Verificar a compatibilidade entre agregados provenientes das pedreiras presentes na Região Metropolitana de Fortaleza e diversos tipos de emulsões asfálticas disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 91-11** Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test. Washington, D.C., 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502/95** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **ABNT NBR 14746/01** Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica - Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, 2001.

ADAMS, J.; CASTORENA, C.; IM, J. H.; ILIAS, M.; KIM, Y. R. Addressing raveling resistance in chip seal specifications. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., 2017.

ADAMS, J. M. **Development of a Performance-Based Mix Design and Performance-Related Specification for Chip Seal Surface Treatments**. 2014. Dissertation - North Carolina State University, Raleigh, 2014.

AGUIAR-MOYA, J. P.; BALDI-SEVILLA, A.; SALAZAR-DELGADO, J.; PACHECO-FALLAS, J. F.; LORIA-SALAZAR, L.; REYES-LIZCANO, F.; CELY-LEAL, N. Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 8436, n. July, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2016.1199884>>

AKTAŞ, B.; KARAŞAHİN, M.; SALTAN, M.; GÜRER, C.; UZ, V. Effect of aggregate surface properties on chip seal retention performance. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 639–644, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813002705>>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3203**: Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures. ASTM International, v. i, n. c, p. 5–7, West Conshohocken, 2011.

_____. **ASTM C127-15**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, p. 1–5, West Conshohocken, 2015.

_____. **ASTM C128-15**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, p. 1–6, West Conshohocken, 2015.

_____. **ASTM D4541-09**: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion. ASTM International, p. 1–16, West Conshohocken, 2009.

_____. **ASTM D7000**: Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples. ASTM International, p. 1–4, West Conshohocken, 2011.

BAHIA, H. U.; HANSON, D. I.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M. A.; ANDERSON, R. M.. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. **NCHRP**

Research Report 459. National Academy of Sciences, 2001. Disponível em:
<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_459-a.pdf>

CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES. **Code de bonne pratique des enduits superficiels.** Bruxelles, 1981.

CHATURABONG, P. **Development of the Loaded Wheel Tracking Test (LWT) for Evaluating Bleeding In Chip Seals and Relationship to Emulsion Residue Rheology.** 2014. Thesis - University of Wisconsin, Madison, 2014.

CHATURABONG, P.; BAHIA, H. U. Effect of moisture on the cohesion of asphalt mastics and bonding with surface of aggregates. **Road Materials and Pavement Design**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/14680629.2016.1267659>>

CHATURABONG, P.; HANZ, A. J.; BAHIA, H. U. Relationship between bleeding resistance in chip seals and emulsion residue rheology. **Transportation Research Board**, v. 96th annual meeting, p. 16, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletim estatístico.** Confederação Nacional do Transporte (CNT). 2018. Disponível em:
<<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 02 março 2018.

_____. **Anuário CNT do Transporte.** Confederação Nacional do Transporte (CNT). 2017. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017>>. Acesso em: 15 novembro 2017.

COENEN, A. R.; KUTAY, M. E.; SEFIDMAZGI, N. R.; BAHIA, H. Aggregate structure characterisation of asphalt mixtures using two-dimensional image analysis. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 3, p. 433–454, 2012. Disponível em:
<<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2012.711923>>

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES RODOVIAS E TRANSPORTES DO ESTADO DO CEARÁ. **DER ES-P 11/00** Tratamento superficial duplo. Fortaleza, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ES 391/99** Tratamento superficial simples com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER ES 392/99** Tratamento superficial duplo com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER ES 393/99** Tratamento superficial triplo com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER ME 035/98** Agregados - determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER ME 078/94** Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER ME 081/98** Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER ME 083/98** Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER ME 086/94** Agregados - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER ME 089/94** Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 146/2012** Tratamento Superficial Simples. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **DNIT ES 147/2012** Tratamento Superficial Duplo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **DNIT ES 148/2012** Tratamento Superficial Triplo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **DNIT TER 005/2003** Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003.

FERREIRA, J. L. S. **Novas diretrizes para seleção granulométrica de misturas asfálticas densas com foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em:
<http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/24096/1/2017_dis_jlsferreira.pdf>

GRANSBERG, D.; JAMES, D. M. B. Chip Seal Best Practices. **NCHRP Synthesis 342**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2005.

GÜRER, C.; KARAŞAHİN, M.; ÇETİN, S.; AKTAŞ, B. Effects of construction-related factors on chip seal performance. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 605–613, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181200298X>>

HANZ, A.; AREGA, Z.; BAHIA, H. Rheological Behavior of Emulsion Residues Produced by Evaporative Recovery Method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2179, p. 102-108, 2010. Disponível em:
<<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2179-12>>

HANZ, A.; JOHANNES, P.; BAHIA, H. Development of Emulsion Residue Testing Framework for Improved Chip Seal Performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2293, p. 106–113, 2012. Disponível em:
<<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2293-13>>

HERRINGTON, P. R.; KODIPPILY, S.; HENNING, T. F. P. Flushing in chipseals. **NZ Transport Agency research report 576**. 101pp. Wellington, 2015.

HUANG, W.; LV, Q. Investigation of Critical Factors Determining the Accuracy of Binder Bond Strength Test to Evaluate Adhesion Properties of Asphalt Binders. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 45, n. 4, p. 20150444, 2017. Disponível em:
<<http://www.astm.org/doiLink.cgi?JTE20150444>>

ILIAS, M. **Development of Performance -Related Specification for Fresh Emulsions Used for Surface Treatments and Performance Study of Chip Seals and Microsurfacing.** Dissertation - North Carolina State University, Raleigh, 2015.

IM, J. H. **Performance Evaluation of Chip Seals for High-Volume Roads Using Polymer-Modified Emulsions and Optimized Construction Procedures.** Dissertation - North Carolina State University, Raleigh, 2013.

KIM, Y. R.; ADAMS, J.; CASTORENA, C.; ILIAS, M.; IM, J. H.; BAHIA, H.; CHATURABONG, P.; HANZ, A.; JOHANNES, P. T. Performance-Related Specifications for Emulsified Asphaltic Binders Used in Preservation Surface Treatments. **NCHRP Research Report 837.** National Academy of Sciences, 2017. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/24694>>

KODIPPILY, S. **Modelling the flushing mechanism of thin flexible surface pavements.** Dissertation - University of Auckland, Auckland, 2013.

KODIPPILY, S.; HENNING, T.; INGHAM, J.; HOLLERAN, G. Using Multiple Investigative Techniques to Assess Flushing of Chip Seal Surfaces. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2431, n. 2431, p. 42–48, 2014. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2431-06>>

LARSEN, J. **Tratamento superficial na conservação e construção de rodovias.** 3a ed. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA). Rio de Janeiro, 1985.

LEE, J. **Quantifying the Benefits of Improved Rolling of Chip Seals.** Dissertation - North Carolina State University, Raleigh, 2008.

LEE, J.; KIM, Y. Understanding the Effects of Aggregate and Emulsion Application Rates on Performance of Asphalt Surface Treatments. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2044, p. 71–78, 2008. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2044-08>>

_____. Performance-Based Uniformity Coefficient of Chip Seal Aggregate. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2108, p. 53–60, 2009. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2108-06>>

LEE, J. S. **Performance Based Evaluation of Asphalt Surface Treatment Using Third Scale Model Mobile Loading Simulator.** Dissertation - North Carolina State University, Raleigh, 2007.

LOIOLA, P. R. R. **Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamentos superficiais de rodovias.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MORAES, R.; BAHIA, H. Effects of Curing and Oxidative Aging on Raveling in Emulsion Chip Seals. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2361, n. 2361, p. 69–79, 2013. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2361-09>>

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

PEREIRA, S. L. de O. **Avaliação dos tratamentos superficiais simples, duplo e triplo de rodovias através do emprego de diferentes agregados da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RIBAS, C. Y. **Avaliação da influência do método de compactação na macroestrutura de misturas asfálticas densas utilizando o processamento digital de imagens**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SEFIDMAZGI, N. R. **Defining Effective Aggregate Skeleton In Asphalt Mixture Using Digital Imaging**. Thesis - University of Wisconsin, Madison, 2011.

SEPI ENGINEERING & CONSTRUCTION INC. **NCDOT Chip Seal Best Practices Manual**. Raleigh, 2015.

SILVA, R. C. da. **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**. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ. **Chipsealing in New Zealand**. Transit New Zealand, Road Controlling Authorities, Roading New Zealand, Wellington, 2005.

YAN, C.; HUANG, W.; LV, Q. Study on bond properties between RAP aggregates and virgin asphalt using Binder Bond Strength test and Fourier Transform Infrared spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.024>>

YIN, Y.; CHEN, H.; KUANG, D.; SONG, L.; WANG, L. Effect of chemical composition of aggregate on interfacial adhesion property between aggregate and asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 231–237, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.061>>

ZHANG, J.; APEAGYEI, A. K.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J. R. A. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 62, p. 45–54, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.012>>

APÊNDICE A – TABELA COMPARATIVA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Tabela 28 - Resumo dos tipos de tratamentos superficiais

Tipos de revestimento	Termo em inglês	Função do revestimento	Composição	Ligante recomendado	Granulometria	Execução do serviço
Anti-pó (TAP)	-	Indicados para vias rurais e evita a formação de poeira em estradas de terra. Alternativa de baixo custo empregada quando não há recurso para aplicar um revestimento delgado mais durável	Agregado miúdo (opcional) e emulsão anti-pó	Emulsão a base de óleo de xisto	Agregados miúdos, ou seja, passantes na #4	Espalhamento de emulsão asfáltica sobre uma superfície não pavimentada imprimada e em seguida com posterior cobertura de agregado mineral ou saibro
Contra pó (TCP)	<i>Dust Palliative</i>			RMIC-TAP		
Macadame betuminoso	<i>Bitumen Macadam</i>	Apesar de ser classificado como TS, geralmente é utilizado como camada de base, em espessuras superiores a 5cm. Técnica semelhante a um TSP, mas com agregados maiores	Agregado graúdo e emulsão asfáltica	CAP 150/200 (desuso), RR-1C e RR-2C comuns ou modificadas por polímero	Constituído de uma aplicação de brita 3 (2''), 3 aplicações alternadas de emulsão asfáltica e brita 1 (3/4''), pedrisco (1/4'') e pó de pedra	Aplicação sucessiva de agregado e ligante (geralmente duas aplicações), devidamente compactadas e com espessura final de aproximadamente 7cm
Capa selante (CS)	<i>Seal Coat</i>	Impermeabilizar a superfície, selar trincas e melhorar a textura superficial	Agregado miúdo (opcional) e emulsão asfáltica	RR-2C comum ou modificada com polímero	Opta-se pelo agregado miúdo (areia grossa, média e pó de pedra)	Limpeza da base, seguida de imprimação ou pintura (depende do órgão). Depois aplica-se o ligante, seguido do agregado (se houver) e compactação
Pintura de impermeabilização	<i>Fog Seal</i>	Quando não se utiliza agregado	Emulsão asfáltica		-	
Tratamento superficial por penetração (TSP) <i>chip seal</i>	Simples	Single Seal	Revestimento para RBVTs e acostamentos; conservação de revestimentos desgastados e envelhecidos; selagem de revestimentos abertos; tratamento antiderrapante de superfícies lisas; proteção provisória de subleitos e sub-bases	1, 2 ou 3 camadas de agregado e emulsão asfáltica	CAP 150/200 (desuso), RR-1C e RR-2C comuns ou modificadas por polímero	Classe I – 19 - 16mm (3/4'' – 5/8'') para $2,5 \times 10^5 < N \leq 7,5 \times 10^5$ Classe II – 16 – 10mm (5/8'' – 3/8'') para $7,5 \times 10^4 < N \leq 2,5 \times 10^5$ Classe III – 10 – 6,3mm (3/8'' – 1/4'') para $N \leq 7,5 \times 10^4$
	Duplo	<i>Double Seal</i>				
	Triplo	<i>Triple Seal</i>				

continua

conclusão

Tipos de revestimento	Termo em inglês	Função do revestimento	Composição	Ligante recomendado	Granulometria	Execução do serviço
Lama asfáltica (LA)	<i>Slurry Seal</i>	Camada de selagem, impermeabilização e conservação de pavimentos. Apresenta durabilidade maior que uma capa selante, porém inferior a um MRAF	Emulsão asfáltica, agregado miúdo, filer (cimento, cal), água e aditivo (opcional)	EAs catiônicas de ruptura lenta: LA-1C, LA-2C, RL-1C, LAN, LAR-C	Agregado miúdo - totalmente passante na 3/8" Material de enchimento - % em peso passante nº40: 100%, nº80: 95-100%, nº200: 65-100%	Deve ser observada a consistência da massa, abrindo ou fechando a alimentação d'água, de modo a obter uma massa uniforme. É importante que a pista seja reaberta apenas após a LA ter adquirido consistência suficiente para resistir ao tráfego sem desagregar
Microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF)	<i>Micro Surfacing</i>	Evolução da LA, empregado em casos de selagem de trincas, manutenção de superfícies oxidadas, ausência de aderência pneu-pavimento, impermeabilização, revitalização de superfícies desgastadas, preenchimento de trilhas de roda, etc	Emulsão asfáltica modificada por polímero, agregado, filer, água e aditivo (controlador de ruptura)	EA de ruptura controlada	Agregado miúdo - totalmente passante na 1/2" Material de enchimento - % em peso passante nº40: 100%, nº80: 95-100%, nº200: 65-100%	Inicialmente limpa-se a base. A massa com a dosagem desejada é pré misturada e transportada até o local de aplicação numa usina móvel.
<i>Cape seal</i>	<i>Cape Seal</i>	Camada de TSS coberta com MRAF ou LA (em desuso). Empregado na reabilitação de pavimentos sujeitos a tráfego médio ou pesado e/ou na reconstrução de novas rodovias e vias urbanas	Mesmos TSS e MRAF	Mesmo TSS e MRAF	Mesma TSS e MRAF	Aplica-se a camada de TSS como citado, em seguida espera-se a cura e libera-se o tráfego por um período (2 a 10 dias). Em seguida aplica-se o MRAF e libera-se o tráfego após a ruptura da emulsão (algumas horas)

Fonte: elaborada pela autora.

**APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO A SER APLICADO PARA COLETA DE DADOS
SOBRE OS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS**

GERAL

1. Endereço de e-mail: _____
2. Qual a extensão total da rede rodoviária do seu estado? (em km)
R: _____ (km)
3. Qual a extensão total, SOMENTE, dos revestimentos em tratamentos superficiais? (em km)
R: _____ (km)
4. Qual o tipo de tratamento mais comum no seu estado?

a. <i>Simples</i>	c. <i>Triplo</i>
b. <i>Duplo</i>	d. <i>Outro:</i> _____
5. Qual o máximo volume de tráfego permitido para que o TS seja considerado uma alternativa viável de revestimento?

a. < 500 veículos/dia	d. < 5000 veículos/dia
b. < 1000 veículos/dia	e. < 20000 veículos/dia
c. < 2000 veículos/dia	f. <i>Outros:</i> _____
6. Qual o tempo de vida usual dos TSs construídos pela sua agência? (em anos)
R: _____
7. Como você avalia a experiência interna da sua agência/universidade na aplicação de TSPs? (Marque apenas uma alternativa)
R: *Escala de 1 a 5, sendo 1 “Não temos nenhum conhecimento” e 5 “Excelente, não temos nenhuma dificuldade”.*
8. Quais são os principais problemas observados em TSs na sua organização?

a. <i>Perda de agregado</i>	e. <i>Corrugação</i>
b. <i>Exsudação</i>	f. <i>Juntas defeituosas</i>
c. <i>Desgaste do agregado (Polimento)</i>	g. <i>Encravamento</i>
d. <i>Desgaste de borda</i>	h. <i>Outras (Especificar)</i>

DOSAGEM E CONCEPÇÃO

9. Em que situações o TSP é empregado?
 - a. *Acima de uma base granular, como primeiro revestimento de RBVTs;*

- b. *Acima de um revestimento antigo oxidado;*
- c. *Acima de um revestimento antigo trincado;*
- d. *Acima de um revestimento com deformações superficiais, como ação corretiva;*
- e. *Acima de um revestimento antigo que perdeu sua macrotextura, como função antiderrapante;*
- f. *Entre a camada de base e a camada de revestimento mais espesso, como camada de anticravamento;*
- g. *Outra*

10. A sua organização realiza ou contrata projetos de dosagem de TSPs?

- a. *Sim*
- b. *Não (Se não, pular para a pergunta 15)*

DETALHES DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM

11. Quem realiza o procedimento de dosagem?

- a. *Responsável pela obra de pavimentação*
- b. *Consultor de tratamentos superficiais*
- c. *Outro (especificar):* _____

12. Qual é o processo de dosagem usado pela sua organização?

- a. *Método da bandeja/ placa;*
- b. *Método empírico baseado em experiências passadas dos técnicos responsáveis;*
- c. *Aplicam-se as taxas recomendadas pelos órgãos reguladores responsáveis, sem realizar nenhum procedimento de dosagem formal.*
- d. *Método individual da sua organização. Nesse caso, descrever resumidamente o processo utilizado ou colocar em anexo a esse questionário uma cópia do método*
- e. *Não tenho conhecimento, por ser um serviço contratado e aprovado por terceiros;*
- f. *Nenhum método de dosagem formal*

13. Qual o critério de dosagem utilizado?

- a. *Volume de tráfego*
- b. *Percentual de veículos pesados*
- c. *Clima (quente, frio, úmido, chuvas)*
- d. *Tipo de emulsão*
- e. *Tamanho do(s) agregado(s)*
- f. *Outro (especificar):*

14. Como você determina a taxa de agregado?

- a. *Procedimento de dosagem*

- b. O executor do serviço determina as taxas baseado em experiências passadas
- c. Por especificações de serviço locais
- d. Por especificações de serviço federais
- e. Outro (especificar): _____

15. Como é determinada a taxa de emulsão?

- a. Pelo procedimento de dosagem, a depender da taxa de agregado
- b. O executor do serviço determina as taxas baseado em experiências passadas
- c. Por especificações de serviço locais
- d. Por especificações de serviço federais
- e. Outro (especificar): _____

MATERIAIS

16. Você exige diferentes combinações ligante – agregado para TSPs de diferentes rodovias?

- a. Sim
- b. Não

17. A sua organização emprega qual tipo de ligante em TSPs?

- a. RR-1C
- b. RR-2C
- c. CAP
- d. Outro : _____

18. Como você seleciona o tipo de ligante em serviços de TSPs?

- a. Custo do ligante
- b. Clima local
- c. Proximidade do fornecedor
- d. Volume de tráfego
- e. Experiências passadas
- f. Outro : _____

19. Como é feito o controle tecnológico do ligante?

R: _____

20. A sua organização aplica agregados de que graduação em TSPs?

- a. Uniforme
- b. Bem graduada
- c. Não é feito um controle
- d. Outro : _____

21. Qual a dimensão dos agregados empregados pela sua organização? (em mm ou a faixa)

R: _____

22. Como é feito o controle tecnológico do agregado?

R: _____

23. Você já utilizou algum agregado alternativo em serviços de TSPs? Se sim, qual?

(Exemplos: Escória de aciaria, Resíduo de construção de demolição (RCD), Fresado)

- b. Interrupção do tráfego durante a execução e até a cura completa do ligante e liberação com velocidade reduzida por um período de tempo;*
 - c. Nenhuma medida de controle, apenas até a finalização do serviço;*
 - d. Outra (especificar)*
36. O processo construtivo do revestimento acima de uma base granular exige a camada de imprimação?
- a. Sim*
 - b. Não.*
37. Antes de executar o TSP acima de um revestimento antigo, quais métodos de preparação de pista são realizados na superfície existente? (Marque todas as alternativas que se adequem)
- a. Limpa-se a superfície e aplica-se uma pintura de ligação;*
 - b. Limpa-se a superfície e é realizada uma selagem de trincas;*
 - c. Nenhum tratamento, apenas a limpeza;*
 - d. Outro: _____*
38. Dos defeitos observados pelo seu órgão, quais das seguintes são consideradas as principais causas?
- a. Clima*
 - b. Compactação insuficiente*
 - c. Taxa de ligante inadequada*
 - d. Taxa de agregado inadequada*
 - e. Espalhamento de agregado tardio*
 - f. Agregado sujo ou com poeira*
 - g. Graduação do agregado*
 - h. Viscosidade de ligante inadequada*
 - i. Temperatura de ligante inadequada*
 - j. Outro: _____*

39. Qual a reclamação mais comum do usuário que utiliza TSP no seu estado? (Marque apenas uma opção)
- a. *Agregados soltos, que batem nos vidros e para-choques;*
 - b. *Excesso de ruído;*
 - c. *Dirigibilidade;*
 - d. *Aparência;*
 - e. *Não é feito esse controle;*
 - f. *Outro: _____*
40. Se há algo que você gostaria de acrescentar que não foi contemplado no questionário e você ache que traria benefícios ao estudo, comente a seguir.

APÊNDICE C – DADOS PARA ALIMENTAÇÃO DO IPAS2

Tabela 29 - Percentual de ligante e agregado por réplica (LWT)

Identificação	Réplica	Ligante (g)	Agregado (g)	Total	% Ligante	% Agregado
DER TE46 TC50	1	149,65	1268,30	1443,60	3,11	87,86
	2	159,00	1304,60	1487,30	3,21	87,72
	3	153,60	1297,40	1480,40	3,11	87,64
DER TE46 TCAMB	1	147,85	1287,50	1457,80	3,04	88,32
	2	147,85	1297,50	1469,80	3,02	88,28
	3	148,40	1297,70	1470,20	3,03	88,27
DER TE58 TC50	1	153,55	1299,60	1480,20	3,11%	87,80
	2	142,95	1854,50	2017,60	2,13	91,92
	3	145,30	1296,80	1464,10	2,98	88,57
DER TE58 TCAMB	1	141,05	1292,70	1453,30	2,91	88,95
	2	145,70	1294,80	1463,20	2,99	88,49
	3	146,95	1282,50	1452,60	3,03	88,29
DNIT TE46 TC50	1	154,00	1532,40	1686,40	2,74	90,87
	2	155,00	1515,30	1670,30	2,78	90,72
	3	155,80	1581,20	1737,00	2,69	91,03
DNIT TE46 TCAMB	1	155,80	1489,20	1645,00	2,84	90,53
	2	162,80	1508,20	1671,00	2,92	90,26
	3	162,50	1514,40	1676,90	2,91	90,31
DNIT TE58 TC50	1	154,30	1550,50	1704,80	2,72	90,95
	2	153,40	1599,70	1753,10	2,63	91,25
	3	156,70	1520,40	1677,10	2,80	90,66
DNIT TE58 TC50	1	152,50	1465,80	1618,30	2,83	90,58
	2	152,10	1385,40	1537,50	2,97	90,11
	3	154,60	1497,10	1651,70	2,81	90,64
DERuni TE46 TCAMB	1	116,00	1200,90	1343,70	2,59	89,37
	2	108,55	1229,70	1357,70	2,40	90,57
	3	124,55	1165,00	1309,20	2,85	88,99
DERuni TE46 TC50	1	109,80	1156,10	1291,90	2,55	89,49
	2	102,20	1117,10	1242,00	2,47	89,94
	3	101,05	1179,60	1299,30	2,33	90,79

Fonte: elaborada pela autora.

APÊNDICE D – PERDA DE AGREGADO POR RÉPLICA

Tabela 30 - Resultados por réplica do ensaio WTAT

Agregado	Dosagem	Temperatura		Perda de agregados (%)	Média (%)	Desvio padrão	
		Cura	Emulsão				
não modificado	DER-CE	Ambiente (27°C)		7,28	17,41	0,081	
			46°C	29,54			
				15,40			
		50°C	58°C	2,41	2,36	0,000	
				2,38			
				2,30			
	DNIT	50°C	46°C	2,20	4,27	0,031	
				8,89			
				1,73			
		Ambiente (27°C)	58°C	0,63	1,57	0,010	
				1,05			
				3,04			
	modificado	DER-CE	Ambiente (27°C)		28,28	19,33	0,060
				46°C	15,00		
					14,70		
			50°C	58°C	14,01	10,58	0,023
					10,48		
					7,25		
modificado	DER-CE	Ambiente (27°C)	46°C	9,11	11,06	0,024	
				14,67			
				9,41			
		50°C	58°C	6,95	5,42	0,010	
				4,55			
				4,75			
modificado	DER-CE	Ambiente (27°C)	46°C	10,88	10,84	0,002	
				11,12			
				10,51			
		50°C	46°C	3,94	2,74	0,009	
				2,92			
				1,35			

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 31 - Resultados por réplica do *Sweep test*

Agregado	Dosagem	Temperatura		Perda de agregados (%)	Média (%)	Desvio padrão	
		Cura	Emulsão				
não modificado	DER-CE	Ambiente		8,94	10,31	0,006	
			46°C	9,96			
				10,65			
		50°C	58°C	2,47	2,13	0,003	
				1,72			
				2,19			
	modificado	DER-CE	50°C	46°C	2,43	2,66	0,001
					2,81		
			58°C		2,73	0,90	0,002
					0,67		

			1,17		
			0,85		
			4,42		
	Ambiente	46°C	4,11	4,02	0,003
modificado	DER-CE		3,54		
			1,01		
	50°C	46°C	0,84	0,98	0,001
			1,09		

Fonte: elaborada pela autora.

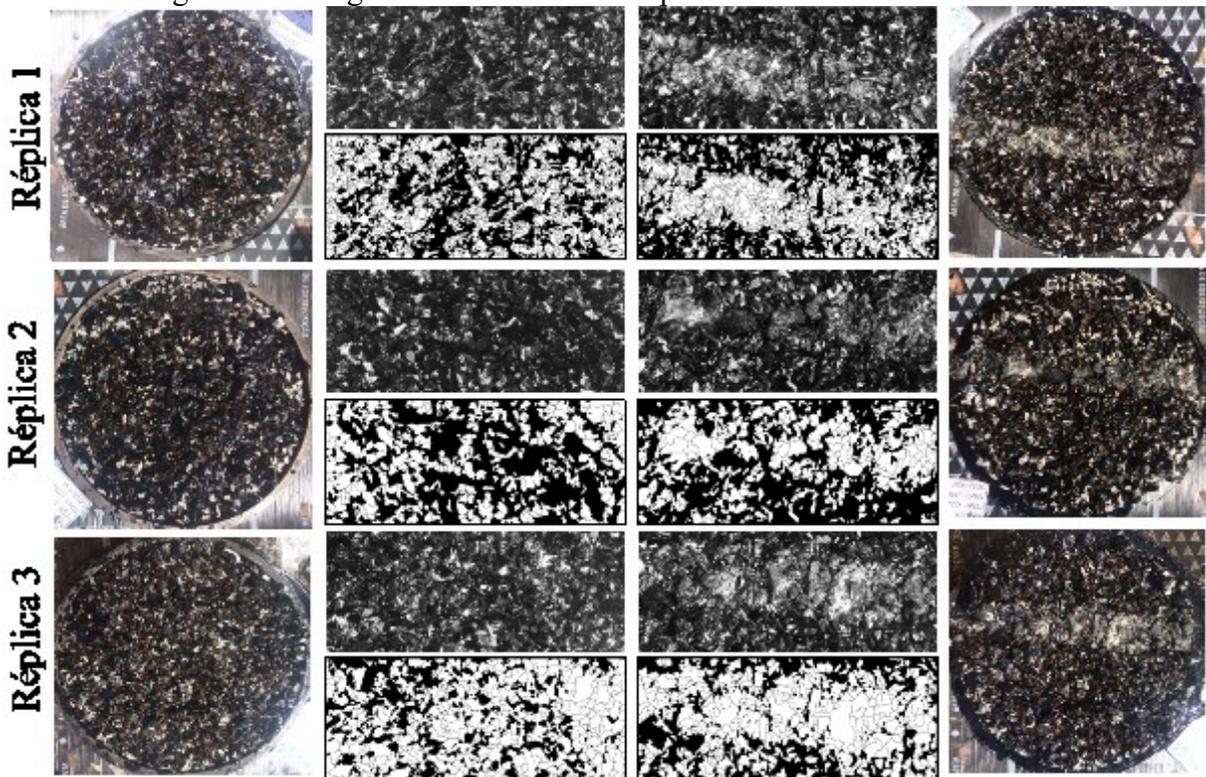
Tabela 32 - Resultados por réplica do LWT

Agregado	Dosagem	Temperatura		Perda de agregados (%)	Média (%)	Desvio padrão
		Cura	Emulsão			
				0,57		
			46°C	0,74	0,67	0,00065
		Ambiente		0,69		
			58°C	0,34		
				0,61	0,45	0,00108
	DER-CE			0,40		
			46°C	0,20		
				0,09	0,12	0,00050
		50°C		0,08		
			58°C	0,14		
				0,57	0,44	0,00202
não modificado				0,61		
			46°C	2,65		
				3,78	3,43	0,00516
		Ambiente		3,85		
			58°C	0,08		
				0,04	0,16	0,00139
	DNIT			0,37		
			46°C	0,06		
				0,10	0,16	0,00113
		50°C		0,33		
			58°C	0,38		
				0,29	0,23	0,00131
				0,04		
			46°C	0,17		
		Ambiente		0,29	0,18	0,00069
modificado	DER-CE			0,09		
			46°C	1,48		
		50°C		0,49	0,79	0,00454
			46°C	0,42		

Fonte: elaborada pela autora.

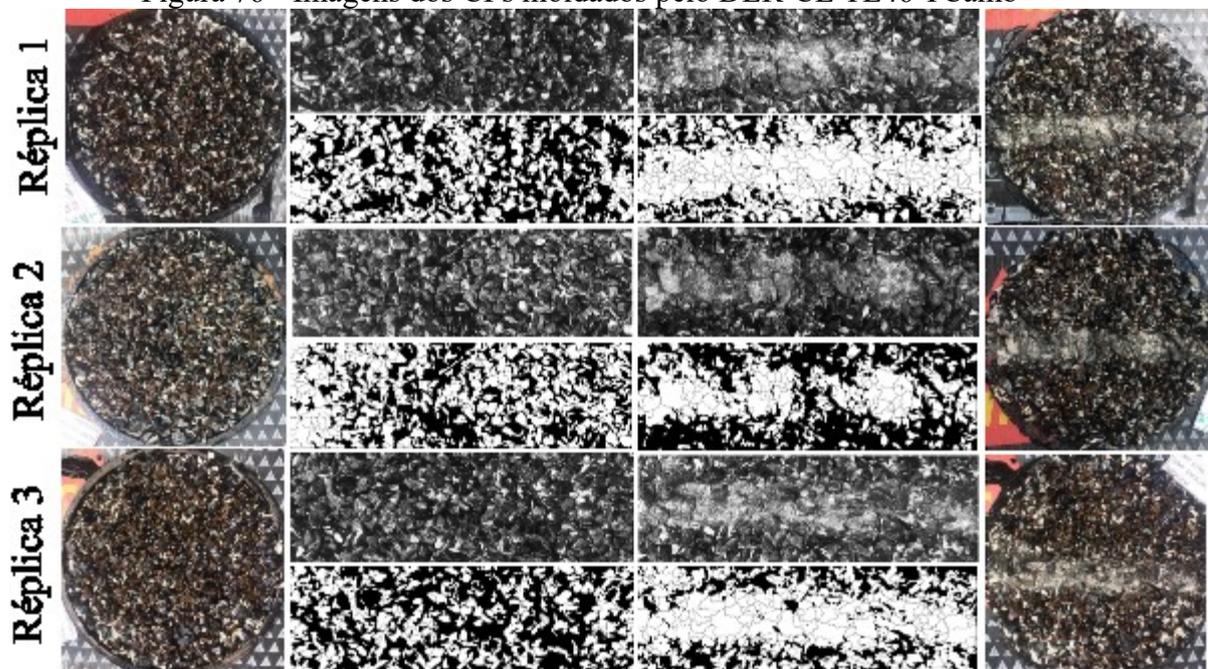
APÊNDICE E – IMAGENS DA ÁREA EXSUDADA POR RÉPLICA

Figura 75 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE46 TC50



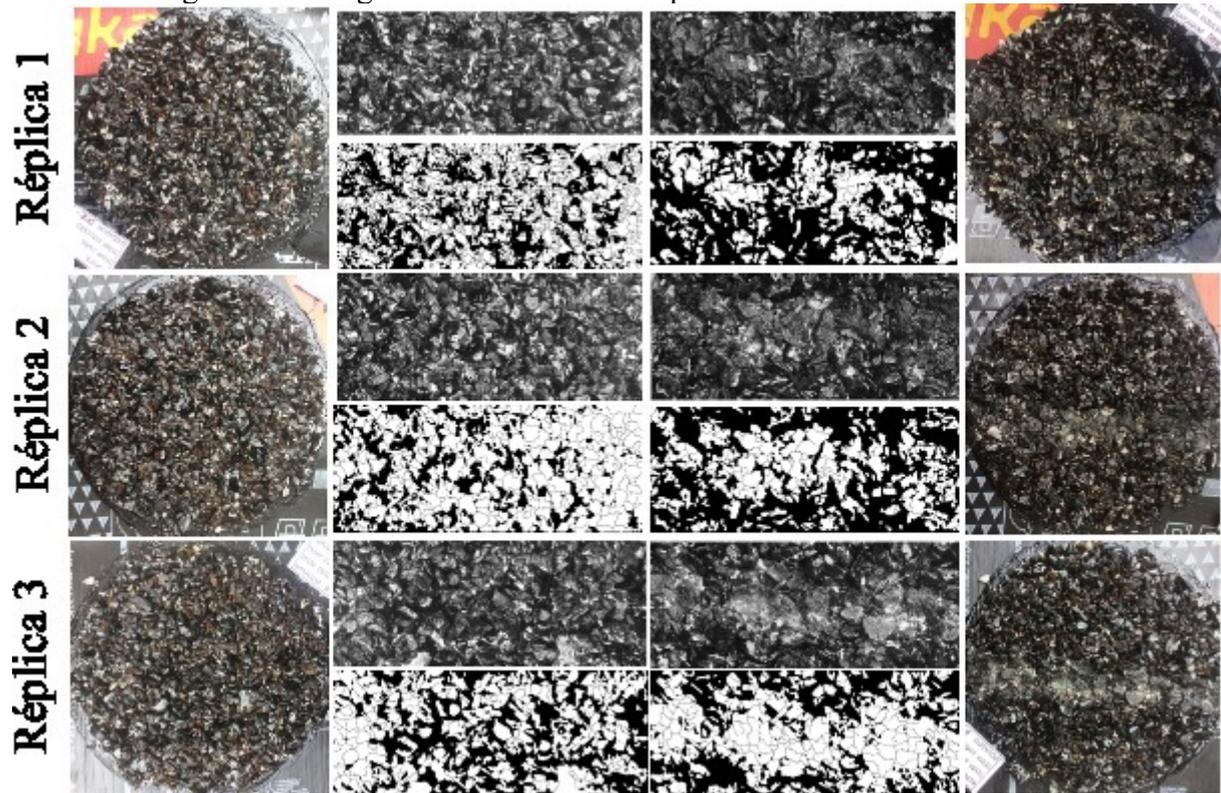
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 76 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE46 TCamb



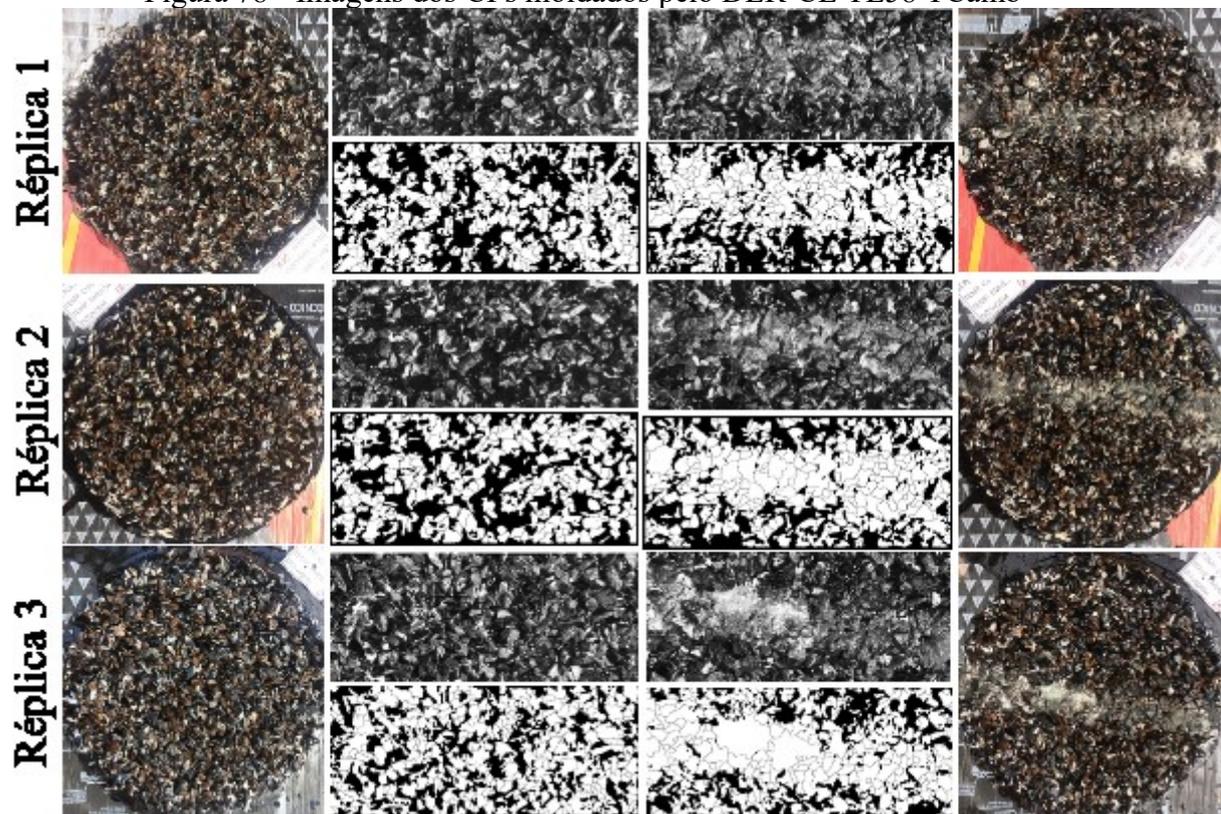
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 77 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE58 TC50



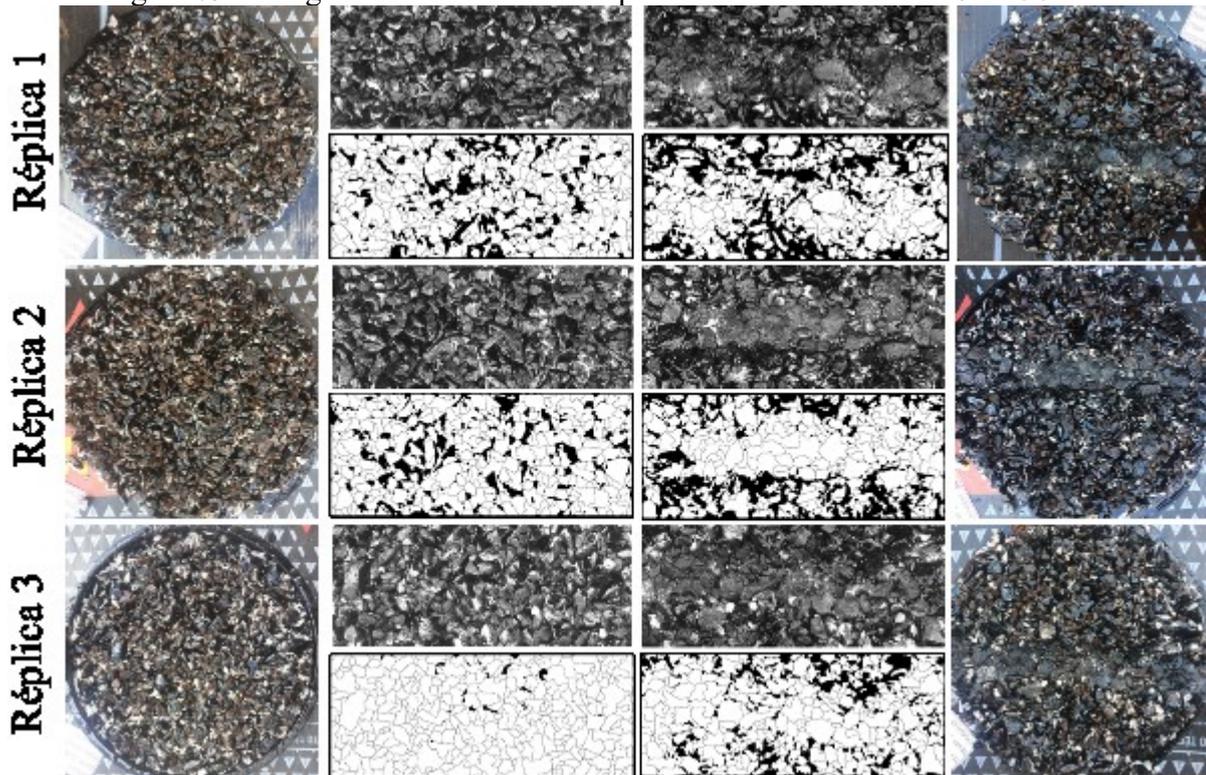
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 78 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE TE58 TCamb



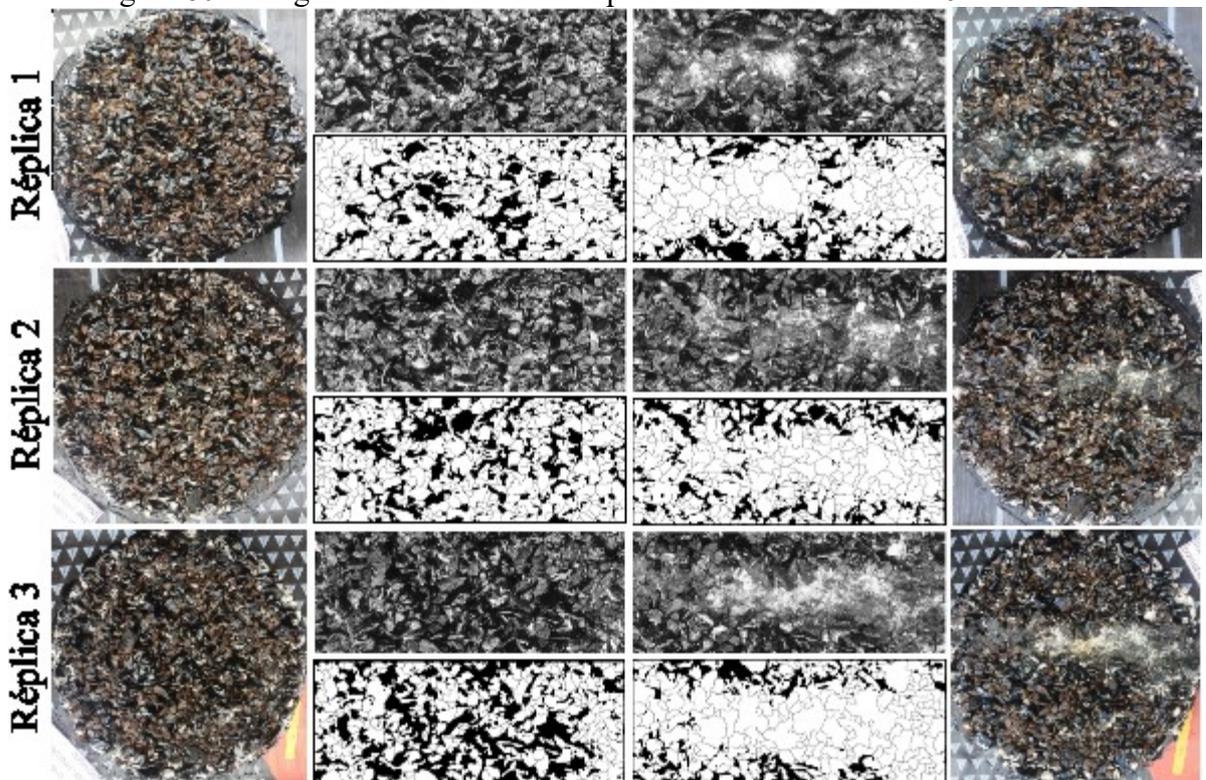
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 79 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE modif. TE46 TC50



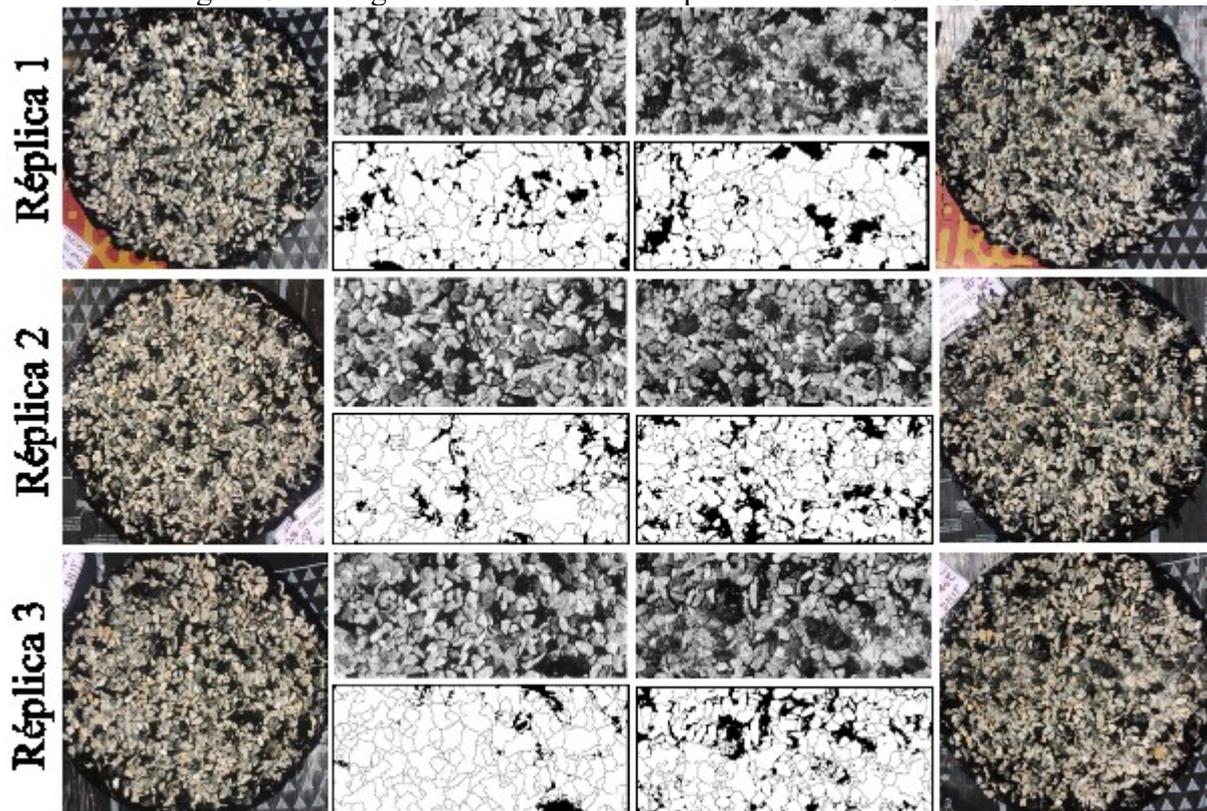
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 80 - Imagens dos CPs moldados pelo DER-CE modif. TE46 TCamb



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 81 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE46 TC50



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 82 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE46 TC50

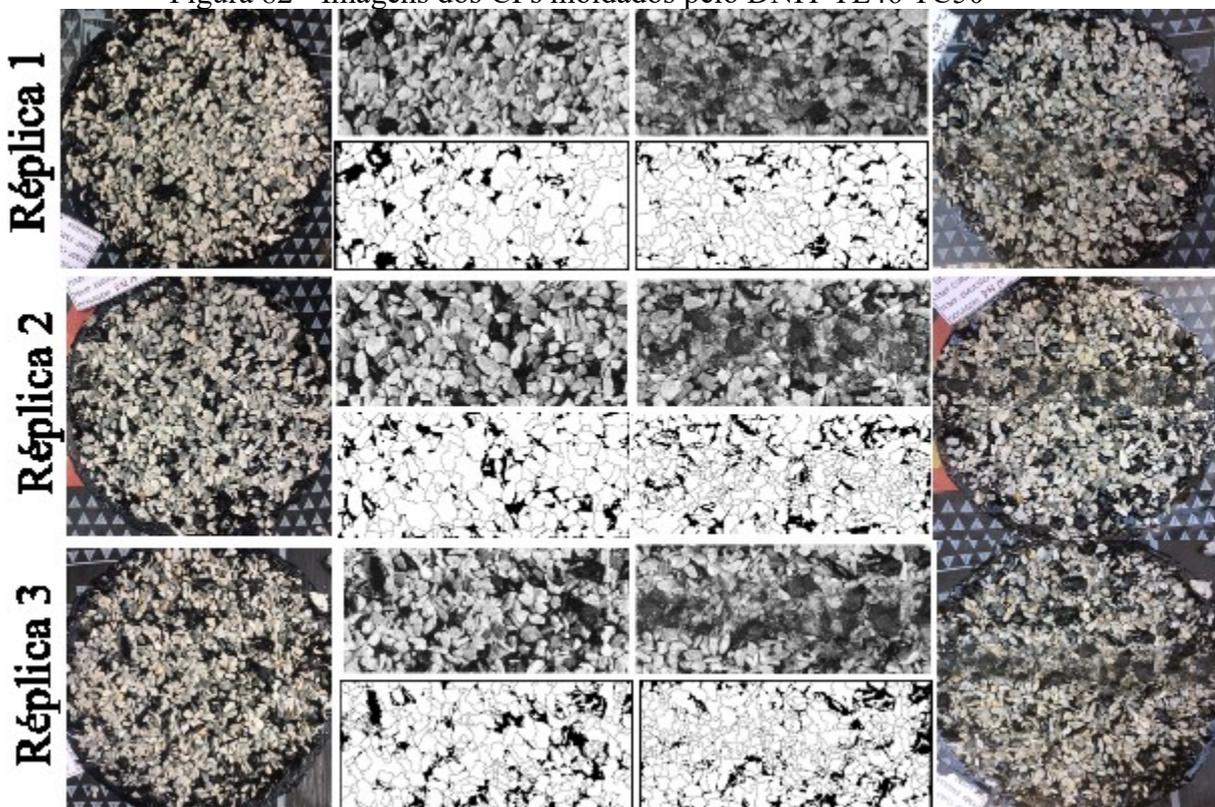
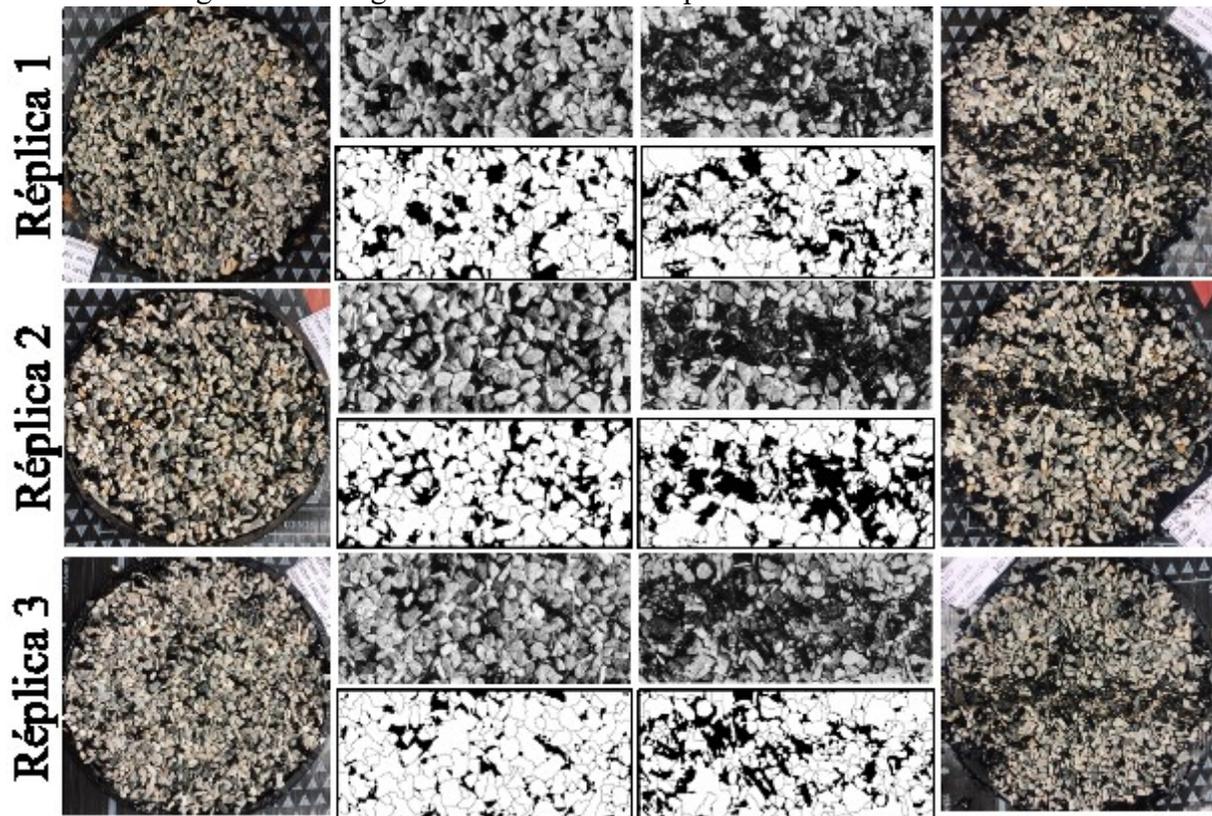
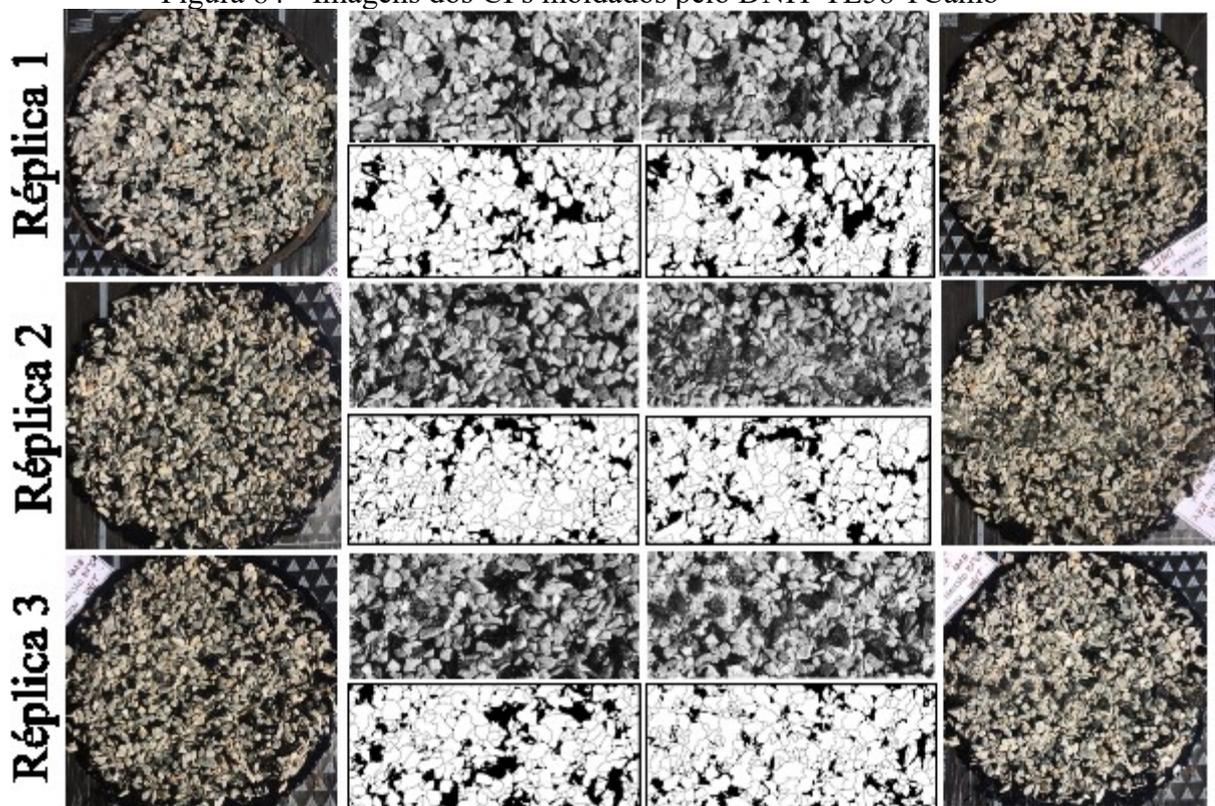


Figura 83 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE58 TC50



Fonte: elaborada pela autora.

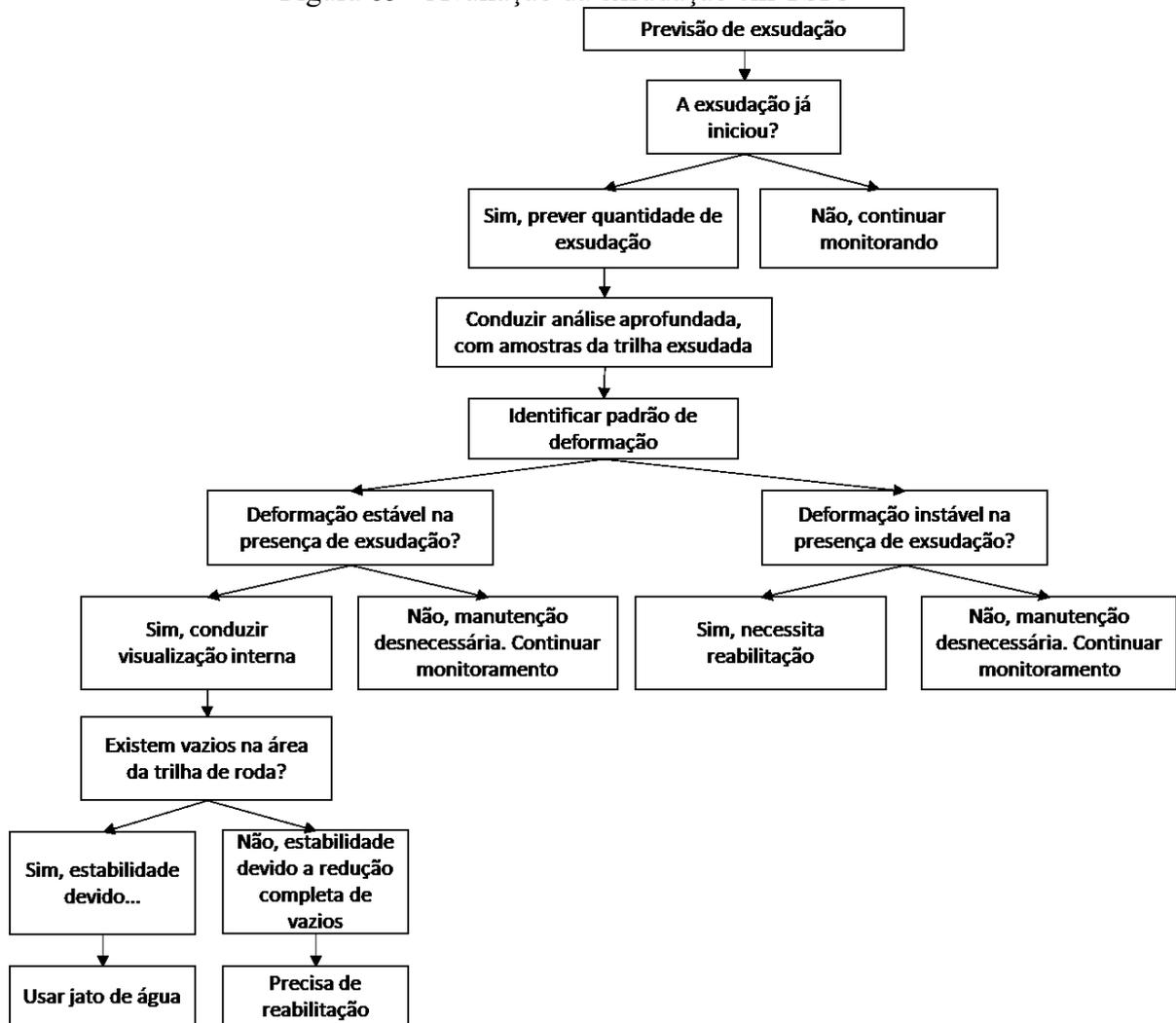
Figura 84 - Imagens dos CPs moldados pelo DNIT TE58 TCamb



Fonte: elaborada pela autora.

ANEXO A – AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE EXSUDAÇÃO

Figura 85 - Avaliação da exsudação em TSPs



Fonte: Traduzido de Kodippily *et al.* (2014).

**ANEXO B – PERFORMANCE-GRADED CHIP SEAL EMULSION
SPECIFICATIONS**

Figura 86 - Exemplo da EPG americana atual

	Chip Seal Emulsion Performance Grade											
	EPG 49				EPG 55				EPG 61			
	-7	-13	-19	-25	-7	-13	-19	-25	-7	-13	-19	-25
Average 7-day Maximum Pavement Surface Design Temperature, °C ^a	<49				<55				<61			
Minimum Pavement Surface Design Temperature, °C ^a	>-7	>-13	>-19	>-25	>-7	>-13	>-19	>-25	>-7	>-13	>-19	>-25
Proposed Test Methods ^b	Proposed Testing Temperature (°C)											
Tests on Original Emulsion												
Storage Stability Modified AASHTO T 59 Measured responses: Rotational viscosity, η , A – 24-hour separation ratio (Rs): 0.5 to 1.5 B – 24-hour stability ratio (Rd): max. 2	60											
Sprayability Modified AASHTO TP 48 Measured response: Viscosity @ 3 shear rates, Max. 400 cP @ high shear rate (150 rpm)	60											
Resistance to Drainout Modified AASHTO TP 48 Measured response: Viscosity @ 3 shear rates, Min. 50 cP @ low shear rate (5 rpm)	60											
Demulsibility AASHTO T 59 Measured response: % demulsibility Min. 40% (anionic) Min. 60% (cationic)	25											
Particle Charge AASHTO T 59 Measured response: particle charge Positive (cationic)	25											
Sieve Test AASHTO T 59 Measured response: % mass Max. 0.1%	25											
Solubility AASHTO T 44 Measured response: % solubility Min. 97.5%	25											
Float ^c AASHTO T 50 Measured response: float time Min. 1200 seconds	60											
Percent Residue AASHTO PP72 Measured response: % residue Min. 65% (cationic) Min. 63% (anionic)	25											
Tests on Residue Recovered Using AASHTO PP 72- Method B												
Resistance to Bleeding and Rutting AASHTO T 350 Measured response: Non recoverable creep compliance, J_{nr} Max Jnr @ 3.2 kPa, 8 kPa ⁻¹ (low traffic) ^d Max Jnr @ 3.2 kPa, 5.5 kPa ⁻¹ (medium traffic) ^e Max Jnr @ 3.2 kPa, 3.5 kPa ⁻¹ (high traffic) ^f	49				55				61			
Resistance to Low Temperature Raveling DSR Temperature Frequency Sweep Measured response: G^* at critical phase angle, δ_c Max. G^* @ δ_c : 30 MPa (low traffic) ^d Max. G^* @ δ_c : 20 MPa (medium traffic) ^e Max. G^* @ δ_c : 12 MPa (high traffic) ^f	5°C and 15°C											
	Critical phase angle, δ_c (°)											
	54	51	48	45	54	51	48	45	54	51	48	45

^a Pavement surface temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program or may be provided by the specifying agency.

^b Bitumen bond strength (BBS) should be used in accordance with AASHTO TP 91 to measure resistance to aggregate loss due to compatibility issues between aggregate and emulsion at the intermediate temperature grade, which is the average of the high and low emulsion performance grades, plus 4 degrees.

^c For high float emulsions only.

^d Low traffic is defined as any roadway with an AADT between 0 and 500 vehicles.

^e Medium traffic is defined as any roadway with an AADT between 501 and 2,500 vehicles.

^f High traffic is defined as any roadway with an AADT between 2,501 and 20,000 vehicles.

Fonte: Kim *et al.* (2017).