



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAIMI COSTA DA SILVA

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

FORTALEZA

2016

RAIMI COSTA DA SILVA

INTRODUÇÃO DE UM NOVO COEFICIENTE PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO
DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS A PARTIR DOS ESTUDOS DESENVOLVIDOS
NOS ESTADOS DO CEARÁ/BRASIL E CAROLINA DO NORTE/USA

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Engenheira Civil. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- S583i Silva, Raimi Costa.
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 / Raimi Costa da Silva – 2016.
92 f. il. color.
- Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2016.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Pavimentação. 2. Perda de agregado. 3. Exsudação. I. Título.

RAIMI COSTA DA SILVA

INTRODUÇÃO DE UM NOVO COEFICIENTE PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO
DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS A PARTIR DOS ESTUDOS DESENVOLVIDOS
NOS ESTADOS DO CEARÁ/BRASIL E CAROLINA DO NORTE/USA

Monografia submetida à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
para a obtenção do título de Engenheira Civil.
Área de concentração: Infraestrutura de
Transporte.

Aprovada em: 04/02/2016

BANCA EXAMINADORA

~~Prof. Dr. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)~~
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

M. Eng. Paulo Roberto Reis de Loiola
Departamento Estadual de Rodovias (DER-CE)

M. Eng. Synardo Leonardo de Oliveira Pereira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, irmãos e familiares que sempre me apoiaram, incentivaram e foram essenciais para que eu alcançasse todos os meus objetivos e chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Meu maior agradecimento vai para meus pais Augusto e Kátia, por todo o apoio, compreensão e amor em todos os momentos da minha vida. Agradeço aos meus irmãos, Rahym e Rayra, pelo companheirismo e pelo alívio cômico diário, sem vocês nada disso seria possível. Muito obrigada também a todos os meus familiares, avós, tias, tios e primos por todo o carinho e palavras e incentivo. Agradeço muito aos meus animais de estimação, Gui, Divy e Toy (*in memorian*), pelas alegrias que me proporcionaram e que me fizeram mais leve a cada dia. Amo vocês!

Obrigada a todos os meus colegas da engenharia civil, que tornaram essa jornada muito mais agradável, principalmente a Luana, Artur e Ytallo, que estiveram sempre presentes nos melhores momentos e nos mais difíceis também. Vou sentir saudades de todas as risadas e conversas sem sentido que tivemos diariamente! Desejo todo o sucesso do mundo para vocês.

Obrigada a todos os amigos que conquistei na Consultec e no Movimento Empresa Júnior, por tudo que aprendi e vivi com vocês. Apesar de todos os momentos difíceis, a gente sempre tentou fazer o máximo que conseguíamos. Vocês foram o primeiro passo para o que eu sou hoje, enfim, vocês foram incríveis!

Agradeço aos colegas do LMP, por todos os momentos de aprendizagem e brincadeiras, que acabaram me inspirando a realizar este trabalho. Principalmente ao Synardo, que foi como que um co-orientador para mim durante esse ano.

Obrigada aos colegas da Caixa Econômica Federal, engenheiros, técnicos, estagiários e funcionários por todo o reconhecimento, atenção e profissionalismo. Vocês sempre foram muito acolhedores e compreensivos. Adorei conviver e trabalhar com vocês!

Agradeço à minha orientadora, Professora Suelly, por quem tenho grande admiração, que mesmo longe se fez presente durante esse ano, pela confiança em mim e por todas as conversas de apoio durante esses anos de engenharia civil.

Por fim, obrigada a todos que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

O Tratamento Superficial por Penetração (TSP) é considerado um tipo de revestimento econômico, muito empregado no Brasil como primeiro revestimento de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Nos Estados Unidos, em países da Europa, na Austrália e na Nova Zelândia é utilizado como uma das principais medidas de manutenção preventiva de rodovias. Mesmo sendo o revestimento mais recorrente nas rodovias brasileiras, e nas rodovias estaduais do Ceará, são poucos os estudos na área que visem melhorias no processo de dosagem, construção e avaliação de TSPs. Atualmente, as publicações e normas específicas encontram-se desatualizadas e não acompanham as descobertas mais atuais do meio científico internacional sobre a temática. Portanto, a presente pesquisa buscou investigar os materiais e metodologias empregados na *North Carolina State University* (NCSU), que possui ampla experiência e tradição com esse tipo de revestimento, a fim de propor melhorias aos procedimentos e pesquisas realizados no Brasil. Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os diversos aspectos relevantes ao estudo de TSPs, como métodos construtivos, tipos de materiais empregados, equipamentos de campo, processo de compactação, métodos de dosagem, métodos de avaliação de desempenho e identificação de defeitos específicos. Com isso, optou-se por introduzir nacionalmente o conceito de PUC (*Performance-Based Uniformity Coefficient*), um parâmetro introduzido por Kim & Lee (2008b) associado à distribuição granulométrica do agregado, que tenta prever o percentual de agregado com tendência a gerar exsudação ou a se desprender do revestimento. A partir do cálculo do PUC de diversos agregados estudados no estado do Ceará e de uma comparação com o desgaste obtido nos ensaios de *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) adaptado, não se identificou uma relação direta entre os parâmetros e concluiu-se que não é possível comparar o PUC de agregados de origens diferentes. Mesmo assim, concluiu-se que o PUC é um coeficiente que pode auxiliar na escolha preliminar dos materiais, pois a granulometria tem forte influência na perda de agregado em TSPs. Além disso, comparou-se o PUC com as faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT e observou-se que mesmo agregados pertencentes a elas podem gerar altos PUCs e por consequência, tornarem-se inadequados ao emprego em TSPs. Ao final foi anexado um checklist de inspeção de TSPs utilizado pelo departamento de transporte da Carolina do Norte.

Palavras-chave: Tratamento Superficial por Penetração. Pavimentação. Perda de agregado. Exsudação. Coeficiente PUC.

ABSTRACT

The Asphalt Surface Treatment, more specifically the chip seal is considered a type of economic coating, much used in Brazil as the first road coating of Low Volume traffic highways. In the United States, European countries, Australia and New Zealand it is used as one of the main measures of preventive maintenance of roads. Even though chip seal is the most frequent surface coating on Brazilian highways, and state highways in Ceará, there are few studies in the area aimed at improvements in the design method, construction and evaluation of such surface course. Currently, specific publications and national standards are outdated and do not follow the most current findings of the international scientific community on the subject. Therefore, the present study aimed to investigate the materials and methods used in the North Carolina State University (NCSU), which has extensive experience and tradition with this type of coating in order to propose improvements to procedures and research carried out in Brazil. It was conducted a thorough literature review on all aspects relevant to the study of chip seals, such as construction methods, types of materials used, field equipment, rolling process, design methods, performance evaluation methods and identification of specific defects. As a result, it was decided to introduce nationally the concept of PUC (Performance-Based Uniformity Coefficient), a parameter introduced by Kim & Lee (2008b) associated with the particle size distribution of the aggregate, which tries to predict the aggregate percentage prone to generate exudation or to loosen the coating. From the PUC calculation of various aggregates studied in the state of Ceará and a comparison with the wear obtained in Wet Track Abrasion Test assays (WTAT) adapted, did not identify a direct relationship between the parameters and it was concluded that it is not possible to compare the PUC of different background aggregates. Nevertheless, it was concluded that the PUC is a coefficient that can assist in preliminary choice of materials, since the grain size has a strong influence on the aggregate loss of chip seals. Moreover, compared with the PUC granulometric ranges recommended by DNIT and it was observed that even aggregates belonging to them can generate high PUCs and therefore become unsuitable for employment in chip seals. Ao final foi anexado um checklist de inspeção de TSPs utilizado pelo departamento de transporte da Carolina do Norte. By the end was attached an inspection checklist for chip seals used by the North Carolina Department of Transportation.

Keywords: Chip seal. Paving. Aggregate loss. Bleeding. PUC coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos revestimentos.....	8
Figura 2 – Esquema explicativo do <i>chip seal</i>	10
Figura 3 – Operador de <i>chip sealing</i> na Nova Zelândia nos anos 20.....	11
Figura 4 – Caminhão espargidor em 1942 na Carolina do Norte (Estados Unidos).....	11
Figura 5 – Esquema comparativo – Tipos de TSP.....	14
Figura 6 – Processo sincronizado de aplicação de TSP.....	17
Figura 7 – Vassoura mecânica em operação.....	17
Figura 8 – Caminhão espargidor de ligante.....	18
Figura 9 – Detalhes do bico espargidor de ligante.....	19
Figura 10 – Distribuidor de agregado.....	19
Figura 11 – Equipamento multidistribuidor.....	20
Figura 12 – Rolo compactador de cilindro metálico seguido do rolo pneumático.....	20
Figura 13 – Fatores que influenciam na etapa de compactação.....	21
Figura 14 – Estágios de interação agregado/emulsão do <i>chip seal</i>	22
Figura 15 – Rolo combinado NCDOT.....	23
Figura 16 – Conceito de <i>Embedment Depth</i>	24
Figura 17 – Casos da fase III com a distribuição de passadas por camada.....	26
Figura 18 – Processo construtivo de um TSS.....	27
Figura 19 – Procedimento de campo proposto por Loiola (2009).....	29
Figura 20 – Compactador manual para TSPs do LMP.....	29
Figura 21 – Procedimento experimental de construção do TSD.....	30
Figura 22 – Procedimento de ensaio no simulador de pequeno porte SISTRAN.....	30
Figura 23 – Espalhamento de ligante pelo método da NCSU.....	31
Figura 24 – Espalhamento do agregado pelo método da NCSU.....	32
Figura 25 – Desgaste obtido no WTAT em amostras de TSS.....	33
Figura 26 – Construção das placas de TSP para avaliação de macro e microtextura.....	34
Figura 27 – Desgaste em placas de TSD de 10 cm no simulador de pequeno porte.....	34
Figura 28 – Equipamento MMLS3 da NCSU.....	36
Figura 29 – Histograma representando o valor crítico de GIV.....	36
Figura 30 – Mapeamento digital de Kim & Lee.....	37
Figura 31 – Taxa de aplicação de agregado por perda de agregado.....	38
Figura 32 – PDI utilizado por Adams (2014).....	39

Figura 33 – Equipamento <i>Flip-over test</i>	40
Figura 34 – Equipamento para o <i>Vialit test</i>	40
Figura 35 – Critério de McLeod	41
Figura 36 – Exemplo para cálculo do PUC	42
Figura 37 – Representação de TSP simples e múltiplo	43
Figura 38 – Método da caixa dosadora.....	44
Figura 39 – Exemplo do método da bandeja	45
Figura 40 – Método misto de dosagem de <i>chip seal</i>	48
Figura 41 – Perfil do ensaio de bandeja modificado na máquina de varredura a laser	49
Figura 42 – Exemplos de defeitos em tratamentos superficiais	51
Figura 43 – Passo 1 para obtenção do PUC.....	58
Figura 44 – Passo 2 para obtenção do PUC.....	58
Figura 45 – Passo 3 para obtenção do PUC.....	59
Figura 46 – Passo 4 para obtenção do PUC.....	59
Figura 47 – Agregado 1 graúdo (Pyla)	62
Figura 48 – Agregado 2 graúdo (OCS)	63
Figura 49 – PUC Agregado siderúrgico	63
Figura 50 – Gráfico comparativo da PUC e do Desgaste no WTAT	64
Figura 51 – Gráfico comparativo da Perda teórica e da Perda de agregado no WTAT	65
Figura 52 – Tamanho dos agregados de Kim & Lee (2008b) e Pereira (2013)	65
Figura 53 – Faixas A e B do DNIT 146/2012 – ES.....	66
Figura 54 – PUC limite superior Faixa A TSS	67
Figura 55 – PUC limite inferior Faixa A TSS	67
Figura 56 – PUC limite superior Faixa B TSS	68
Figura 57 – PUC limite inferior Faixa B TSS	68
Figura 58 – Faixas A, B e C do DNIT 147/2012 – ES	69
Figura 59 – PUC limite superior Faixa A TSD	70
Figura 60 – PUC limite inferior Faixa A TSD	70
Figura 61 – PUC limite superior Faixa B TSD	71
Figura 62 – PUC limite inferior Faixa B TSD.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos unitários de revestimentos asfálticos	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2 – Principais agregados empregados em TSPs	16
Tabela 3 – Principais ligantes empregados em TSPs	16
Tabela 4 – Média das porcentagens de perda agregado por tipo de rolo.....	24
Tabela 5 – Média das porcentagens de perda de agregado por número de passadas	25
Tabela 6 – Proporção dos vazios	39
Tabela 7 – Exemplos dos resultados de PUC	43
Tabela 8 – Defeitos específicos para tratamentos superficiais	50
Tabela 9 – Defeitos encontrados dos revestimentos do tipo TSP nos estados do Ceará (CE) e da Carolina do Norte (NC)	53
Tabela 10 – Exemplo de dados para plotagem de curva granulométrica	57
Tabela 11 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	61
Tabela 12 – Dados de desgaste e dosagem obtidos por Pereira (2013).....	61
Tabela 13 – Resumo dos percentuais passantes	62
Tabela 14 – Resumo dos valores obtidos de PUC e demais parâmetros.....	64
Tabela 15 – Granulometria dos agregados para aplicação em TSS	66
Tabela 16 – PUC dos limites da Faixa A do DNIT	67
Tabela 17 – PUC dos limites da Faixa B do DNIT	69
Tabela 18 – Granulometria dos agregados para aplicação em TSD.....	69
Tabela 19 – PUC dos limites da Faixa A do DNIT	71
Tabela 20 – PUC dos limites da Faixa B do DNIT	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAR	<i>Aggregate Application Rate</i> (Taxa de aplicação de agregado)
AAUF	Areia Asfalto Usinada a Frio
AAUQ	Areia Asfalto Usinada a Quente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ASHTOO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AS	Agregado Siderúrgico ou Escória de Aciaria
AST	<i>Asphalt Surface Treatment</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CA	Concreto Asfáltico
CBR/ISC	<i>California Bearing Ratio</i> / Índice de Suporte Califórnia
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CRS	<i>Cationic Rapid Set</i> , emulsão asfáltica catiônica de cura rápida
CS	<i>Cape Seal</i>
CU	Coeficiente de Uniformidade
DER-CE	Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará
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
EAC	Emulsão Asfáltica Catiônica
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EAR	<i>Emulsion Application Rate</i> (Taxa de aplicação de emulsão)
EUA	Estados Unidos da América
FOT	<i>Flip-over test</i>
GC	Grau de Compactação
GIV	<i>Gray Scale Value</i> , tradução literal valor na escala de cinza
LA	Lama asfáltica
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
MMLS3	<i>Third-Scale Model Mobile Loading Simulator</i> , Simulador de carregamento móvel 3D

MRAF	Microrrevestimento Asfáltico a Frio
NBR	Norma Brasileira
NCDOT	<i>North Carolina Department of Transportation</i>
NCSU	<i>North Carolina State University</i>
NIVA	<i>National Instruments Vision Assistant</i> , software americano para análise digital de imagens
PBA	Plano Básico Ambiental
PDI	Processamento Digital de Imagens
PUC	<i>Performance Based Uniformity Coefficient</i> , coeficiente de uniformidade baseado no desempenho
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
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará
SISTRAN	Sistema Integrado de Simulação de Tráfego Normatizado
SNV	Sistema Nacional de Viação
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TME	Tamanho Máximo Efetivo
TAP	Tratamento Antipó
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSP	Tratamento Superficial por Penetração
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
UFC	Universidade Federal do Ceará
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA.....	3
1.2.1. Problema Motivador e Justificativa.....	3
1.2.2. Questões Motivadoras	4
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. Objetivo geral	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. METODOLOGIA	5
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
2.2. DEFINIÇÃO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	8
2.3. BREVE HISTÓRICO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	10
2.4. CLASSIFICAÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL POR PENETRAÇÃO ..	12
2.5. MATERIAIS EMPREGADOS NO TSP	14
2.6. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO TSP	16
2.6.1. Vassoura mecânica.....	17
2.6.2. Caminhão espargidor de ligante.....	18
2.6.3. Distribuidor de agregado	19
2.6.4. Equipamento multidistribuidor	19
2.6.5. Compactador	20
2.6.5.1. Influência do processo de compactação em TSPs	21
2.7. PROCESSO CONSTRUTIVO DO TSP	26
2.8. PROCESSO CONSTRUTIVO DE AMOSTRAS DE TSP EM LABORATÓRIO ..	28
2.9. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TSPs EM LABORATÓRIO.....	32
2.9.1. Pesquisas realizadas na UFC.....	32
2.9.2. Pesquisas internacionais realizadas na NCSU	35
2.10. MÉTODOS DE DOSAGEM DOS TSPs	43

2.10.1.	Método da Caixa Dosadora (LARSEN, 1985)	44
2.10.2.	Ensaio de Placa ou Método da Bandeja (DER-CE)	44
2.10.3.	Método de Hanson (HANSON, 1935 <i>apud</i> PINTO, 2002).....	45
2.10.4.	Método da Califórnia (PINTO, 2002)	46
2.10.5.	Método de Tagle e Podestá (PINTO, 2002)	46
2.10.6.	Especificações do DER-CE (Baseada em Tagle e Podestá).....	46
2.10.7.	Método do NCSU (Adams, 2014)	47
2.11.	DEFEITOS DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	50
2.12.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....		55
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
3.2.	COLETA DE DADOS	56
3.3.	CÁLCULO DO PUC	57
3.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....		61
4.1.	DADOS DE GRANULOMETRIA, CARACTERIZAÇÃO E DOSAGEM	61
4.2.	PUC DOS AGREGADOS DE PEREIRA (2013).....	62
4.2.1.	Faixas do DNIT	66
a)	Tratamento Superficial Simples	66
b)	Tratamento Superficial Duplo	69
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		73
5.1.	CONCLUSÕES QUANTO AO PUC E O WTAT	73
5.2.	CONCLUSÕES QUANTO ÀS FAIXAS DO DNIT	73
5.3.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		75
ANEXO A – CHECKLIST PARA INSPEÇÃO DE <i>CHIP SEALS</i> (<i>Traduzido de NCDOT, 2015</i>).....		78

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Sistema Nacional de Viação (SNV, 2014) observou, a partir de dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2014), que no Brasil 78,6% das vias não são pavimentadas. No estado do Ceará, local em que foi realizada esta pesquisa, esse número aumenta para 79,42%, sendo 42.827,9 km de rede de jurisdição estadual não pavimentada.

De acordo com a Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR), aproximadamente 61% do volume de cargas transportadas no país ocorrem pelo modal rodoviário, ressaltando um grande papel econômico associado a este setor. Além do baixo percentual de vias pavimentadas, apenas 12% são consideradas aceitáveis por padrões internacionais. Em dados divulgados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2014), numa pesquisa com 148 países, o Brasil encontra-se em 120º lugar no *ranking* de qualidade de estradas, com nota menor que a maioria dos países da América do Sul.

Uma das alternativas econômicas para ampliar a rede nacional pavimentada é o emprego do Tratamento Superficial por Penetração (TSP) como primeiro revestimento de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT). Além do seu caráter econômico já comprovado, o TSP é considerado uma técnica de fácil aplicação, com rápida execução e liberação da pista (NOGAMI E VILLIBOR, 1995). De acordo com a tabela de custos da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA, 2015), o custo unitário de um revestimento do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD) é consideravelmente menor que o dos demais tipos de revestimentos mais comuns, como pode ser observado na Tabela 1.

Tipo de revestimento	Custo Unitário (R\$)
Tratamento Superficial Duplo (TSD)	4,2/m ²
Areia Asfalto Usinada a Frio (AAUF)	55,52/m ³
Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ)	91,62/m ³
Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)	139,11/m ³

Fonte: Adaptado de tabela desonerada SEINFRA, 2015.

Vários estados brasileiros da região Nordeste têm usado a opção de se empregar o tratamento superficial como primeiro revestimento de RBVT. Dados divulgados pelo DER-CE (2014) indicam que o Tratamento Superficial por Penetração (TSP)¹ é o principal

¹Neste estudo 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). Esse procedimento pode ser repetido múltiplas vezes conforme o número de camadas de

revestimento empregado na malha rodoviária pavimentada do estado do Ceará, representando 61% do total. Segundo dados coletados por Mesquita Júnior (2013), o estado da Bahia apresenta 41% dos revestimentos aplicados em TSP, sendo 34% tratamento superficial duplo. No estado do Sergipe não foram obtidos dados oficiais, mas técnicos da região declararam que o TSD também era o tipo de revestimento mais utilizado.

O TSP também é uma técnica largamente utilizada na engenharia rodoviária para a manutenção preventiva e corretiva de pavimentos para rodovias de médio e alto volume de tráfego (KIM & LEE, 2008a). Atualmente, é vasta a aplicação do TSP como primeiro revestimento de rodovias brasileiras de baixo e médio volume de tráfego. Apesar disso, os métodos de dosagem normatizados no Brasil para esse serviço ainda são empíricos e pouco eficientes, indicando uma carência de estudos mais aprofundados que visem maximizar seu desempenho. A proposta deste trabalho de graduação visa contribuir para o aperfeiçoamento dos serviços de tratamentos superficiais por penetração como revestimento para RBVTs no Brasil, bem como introduzir conceitos que possam auxiliar na análise do desempenho dos TSPs.

Na França, os TSPs podem ser chamados de “*Enduits Superficiels*”, nos Estados Unidos de “*Asphalt Surface Treatments (AST)*” ou “*Chip Seal*” e na Austrália de “*Sprayed Seal*” (LOIOLA, 2009). 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 desempenho desse tipo de revestimento. Alguns estudos já investigaram quais os impactos dos materiais finos e de ligantes modificados na interação ligante-agregado quando empregados em *Chip Seals* (ADAMS, 2014), o quão importante é a dosagem para o desempenho do revestimento (KIM & LEE, 2009), qual o impacto da etapa de compactação (KIM & LEE, 2008a), dentre outros.

A execução correta da técnica e a utilização de uma dosagem adequada poderiam gerar maior aproveitamento dos materiais usuais, bem como de materiais alternativos em substituição parcial ao agregado natural, diminuindo então o passivo ambiental gerado. Materiais como o agregado siderúrgico, por exemplo, já foram estudados nacionalmente para aplicação em TSP e foram obtidos resultados satisfatórios quanto ao seu bom desempenho (LOIOLA, 2009; PEREIRA, 2010, 2013; ROCHA, 2011).

Um entrave grande para a evolução dos estudos de dosagem de TSPs no Brasil é a falta de métodos de avaliação de desempenho para esse revestimento. Loiola (2009)

distribuição de agregados e ligantes, podendo ser denominado de Tratamento Superficial Simples (TSS), Tratamento Superficial Duplo (TSD) ou Tratamento Superficial Triplo (TST).

introduziu em seu estudo uma adaptação do ensaio *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) para avaliar a perda de agregado em placas produzidas em laboratório. Pereira (2010, 2013) utilizou o mesmo princípio e adaptou o método proposto por Loiola (2009), mas em ambos os estudos não foi possível validar os resultados.

O método de dosagem proposto por Adams (2014), na *North Carolina State University* (NCSU), utiliza como variáveis determinantes para a dosagem do *Chip Seal*, como eles nominam o TSP, diversos parâmetros e testes que serão detalhados no capítulo 2 do presente trabalho. Algumas das pesquisas desenvolvidas no estado da Carolina do Norte/EUA possuem diversas formas de avaliar o desempenho do revestimento, utilizando varreduras a laser, Processamento Digital de Imagens (PDI), simuladores dinâmicos, fabricação de TSP em laboratório, testes de adesão pneumática, entre outros (KIM & LEE, 2008a; ADAMS, 2014). Kim & Lee (2009) também introduziu um parâmetro chamado PUC (*Performance-Based Uniformity Coefficient*), o qual permite uma previsão aproximada do percentual de exsudação e de perda de agregado no revestimento apenas avaliando a sua curva granulométrica.

O empirismo na dosagem, a falta de equipamentos adequados para a avaliação de desempenho e a escassez de pesquisas nacionais foram os principais motivos para investigar procedimentos internacionais sobre os TSPs. Neste sentido, os estudos aqui desenvolvidos foram, principalmente, apoiados na experiência da NCSU, que apresenta uma tradição no emprego e aperfeiçoamento desse tipo de revestimento asfáltico, bem como nos estudos desenvolvidos no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

1.2. PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA

1.2.1. Problema Motivador e Justificativa

A falta de vias de acesso pavimentadas pode ocasionar inúmeros problemas à população, tais como: falta de suprimentos de necessidade básica, por dificuldade de abastecimento de cargas de outras origens; 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, ao não prover a infraestrutura necessária à mobilidade. Uma solução mais econômica para a ampliação da malha pavimentada brasileira é o emprego de revestimentos mais delgados do tipo tratamento superficial por penetração.

Dados divulgados pelo DER-CE (2014) indicam que o tratamento superficial por penetração é o principal revestimento empregado na malha rodoviária pavimentada do estado do Ceará. Em contraponto, notou-se por pesquisas mais recentes (LOIOLA, 2009; PEREIRA, 2010, 2013) que os estudos voltados para TSPs no Brasil estão estagnados e defasados. Faltam métodos de dosagem não exclusivamente empíricos e são necessárias atualizações nas normas. É importante mencionar que o último livro nacional sobre o tema foi publicado pelo engenheiro Johannes Larsen em 1985. Ao longo desses 30 anos surgiram novos equipamentos, desenvolveram-se os ligantes com polímero e vem crescendo o emprego de agregados alternativos em pavimentação. Entretanto, a técnica utilizada em serviços de TSPs permanece a mesma recomendada por Larsen em 1985.

A correta construção do TSP e a utilização de uma dosagem adequada poderiam gerar maior 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 deste serviço. Tal cenário mostra a relevância do tema para a ampliação e a melhoria da malha rodoviária brasileira, necessitando, portanto, de maior atenção por parte dos órgãos reguladores e do meio científico.

O problema motivador do trabalho é a baixa eficiência dos métodos de dosagem utilizados no Brasil para tratamentos superficiais por penetração, mesmo este sendo um tipo de revestimento largamente utilizado no país. Isso pode ser comprovado pela quantidade elevada de defeitos identificados em pavimentos revestidos com TSPs. A possibilidade de se introduzir novos conceitos e práticas que possam auxiliar na previsão das principais falhas (perda de agregados e exsudação) pode ajudar a mitigar o problema. Sendo assim, buscou-se apoio nos estudos internacionais, desenvolvidos na NCSU, e nacionais, desenvolvidos na UFC, para que o conhecimento sobre o tema pudesse ser ampliado.

1.2.2. Questões Motivadoras

- A partir da experiência internacional da NCSU é possível se melhorar a abordagem técnica e científica dos TSPs no estado do Ceará?
- Quais as principais boas práticas que devem ser realizadas em campo para que o desempenho do TSP seja mais eficiente?
- Quais os principais defeitos observados em pavimentos revestidos com TSPs nos estados do Ceará e da Carolina do Norte? O processo de dosagem tem alguma influência nisso?

- Como são produzidas as amostras de TSP em laboratório na NCSU? O processo se assemelha ao realizado em campo?
- Como é avaliado o desempenho das amostras de TSP produzidas em laboratório no LMP e na NCSU? São avaliadas quais variáveis?
- A granulometria do agregado selecionado para emprego em TSP pode influenciar no seu desempenho?
- Qual a importância das faixas delimitadas pelo DER-CE e pelo DNIT para escolha dos agregados? Elas são eficientes?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é introduzir um novo coeficiente para análise do desempenho dos tratamentos superficiais por penetração a partir dos estudos realizados nos estados do Ceará/Brasil e Carolina do Norte/Estados Unidos da América.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar as principais deficiências no processo de concepção e construção de TSPs no estado do Ceará com base nas experiências da NCSU.
- Comparar os defeitos específicos dos revestimentos do tipo TSP observados nos estados do Ceará/Brasil e na Carolina do Norte/USA.
- Investigar o procedimento laboratorial para produção de amostras de TSP utilizado na NCSU.
- Investigar os métodos de avaliação de desempenho de tratamentos superficiais empregados na NCSU.
- Investigar se a granulometria dos agregados pode influenciar no desempenho dos TSPs.
- Verificar a eficiência das faixas granulométricas do DER-CE e do DNIT para escolha de agregados de serviços de tratamentos superficiais por penetração.

1.4. METODOLOGIA

Para que os objetivos do trabalho fossem alcançados, primeiramente realizou-se uma ampla revisão bibliográfica acerca dos principais estudos realizados nos estados do Ceará e da Carolina do Norte/EUA. Em seguida, sugeriu-se a introdução de um novo conceito relacionado ao desempenho do revestimento, chamado PUC (*Performance-Based Uniformity*

Coefficient). Utilizou-se esse parâmetro para avaliar a eficácia do ensaio *Wet-Track Abrasion Test* (WTAT) adaptado, proposto por Loiola (2009) e reproduzido por Pereira (2010, 2013). Verificou-se também a eficiência das faixas granulométricas propostas pelo DNIT para agregados a serem empregados em TSPs. Dividiu-se o presente estudo em quatro etapas metodológicas, listadas abaixo:

- i. Revisão bibliográfica;
- ii. Coleta dos dados de granulometria e desgaste dos agregados;
- iii. Cálculo do PUC;
- iv. Análise dos resultados;

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O estudo em questão foi organizado em cinco capítulos. Primeiramente, o capítulo 1 introduz e contextualiza o tema, abordando a justificativa e o problema de pesquisa, bem como as questões motivadoras, os objetivos e um resumo da metodologia utilizada. O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica acerca dos TSPs, métodos construtivos, métodos de avaliação, métodos de dosagem, materiais e equipamentos empregados, etc. O capítulo 3 é o de materiais e métodos, no qual são abordados com mais detalhes as etapas metodológicas e os dados necessários ao estudo. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as suas respectivas análises. O capítulo 5 contém as conclusões obtidas pelo estudo e algumas sugestões para pesquisas futuras. Além dos capítulos, ao final do documento encontram-se listadas as fontes bibliográficas que foram consultadas e que serviram de apoio ao estudo, bem como um anexo que apresenta um *checklist* de inspeção proposto na Carolina do Norte, para a construção de TSPs.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O Nordeste brasileiro possui uma extensa malha rodoviária não pavimentada, o que caracteriza a carência atual do sistema de transporte nacional (DNIT, 2014). Devido a isso, o setor de transportes vem sendo tratado como protagonista de investimentos públicos e de inúmeras pesquisas acadêmicas que visam o crescimento e o desenvolvimento econômico do país.

Muitas rodovias do Nordeste são caracterizadas como Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVTs). Nogami e Villibor (1995) consideraram que as RBVTs fazem parte do grupo dos pavimentos econômicos que são compostos principalmente por bases de materiais naturais e revestimentos de espessura delgada. Atualmente, a classificação das RBVTs varia de acordo com a referência utilizada. O Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará (DER-CE) atualmente, em 2015, considera informalmente que estas são rodovias com um volume médio de tráfego inferior a 700 veículos/dia².

O tratamento superficial por penetração é uma das soluções mais adotadas para o revestimento de RBVTs no Brasil, principalmente devido ao seu caráter econômico (LOIOLA, 2009). Já em países como a Nova Zelândia e Estados Unidos, é aplicado principalmente na manutenção preventiva de vias de médio e alto volume de tráfego. De acordo com Larsen (1985), países como a Austrália tem essa técnica tão bem desenvolvida que chega a 90% o índice de utilização do tratamento superficial para conservação de pavimentos flexíveis.

Nos EUA, os órgãos públicos de transportes de cada estado, os chamados DOTs (*Departments of Transportation*), utilizam os tratamentos superficiais como principal opção de manutenção e conservação de rodovias, pois tal técnica é considerada a alternativa mais econômica para o aumento da vida útil dos pavimentos. Dada a sua importância, os TSPs são temas de diversos estudos acadêmicos e os DOTs divulgam frequentemente manuais de boas práticas que incluem novas descobertas e tecnologias desenvolvidas.

Nas seções posteriores será realizada uma breve revisão bibliográfica sobre os estudos na área, definição de tratamento superficial por penetração, os materiais empregados, os equipamentos utilizados para a construção e os principais defeitos observados nesse tipo de

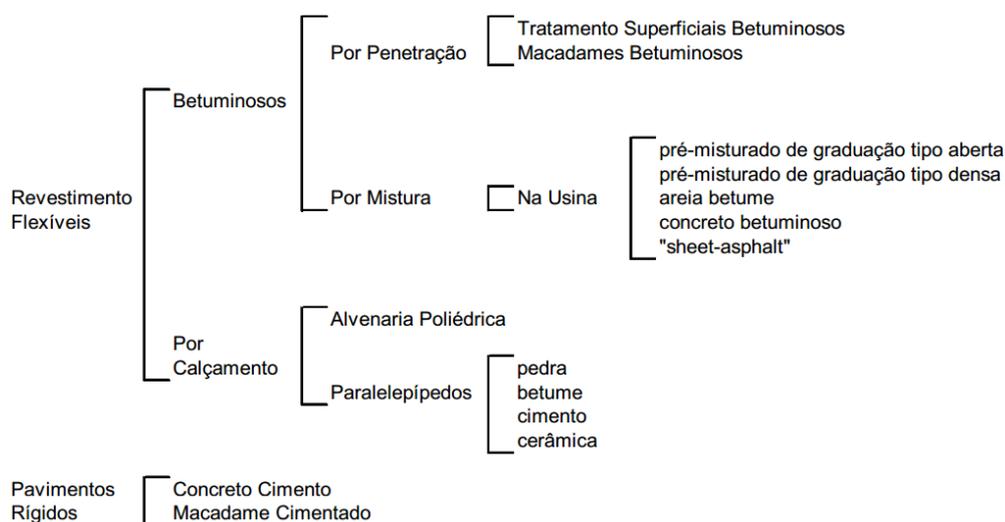
²O DER-CE considera que rodovias com volume menor que 700 veículos/dia são de tráfego leve, entre 700 e 1500 veículos/dia de tráfego médio e maior que 1500 veículos/dia de tráfego pesado. Essa classificação é informal e foi obtida por meio de ligação telefônica para a sede do DER-CE no dia 11/11/2015.

revestimento. Por fim, serão explanadas algumas metodologias de dosagem relevantes para os estudos atuais do tema e detalhadas as metodologias utilizadas no Brasil pelo DER-CE e nos Estados Unidos pela NCSU.

2.2. DEFINIÇÃO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

Consideram-se tratamentos de superfície, os serviços executados pelo espalhamento de ligante asfáltico e agregado, como o tratamento superficial por penetração e o anti-pó, o microrrevestimento asfáltico a frio, a lama asfáltica e o *cape seal* (ABEDA, 2010). O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) enquadra o tratamento superficial na família dos revestimentos flexíveis betuminosos, como pode ser verificado na Figura 1. Alguns tipos de tratamentos superficiais citados por Abeda (2010) serão detalhados a seguir.

Figura 1 – Classificação dos revestimentos



Fonte: Manual de pavimentação, DNIT (2006).

A Lama Asfáltica (LA) é por definição uma mistura de água, emulsão asfáltica, fíler e agregado mineral aplicado em temperatura ambiente. Geralmente, esse serviço é realizado na manutenção preventiva rodoviária, podendo ser com função impermeabilizante ou o de rejuvenescimento do revestimento.

O Tratamento Antipó (TAP) é um serviço recomendado para vias rurais ou RBVT. É realizado pelo espalhamento de emulsão asfáltica sobre uma superfície não pavimentada, seguido do espalhamento de agregado mineral ou saibro, com o objetivo de diminuir a propagação de poeira. É uma alternativa de curto prazo e de baixo custo.

O Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) é uma mistura a frio composta por emulsão modificada por polímero, agregado mineral, fíler, água e aditivos. Considera-se esse

tratamento como uma evolução da lama asfáltica. No entanto, a utilização de materiais mais nobres e o controle na dosagem e na aplicação aumentam sua durabilidade e permitem uma utilização mais ampla, como selagem de trincas, melhoria na aderência entre pneu e pavimento e preenchimento de trilhas de roda.

O *Cape Seal* (CS) consiste na união de duas técnicas de tratamento, o tratamento superficial simples seguido do MRAF. O TSS torna o revestimento mais flexível, enquanto o MRAF é responsável pela impermeabilização e pela rugosidade da superfície. Tais propriedades permitem que o CS seja utilizado para reabilitação de revestimentos de tráfego médio e pesado ou na reconstrução de vias.

O Tratamento Superficial por Penetração (TSP), para Larsen (1985), é um revestimento de pouca espessura, da ordem de 5 a 20 mm quando acabado, que é construído pelo espalhamento sucessivo de emulsão asfáltica e agregado, seguido de compactação. Tal técnica é conhecida por representar uma alternativa eficiente e econômica para o revestimento das RBVTs.

Para Larsen (1985) e Bernucci *et al.* (2010), devido a sua pouca espessura, o tratamento superficial não tem função estrutural nem pode servir de correção para defeitos construtivos transversais e longitudinais. As suas principais funções são:

- proporcionar uma camada de rolamento com alta resistência ao desgaste;
- impermeabilizar as camadas inferiores do pavimento e por consequência proteger sua infraestrutura;
- apresentar alta flexibilidade a fim de acompanhar as deformações significativas da estrutura;
- proporcionar aumento na aderência pneu-pavimento e por consequência aumentar o nível de segurança da via;
- ser utilizado como etapa inicial do revestimento para vias de tráfego médio e pesado;

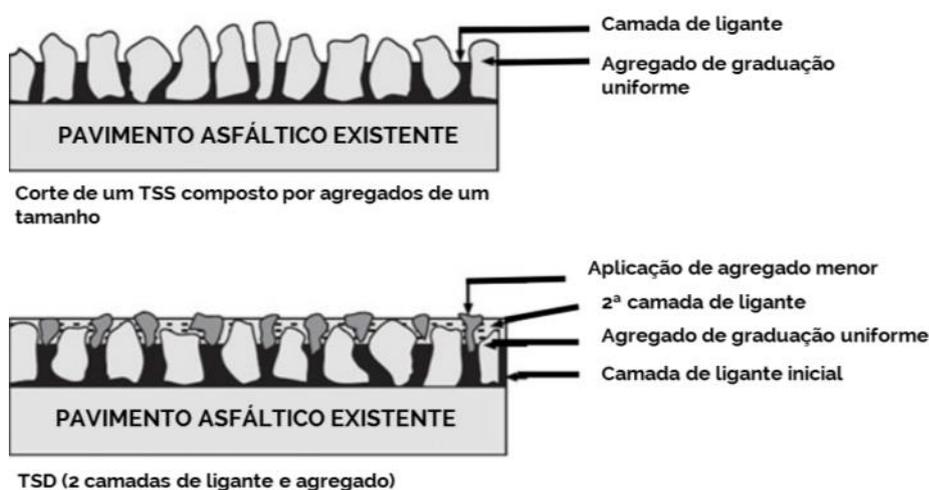
Internacionalmente, os tratamentos superficiais recebem diversas nomenclaturas, “*Enduits Superficiels*” na França, “*Asphalt Surface Treatments (AST)*” nos Estados Unidos e “*Sprayed Seal*” na Austrália. No estado da Carolina do Norte, existem diversos estudos sobre o *chip seal*, tipo de AST, realizados na NCSU. De acordo com a agência reguladora da Carolina do Norte, o NCDOT (2015, p.2),

Chip seals, em termos básicos, consistem numa camada de emulsão asfáltica e agregado uniforme colocados sobre a faixa de rolagem e compactados. O tipo de emulsão e de agregado varia, bem como o número de camadas, mas a cada

espalhamento sucessivo de emulsão e agregado, deve ser realizada a compactação para garantir a retenção dos agregados³.

O conceito de *chip seal* pode ser considerado análogo ao de TSP devido às funções semelhantes associadas a esses revestimentos pelo seu processo construtivo. De acordo com NCDOT (2015), os *chip seals* (Figura 2) são aplicados sobre pavimentos oxidados ou envelhecidos e suas principais propriedades são de selar fissuras recém-formadas, de restaurar o caráter impermeabilizante do revestimento e de aumentar a aderência de pavimentos menos rugosos ou exsudados.

Figura 2 – Esquema explicativo do *chip seal*



Fonte: Traduzido de NCDOT (2015).

2.3. BREVE HISTÓRICO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os primeiros relatos de construção de um tratamento superficial semelhante ao conhecido atualmente vieram da Inglaterra em 1834 e da França em 1840, quando ainda utilizavam-se produtos brutos originados do refino do petróleo. Ainda no final do século XIX, a técnica já havia se espalhado para outros países, como a Nova Zelândia (Figura 3) e a Austrália que atualmente têm muita tradição nesse método construtivo.

Na América, os relatos de construção de tratamentos superficiais ocorreram alguns anos depois, mas os Estados Unidos têm documentos e registros fotográficos que datam dos anos 30 do século XX. No estado da Carolina do Norte (EUA), os primeiros trechos datam da década dos anos 40 e a tecnologia utilizada (Figura 4) já havia evoluído em relação à

³ *Chip seals; in basic terms, consist of a layer of emulsified asphalt and uniform graded aggregate placed on the roadway and rolled. The type of emulsions and aggregates vary as does the number of layers but each successive lift of asphalt and emulsion should be rolled to assure aggregate retention.*

empregada anteriormente na Nova Zelândia, inclusive com grandes semelhanças à técnica ainda utilizada atualmente.

Figura 3 – Operador de *chip sealing* na Nova Zelândia nos anos 20



Fonte: TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ (2005).

Figura 4 – Caminhão espargidor em 1942 na Carolina do Norte (Estados Unidos)



Fonte: NCDOT (2015).

Com o surgimento do automóvel, foi possível automatizar o processo construtivo dos tratamentos superficiais e também foi introduzido o conceito de emulsionar o asfalto, para facilitar a sua aplicação (LARSEN, 1985). Apesar de ser uma técnica relativamente antiga, com quase dois séculos de história, o primeiro método de dosagem conhecido e que ainda é a base de diversos métodos atuais, proposto pelo engenheiro F. M. H. Hanson, é datado de 1935. Já as pesquisas científicas na área só tiveram início em meados do século XX, nas principais universidades do mundo na época (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005).

Mesmo não tendo ocorrido grandes alterações em relação à técnica original, atualmente investigam-se novas formas de melhorar o serviço de TSP em todo o mundo. Nos Estados Unidos, verificou-se que a adição de polímero à emulsão pode diminuir riscos de deformação permanente e perda de agregado no revestimento, bem como aumentar o tempo de vida do pavimento (KIM & LEE, 2010).

Como contribuição à técnica construtiva, desenvolveu-se um equipamento chamado de multidistribuidor que realiza o espalhamento sucessivo de emulsão e agregado, diminuindo então os riscos de cura (ruptura do ligante) antes da aplicação do agregado. Além dos benefícios operacionais devido à diminuição de intervalos e consequente otimização do processo.

Em nível de laboratório, a tendência mundial é a utilização de simuladores de tráfego para avaliação do desempenho de TSPs. No Brasil, os estudos ainda são escassos, mas Pereira (2013) utilizou um simulador de pequeno porte para avaliar a perda de agregado em amostras de TSP e Vasconcelos (2013) na avaliação de *cape seal*. Nos EUA, os simuladores são amplamente usados para validação de outros ensaios e para a avaliação da qualidade do TSP (KIM & LEE, 2008a, 2008b, 2009, 2010; ADAMS, 2014).

2.4. CLASSIFICAÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL POR PENETRAÇÃO

A classificação dos TSPs é geralmente considerada 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.

a) Tratamento Superficial Simples (TSS)

Para a construção de um TSS, aplica-se uma camada de ligante sobre a base imprimada ou um revestimento antigo devidamente tratado, em seguida deve-se colocar uma camada de agregado e por fim é feita a compactação. Uma peculiaridade desse tipo de revestimento é a penetração exclusivamente invertida do ligante no agregado, pois ocorre de baixo para cima.

Nos EUA, o NCDOT utiliza o termo *Single Seal* ou *Straight Seal* para *chip seals* que são construídos com apenas uma camada de ligante e uma camada de agregado, ou seja, TSS.

No Brasil, nas vias de jurisdição do DNIT, seguem-se duas especificações de serviço para TSS, a DNIT 146/2012 – ES “Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Simples com Ligante Asfáltico Convencional – Especificação de Serviço” e a DNER-ES 391/99 “Pavimentação - Tratamento Superficial Simples com Asfalto Polímero”. Já para as rodovias

estaduais do Ceará, a especificação de serviço em uso pelo DER-CE é a DERT-ES-P 10/00 – Tratamento Superficial Simples.

Por ser mais antiga, a norma DNER-ES 391/99 é considerada um pouco limitada no detalhamento da execução do serviço, no entanto é a mais atual para execução de TSS com adição de polímero, mais especificamente o estireno-butadieno-estireno (SBS). A norma do DNIT 146/2012 é ainda pouco detalhada, mas já foi atualizada com alguns tópicos importantes, como as recomendações de execução do serviço nas juntas de dilatação a fim de impedir regiões com falha ou excesso de ligante. Além disso, as condições ambientais tornaram-se mais rigorosas, direcionando para o normativo específico DNIT 070/2006 PRO, que descreve os documentos exigidos atualmente pelas autoridades ambientais, como EIA (Estudo de Impacto Ambiental) e PBA (Plano Básico Ambiental). A inspeção, o controle tecnológico e os critérios de medição também foram atualizados e tornaram-se mais exigentes em relação à norma anterior. Uma falha grave de ambas as normas citadas é que decisões importantes foram deixadas a cargo do operador, como as taxas de ligante e agregado a serem aplicadas que são escolhidas dentro de uma faixa aceitável, mas sem um critério mais rígido.

Em comparação com as normas nacionais, a norma do DER-CEDERT-ES-P 10/00 – Tratamento Superficial Simples apresenta maiores detalhes sobre o processo construtivo do TSS. Por exemplo, os agregados recomendados podem pertencer a três faixas granulométricas diferentes, as classes I, II e III, diferente da faixa granulométrica única recomendada pelo DNIT. As instruções sobre liberação de tráfego também são importantes para a eficiência do pavimento e não foram abordadas nas normas do DNIT. Quanto à dosagem, esta norma é mais assertiva, pois as taxas de agregado e ligante dependem do tamanho do agregado, cujas fórmulas serão exploradas na seção 2.10.6 do presente estudo. Em geral, esta pesquisa baseou-se nas normas do DER-CE e não nas do DNIT, por considerá-las mais completas quanto às orientações de execução do serviço.

b) Tratamento Superficial Duplo (TSD)

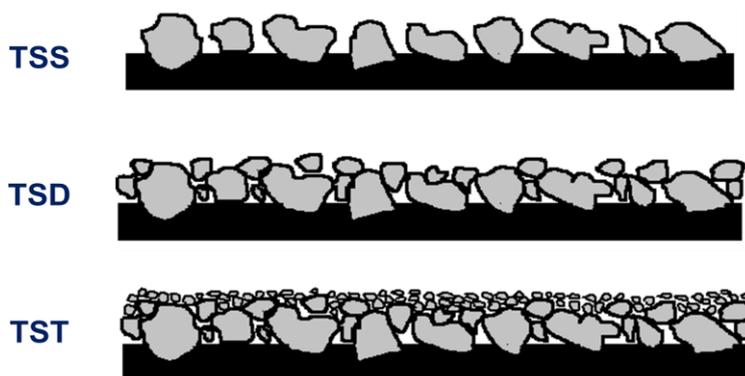
O TSD tem como 1ª etapa o mesmo processo do TSS, mas ao invés de finalizar após a 1ª compactação, realiza-se uma segunda aplicação de ligante, em seguida uma segunda aplicação de agregado de menor granulometria e por fim uma segunda compactação. Nesse caso ocorre tanto a penetração invertida quanto a direta, pois o ligante entra em contato com o agregado tanto de cima para baixo quanto de baixo para cima. O NCDOT utiliza o termo *Double Seal* ou *Split Seal* para *chip seals* que são construídos com duas camadas de ligante e duas camadas de agregado, ou seja, TSD.

No Brasil, as especificações do DNIT para TSD são DNIT 147/2012 – ES “Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Duplo com Ligante Asfáltico Convencional – Especificação de Serviço” e DNER-ES 392/99 “Pavimentação Tratamento Superficial Duplo com Asfalto Polímero”. A especificação adotada pelo DER-CE é a DERT-ES-P 11/00 - Tratamento Superficial Duplo. As diferenças principais entre as normas citadas acima são semelhantes às descritas para as normas de TSS no tópico anterior.

c) Tratamento Superficial Triplo (TST)

No TST repete-se todo o processo do TSD acrescentando mais uma camada de ligante e agregado de menor granulometria, seguido de compactação. Ao fim do processo essas etapas devem ter sido realizadas três vezes. A Figura 5 apresenta um esquema comparando os tipos de TSPs. O NCDOT utiliza o termo *Triple Seal* para *chip seals* que são construídos com três camadas de ligante e três camadas de agregado.

Figura 5 – Esquema comparativo – Tipos de TSP



Fonte: Pereira (2013).

As especificações de serviço do DNIT para TST são a DNIT 148/2012 – ES “Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Triplo com Ligante Asfáltico Convencional – Especificação de Serviço” e DNER-ES 393/99 “Pavimentação - Tratamento Superficial Duplo com Asfalto Polímero”. O DER-CE não tem uma especificação de serviço específica para TST, pois não é empregado no estado. As diferenças principais entre as normas citadas acima são semelhantes às descritas para as normas de TSS no tópico anterior.

2.5. MATERIAIS EMPREGADOS NO TSP

O TSP tradicional é composto de ligante asfáltico e agregado mineral. A função do ligante em um TSP é de impermeabilizar as camadas inferiores do pavimento e conferir união e adesão dos agregados à base. Larsen (1985) cita que o ligante deve apresentar como

características a viscosidade baixa na ocasião do espalhamento, a fim de permitir uniformidade na aplicação com os bicos espargidores, no entanto deve ter viscosidade alta o suficiente para que não ocorra escorrimento em inclinações mínimas da pista e que quando curada a camada consiga reter os agregados.

O ligante mais utilizado para esse serviço atualmente é a emulsão asfáltica. A emulsão asfáltica é composta por água, por Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e por emulsificante. Há vários tipos de emulsificantes que podem ser utilizados para misturar a água com o CAP, como silicatos solúveis e insolúveis, sabão e óleos vegetais sulfonados, entre outros.

A função do agregado no TSP é 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, os agregados considerados ideais tem forma mais cúbica (LARSEN, 1985).

Loiola (2009) avaliou o uso de agregado siderúrgico em substituição parcial do agregado mineral tradicional aplicado em TSP e obteve resultados satisfatórios que indicaram possibilidade de utilização do material para esse serviço. Outros agregados alternativos podem ser investigados como, por exemplo, aqueles provenientes de resíduos industriais ou oriundos da própria demolição dos pavimentos.

De acordo com Kim & Lee (2008a) existem fatores intrínsecos ao agregado que afetam a adesão do TSP, como porosidade, área de superfície, capacidade de absorção, mineralogia e textura da superfície, bem como o tipo de emulsão, seu tempo de ruptura e de cura. Mais importante do que as características individuais de cada elemento, nos EUA já existe um certificado de compatibilidade entre o agregado e a emulsão que é exigido pelos DOTs antes da construção de *chip seals* (NCDOT, 2015). Tal fato indica que a mistura e a interação entre os elementos são essenciais para o bom desempenho dos tratamentos superficiais.

Comparando os agregados utilizados para os serviços de TSP no Ceará e na Carolina do Norte (Tabela 2), observa-se que os tipos são semelhantes, pois ambos utilizam principalmente pedra britada e cascalho, no entanto a granulometria adotada é diferente. Nas especificações americanas os agregados são mais finos que nas brasileiras, o que pode impactar no desempenho do revestimento final. A mineralogia é diferente devido à distância geográfica entre os locais.

Os ligantes mais empregados em ambos os locais são as emulsões asfálticas catiônicas de cura rápida (Tabela 3). Além da emulsão comum, ambos os países tem normatizada a utilização de emulsões com adição de polímero.

Tabela 1 – Principais agregados empregados em TSPs

	Especificação	Tipo	Granulometria
CEARÁ	DNIT	Pedra britada Seixo rolado Cascalho britado	Tabela 1 DNIT 146/2012, 147/2012 e 148/2012
	DER-CE	Pedra britada Seixo rolado Cascalho britado	$d \geq 0,6D$ (agregado uniforme) Classe I – 19 – 16 mm (3/4" – 5/8") para $2,5 \times 10^5 < N \leq 7,5 \times 10^5$ Classe II – 16 – 10 mm (5/8" – 3/8") para $7,5 \times 10^4 < N \leq 2,5 \times 10^5$ Classe III – 10 – 6,3 mm (3/8" – 1/4") para $N \leq 7,5 \times 10^4$
	Principais origens naturais:		Gnaiss, granito
CAROLINA DO NORTE (EUA)	NCDOT STANDARD 1012-2	Pedra e Cascalho britados e Escória de aciaria	Nº 67 - 3/4" até a Nº 4 ou 19 a 4,75 mm Nº 78 M - 1/2" até a Nº 8 ou 12,5 a 2,36 mm
	Principais origens naturais:		Calcário, quartzito, granito, <i>traprock</i>

Fonte: Autor (2015).

Tabela 2 – Principais ligantes empregados em TSPs

Especificação	Tipo	Especificação	Tipo
DNIT	CAP 150/200	NCDOT STANDARD 1012-2	CRS - 2
	RR-2C		CRS - 2L
Modificados por polímero (SBS)	CRS - 2P		
DER-CE	CAP 150/200		CRS - 1H
	CAP 7		CSS - 1H
	RR-1C		CQS - 1H
	RR-2C		

Fonte: Autor (2015).

CRS: Emulsão asfáltica catiônica de cura rápida; CQS: Emulsão asfáltica catiônica de cura rápida (mais mas lenta que a anterior); 1H: dura e de baixa viscosidade; 2: alta viscosidade; 2L: alta viscosidade modificada por látex; 2P: alta viscosidade e modificada por polímero.

2.6. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO TSP

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 inicial e também o excesso de agregados ao final do processo.

A coordenação desses equipamentos entre si é essencial para evitar a ruptura da emulsão antes da finalização do processo, pois o atraso entre as etapas pode gerar danos ao processo e ocasionar retrabalho e desperdício de material. Por isso, para a boa construção de

um trecho de TSP deve-se manter um controle rígido dos equipamentos envolvidos (Figura 6).

Figura 6 – Processo sincronizado de aplicação de TSP



Fonte: NCDOT (2015).

2.6.1. Vassoura mecânica

A remoção de sujeira e pó existentes na superfície a receber o TSP é essencial para a execução correta da técnica, pois caso contrário pode gerar descolamento ou irregularidades indesejadas no revestimento. Além dessa função, as vassouras mecânicas auxiliam na remoção do excesso de agregado posteriormente. As vassouras utilizadas em serviços de TSPs podem ser manuais, mecânicas (Figura 7) ou a vácuo.

Figura 7 – Vassoura mecânica em operação



Fonte: NCDOT (2015).

2.6.2. Caminhão espargidor de ligante

O caminhão espargidor de ligante (Figura 8) apresenta o sistema mais complexo dos três equipamentos. Nele estão inclusos um sistema de aquecimento, que tem função de aquecer o ligante até a temperatura ideal de aplicação, um sistema de circulação de ligante, que basicamente transporta o ligante do aquecedor até a barra, a barra distribuidora, que inclui os bicos e é a responsável pela aplicação do ligante na superfície a ser revestida. A quantidade de ligante a ser aplicada é controlada por um sistema eletrônico manipulado pelo operador, seguindo a dosagem escolhida para o trecho.

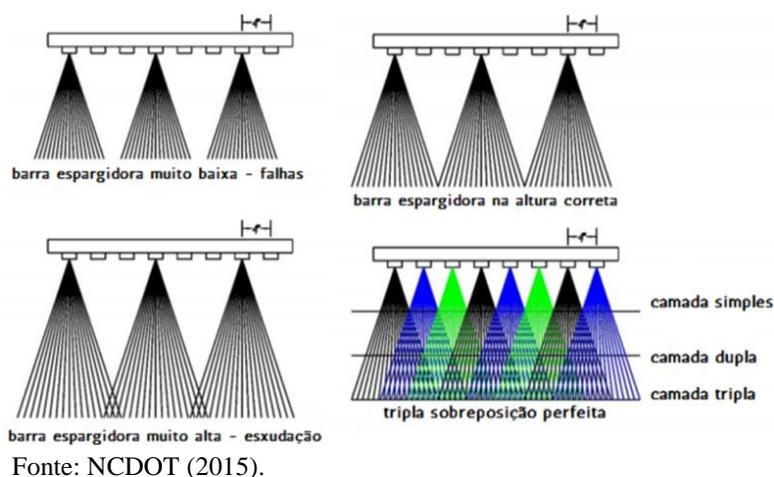
Figura 8 – Caminhão espargidor de ligante



Fonte: NCDOT (2015).

Essa etapa do espalhamento de ligante está associada com alguns defeitos recorrentes em TSPs, como o descolamento do revestimento devido às falhas de bico, que será citada em seções posteriores. O posicionamento correto dos bicos também é requisito para a boa construção do revestimento (Figura 9), pois pode gerar trechos com falta de ligante ou até mesmo com aplicação em excesso. Portanto, é importante no momento da construção manter todos os bicos espargidores desentupidos e à altura correta para a aplicação da emulsão.

Figura 9 – Detalhes do bico espargidor de ligante



2.6.3. Distribuidor de agregado

O distribuidor de agregados (Figura 10) pode ser encontrado em diversos modelos, mas geralmente é visto como um caminhão basculante acoplado à barra distribuidora. O equipamento é utilizado para espalhar o agregado da maneira mais uniforme possível na pista e apresenta um sistema mais simples que o do caminhão espargidor, apenas controlando a taxa de agregado a ser aplicada.

Figura 10 – Distribuidor de agregado



Fonte: Pavcel equipamentos (2014)⁴.

2.6.4. Equipamento multidistribuidor

Uma alternativa aos equipamentos convencionais citados anteriormente é o equipamento multidistribuidor que propõe a aplicação do ligante seguida do agregado em um

⁴ Disponível em: < <http://www.pavcel.com.br/equipamentos/ticel/>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

só veículo, como pode ser observado na Figura 11. Teoricamente, esse tipo de equipamento reduziria o tempo de construção e diminuiria os problemas decorrentes da ruptura ou cura do ligante antes da aplicação do agregado, pois realizaria simultaneamente as duas etapas.

Figura 11 – Equipamento multidistribuidor



Fonte: Romanelli (2015)⁵.

2.6.5. Compactador

A etapa de compactação é responsável pela ligação mecânica entre o agregado e a emulsão e caso seja realizada inadequadamente pode inviabilizar o revestimento, mesmo que o espalhamento dos materiais tenha sido realizado corretamente. Existem no mercado diversos tipos de rolos compactadores empregados em pavimentação, mas para a construção de TSPs os mais utilizados no Brasil são o rolo pneumático e o de cilindro metálico, também conhecido como tandem (Figura 12).

Figura 12 – Rolo compactador de cilindro metálico seguido do rolo pneumático



Fonte: NCDOT (2015).

⁵ Disponível em: <<http://www.romanelli.com.br/pt/equipamento/multi-distribuidores-de-agregado/mdr-7-9>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

Nos estudos brasileiros, não há relatos de autores que avaliaram a influência do tipo de compactação e distribuição das passadas no desempenho de um TSP. No entanto, Kim & Lee (2008a) investigaram diversos fatores que afetam a etapa de compactação e no tópico a seguir serão exploradas as minúcias desse processo.

2.6.5.1. Influência do processo de compactação em TSPs

A etapa de compactação tem como objetivos redistribuir os agregados, para que todos interajam com o ligante, e facilitar a incorporação da emulsão por todo o agregado devido ao esforço mecânico imposto à estrutura. Desde os primeiros estudos de *chip seals*, propostos por Hanson, o processo de compactação é considerado determinante para a construção correta do revestimento. Apesar de antigos, alguns destes conceitos ainda são aceitos atualmente.

Alguns estudos norte-americanos já investigaram essa etapa construtiva dos TSPs, de forma a maximizar o seu desempenho, como McLeod (1969) apud Kim & Lee (2008a). Pesquisas realizadas na NCSU avaliaram o impacto do tipo de compactador, do tipo de rolagem, do peso do compactador, do tempo de rolagem, do número de passadas, entre outros (Figura 13), no desempenho do pavimento. Tais estudos indicam que, para o desenvolvimento de melhorias à técnica atual de construção de TSPs, é preciso conhecer quantitativamente os benefícios gerados por cada uma dessas variáveis (KIM & LEE, 2008a).

Figura 13 – Fatores que influenciam na etapa de compactação



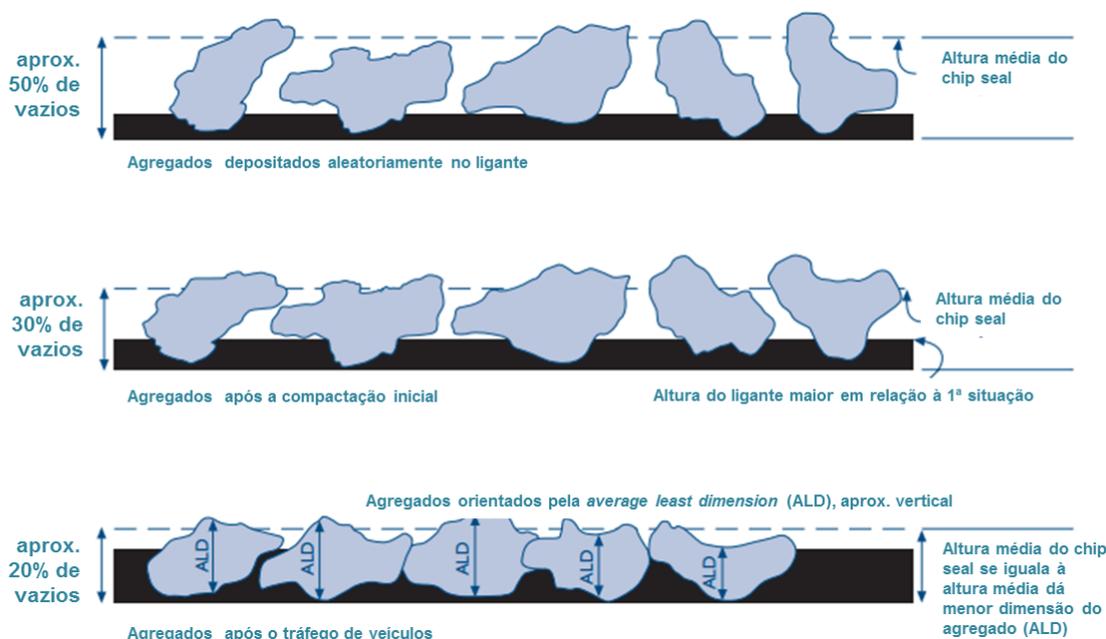
Fonte: Adaptado de KIM & LEE (2008a).

Após diversos testes, considerou-se que em estado solto o volume de vazios presentes no *chip seal* era de aproximadamente 50%, após a compactação passa a ser 30% e após a ação do tráfego resulta em 20% (Figura 14). Para chegar a essa conclusão foram considerados agregados com forma cúbica e observou-se que esses valores não dependiam do tamanho dos grãos (HANSON, 1935 apud TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005).

Em pesquisas mais recentes, avaliou-se o processo de compactação de três formas, pelo *Flip-Over Test* (FOT), pelo simulador de carregamento móvel 3D (*Third-Scale Model Mobile Loading Simulator*, MMLS3) e pelo *Vialit Test*. A partir desses três ensaios buscou-se avaliar

a retenção de agregado no revestimento ao variar o processo de compactação (KIM & LEE, 2008a). Maiores detalhes desses testes serão detalhados na seção 2.10 de métodos de avaliação do desempenho de TSPs.

Figura 14 – Estágios de interação agregado/emulsão do *chip seal*



Fonte: adaptado de TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ (2005).

a) Tipo de rolo compactador

Kim & Lee (2008a) observaram três tipos de rolo, o pneumático, o de aço/tandem, e o combinado, que para o NCDOT é composto por um tambor de aço e outro pneumático no mesmo veículo. O rolo pneumático utilizado era composto por nove rodas, sendo cinco num dos eixos e quatro no outro. Tal composição se dá para que não haja lacunas entre as rodas e não permita que qualquer trecho deixe de ser compactado. Para o processo de compactação adequado com esse tipo de rolo, o NCDOT recomenda a calibração correta dos pneus, de acordo com o indicado pelo fabricante, e também rolagens em velocidades inferiores a 8km/h (5mph) aproximadamente.

O rolo de aço é composto por rodas de tambor de aço e possibilita a construção dos TSPs com aspecto liso, o que aumenta o conforto dos usuários. Mesmo tendo benefícios, esse tipo de rolo deve ser utilizado com cautela, pois pode ocasionar esmagamento e quebra dos agregados.

O rolo combinado do NCDOT (Figura 15) nada mais é do que a união dos dois tipos anteriores, com um dos eixos apresentando um tambor de aço e o outro uma fileira de pneus do mesmo tipo do pneumático. Esse tipo de rolo já é popular na construção de revestimentos

usinados a quente (CBUQ, AAUQ), pois traz benefícios de ambos os tipos de rolo. A Transit NZ, RCA, Roading NZ (2005) utiliza o rolo combinado composto por um tambor de aço revestido com uma camada de borracha, mas empregado nas mesmas situações pelas agências estaduais dos Estados Unidos, os DOTs.

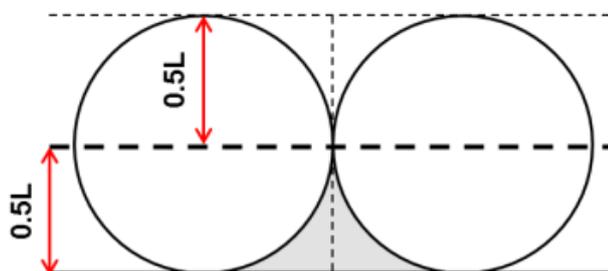
Figura 15 – Rolo combinado NCDOT



Fonte: Kim & Lee (2008a).

O tipo de rolo compactador ideal foi avaliado na fase I do programa experimental de Kim & Lee (2008a), na qual foram utilizados os três tipos citados na construção de TSS, com três passadas dos rolos. As amostras utilizadas no programa experimental foram fabricadas em campo, no qual foram dispostas placas de madeira longitudinalmente na pista, de forma a diminuir a variabilidade transversal, e em seguida construiu-se o TSP com os equipamentos de campo citados. Depois de coletadas as amostras, calculou-se o *Embedment Depth* e realizaram-se os ensaios de desempenho FOT, MMLS3 e *Vialit Test*.

O *Embedment Depth* é um conceito não utilizado no estado do Ceará, mas em linhas gerais pode ser definido como a altura de ligante dividida pela altura média dos agregados. As especificações americanas exigem a medição do *Embedment Depth* após a construção e após a cura inicial da emulsão no *chip seal*. Em locais de clima frio, é requerido um *Embedment Depth* de 70%, enquanto que para locais mais quentes são aceitáveis valores entre 50% e 60%. Caso esse parâmetro seja muito alto, é provável que ocorram problemas de exsudação. Caso contrário, o agregado não estará devidamente recoberto pelo ligante e pode gerar desagregação precoce. Para melhor compreensão do conceito, pode ser observada a Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Conceito de *Embedment Depth*

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

A partir dos resultados de perda de agregado obtidos (Tabela 4), considerou-se então o rolo pneumático e o rolo combinado como melhores soluções para a compactação de um TSS. Foi concluído que mesmo a perda de agregado sendo significativamente inferior na compactação com rolo pneumático, o revestimento resultante era mais rígido, podendo diminuir a sua resiliência e a sua flexibilidade. Por isso é indicada também a utilização do rolo combinado. O processo metodológico dos ensaios citados na Tabela 4 será mais detalhado na seção 2.10 deste estudo.

Os resultados do rolo de aço foram os piores obtidos nesses testes, com maior percentual de perda de agregado. Uma das causas poderia ser a rigidez do tambor, que por ser liso não se adequaria à geometria e ao relevo do pavimento e geraria uma compactação desigual ao longo da pista.

Tabela 3 – Média das porcentagens de perda agregado por tipo de rolo

Testes	Tipos de rolo		
	Aço	Combinado	Pneumático
FOT	8,2%	8,7%	4,4%
Vialit	7,0%	4,3%	1,6%
MMLS3	8,1%	7,0%	3,7%

Fonte: Traduzido de Kim & Lee (2008a).

b) Número de passadas

O número de passadas do rolo também exerce importante papel no desempenho do revestimento. Tal etapa construtiva é importante para que se atinja uma correta incorporação do agregado no ligante e também para que os agregados se acomodem na camada. Suspeita-se que a grande causa do desprendimento inicial de agregados é a falta de uma quantidade de passadas ideal nas camadas.

Mesmo assim, o NCDOT não indica em suas especificações de serviço um número de passadas específico, ficando a livre escolha do operador. Já na Nova Zelândia, o Transit NZ, RCA, Roding NZ (2005) recomenda pelo menos cinco passadas nas camadas em velocidades de aproximadamente 8 km/h. Pesquisas mais antigas utilizaram o teste da mancha de areia e concluíram que a partir de seis passadas do rolo não foram observadas mudanças significativas no seu aspecto e desempenho (HUDSON *et al.*, 1986 *apud* KIM & LEE, 2008a).

O número de passadas ideal foi avaliado na fase II do programa experimental de Kim & Lee (2008a), na qual foram utilizados dois compactadores de rolo combinado, amostras de TSS e TSD e padrão de passagem do rolo paralelo para todos. Assim como na fase I, avaliou-se a perda de agregado a partir de amostras de campo obtidas da mesma forma já citada, mas nesse caso variou-se o número de passadas em uma, três e cinco. A partir dos resultados obtidos (Tabela 5), as amostras de cinco passadas apresentaram, de modo geral, menor perda de agregado, mas devido ao caráter econômico do pavimento e a pouca variação ao diminuir para 3 o número de passadas, recomenda-se a compactação do *chip seal* com no mínimo 3 passadas do rolo.

Tabela 4 – Média das porcentagens de perda de agregado por número de passadas

Testes	Tipo de <i>chip seal</i>	Número de passadas		
		Uma	Três	Cinco
Vialit test	TSS	16,9%	6,7%	4,8%
	TSD	9,1%	7,4%	5,4%
FOT	TSS	16,0%	10,6%	6,3%
	TSD	15,7%	10,5%	12,1%
MMLS3	TSS	10,9%	7,2%	3,2%
	TSD	14,3%	13,7%	14,0%
<i>Embedment depth</i>	TSS (FOT)	0,81%	1,76%	1,84%
	TSD (MMLS3)	0,95%	1,42%	1,56%

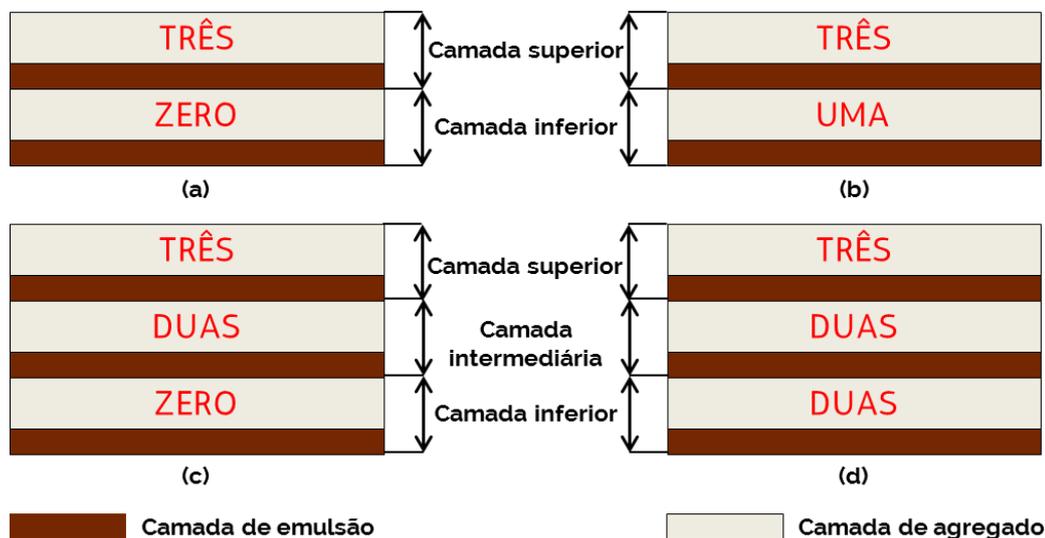
Fonte: traduzido de Kim & Lee (2008a).

c) Distribuição do número de passadas por camada

Kim & Lee (2008a) decidiram avaliar a quantidade de passadas necessárias por camada devido à discordância no meio acadêmico internacional quanto à necessidade de compactar todas as camadas em TSD e TST, por exemplo. A prática comum na Carolina do Norte, nos EUA, é de realizar uma passada ao final de cada camada para só então construir a camada seguinte. Já a Transit NZ, RCA, Roding NZ (2005) recomenda três passadas apenas na camada mais superior do *chip seal*, sem nenhuma passada nas camadas inferiores, alegando que tal prática não melhora a eficiência do pavimento.

Na fase III do programa experimental de Kim & Lee (2008a) foram estudados quatro casos diferentes para TSDs e TSTs (Figura 17) com o objetivo de avaliar o efeito das passadas em cada camada no desprendimento de agregado.

Figura 17 – Casos da fase III com a distribuição de passadas por camada



Fonte: traduzido de Kim & Lee (2008a).

Ao avaliar os resultados do FOT, do MMLS3 e do Vialit Test, para o TSD, concluiu-se que uma passada na camada inferior aumenta a retenção de agregado em comparação com o caso em que essa etapa não é executada. Já para o TST não se notou grandes variações na retenção de agregado para os dois casos estudados, indicando que poderia ser economizada a utilização dos equipamentos de compactação para as camadas mais inferiores.

Concluiu-se que os melhores tipos de rolo para o *chip sealing* seriam o pneumático e o combinado. Já o número de passadas ideal seria três, em concordância com as recomendações da Nova Zelândia (TRANSIT NZ, RCA, ROADING NZ, 2005). Para um TST não seria necessário compactar a camada mais inferior, enquanto que para o TSD seria necessário. Os resultados do simulador também mostraram que uma das principais causas do desprendimento de agregados é o tempo de espera para a sua aplicação após a aplicação do ligante, pois nesse pequeno espaço de tempo, a emulsão pode sofrer ruptura e impedir a incorporação máxima no agregado (KIM & LEE, 2008a).

2.7. PROCESSO CONSTRUTIVO DO TSP

Para melhor compreensão será descrito a seguir o processo construtivo de um TSS que serve de base para grande parte dos TSPs. A construção de um TSS é relativamente simples, inicia-se com a limpeza da base, geralmente onde é realizado um varrimento para retirada do

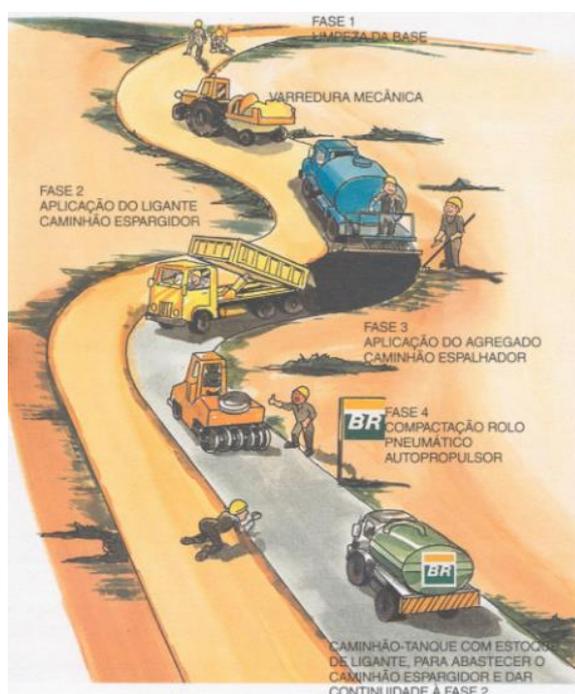
pó superficial. Posteriormente realiza-se a imprimação da base granular e depois é aplicada a camada de ligante, seguida da camada única de agregado.

Nessa etapa, caso seja necessário, são feitas algumas correções manuais e finaliza-se com a compactação da mistura *in situ* (LARSEN, 1985). A Figura 18 ilustra o processo resumido de aplicação de um Tratamento Superficial Simples (TSS) genérico.

As recomendações para construção do *chip seal* são semelhantes e, em geral,

[...] consiste em três etapas: espalhamento de emulsão, espalhamento de uma camada de agregado e compactação. A fim de garantir o melhor desempenho do *chip seal*, essas etapas devem ser executadas continuamente sem interrupções. Ou seja, realizar uma compactação adequada, com a quantidade suficiente de passadas é um fator importante para a extensão da vida útil do *chip seal*. (SOUTH AFRICA, 1986 *apud* KIM & LEE, 2008b, p.12, tradução nossa)⁶.

Figura 18 – Processo construtivo de um TSS



Fonte: BR Distribuidora (2015).

No Brasil, as especificações de serviço do DNIT não abordam detalhes do processo construtivo de forma amigável para o leitor, o que pode dificultar o entendimento completo dos processos da técnica. O DER-CE, no entanto já apresenta especificações mais completas e de fácil compreensão. Nos EUA, alguns DOTs fornecem além das normas, manuais atualizados que auxiliam a boa prática construtiva dos *chip seals*, como o *Chip Seal Best Practices Manual* (NCDOT, 2015). Um exemplo simples das funcionalidades presentes no

⁶In general, chip seal construction procedures consist of three steps: spraying emulsion, spreading a layer of aggregate, and rolling the layer of aggregate. In order to ensure the best chip seal performance, these steps should be continuous without any interruption. That is, having an adequate initial rolling using a sufficient number of rollers is an important factor in extending the service life of the chip seal.

manual citado pode ser observado no ANEXO A - CHECKLIST PARA INSPEÇÃO DE *CHIP SEALS*.

2.8. PROCESSO CONSTRUTIVO DE AMOSTRAS DE TSP EM LABORATÓRIO

Atualmente é um desafio tentar simular o procedimento de campo em laboratório numa escala reduzida, mas que atinja resultados semelhantes. No Brasil, Loiola (2009) e Pereira (2010, 2013) buscaram realizar adaptações ao procedimento experimental que tivessem uma menor influência possível do operador.

Loiola (2009) comparou resultados obtidos com amostras de campo e amostras produzidas em laboratório. No campo foi aproveitada a execução de um trecho para a produção de amostras com os equipamentos em escala real (Figura 19). Para a reprodução em laboratório, esse autor utilizou como compactador um cilindro de ferro que posteriormente foi considerado inadequado por outros pesquisadores devido à variação na compactação de acordo com a força aplicada pelo operador. Além disso, não havia nenhum método específico para a distribuição dos agregados. Após esse processo, foram ensaiadas ambos os tipos de amostra no WTAT para obtenção de perda de agregado.

Pereira (2010, 2013) aprimorou o processo de compactação em laboratório, proposto originalmente por Loiola (2009), com a utilização de um tambor preenchido de concreto (Figura 20) cujo principal esforço no rolamento era proveniente do seu peso próprio. Esse tipo de amostra foi utilizado para avaliação de TSP no ensaio WTAT que será mais detalhado na seção seguinte. Pereira (2013) empregou um “carrinho” como distribuidor de agregados e um compactador manual de pequeno porte. Para maiores detalhes do processo completo (Figura 21), consultar Pereira (2013).

Após a retirada do excesso de agregado, compactou-se a amostra com o Sistema Integrado da Simulação de Tráfego Normatizado (SISTRAN, simulador da UFC), aplicando três ciclos de cinco passadas, com cargas crescentes de 0,2 t, 0,4 t e 0,6 t, respectivamente. O processo foi repetido mais uma vez, pois se fabricou uma amostra de TSD, no entanto na etapa de compactação a carga aplicada foi de 0,2 t para os três ciclos a fim de diminuir o esmagamento dos agregados menores aplicados na 2ª camada. A amostra foi colocada por 24 horas na estufa a 60°C para acelerar o processo de cura e prepará-la para a simulação.

Figura 19 – Procedimento de campo proposto por Loiola (2009)



Figura 20 – Compactador manual para TSPs do LMP



Fonte: Autor (2015).

Figura 21 – Procedimento experimental de construção do TSD



Fonte: Pereira (2013).

Figura 22 – Procedimento de ensaio no simulador de pequeno porte SISTRAN



Fonte: Pereira (2013).

Em pesquisas realizadas na NCSU, Adams (2014) propôs um processo diferente para a produção de amostras de *chip seals* (*chip seal samples*, *ChipSS*) em laboratório. Inicialmente utilizou-se como base para as amostras um tipo de feltro, no qual se limitou a área da amostra de 305×178 mm através de um modelo superposto como pode ser verificado na Figura 23a. Essa limitação durante o espalhamento do ligante facilitou a replicação da amostra.

Para a aplicação do ligante, optou-se pela utilização de uma pistola para tinta em *spray* (Figura 23a), pois se considerou essa opção como uma boa representação do espalhamento feito em campo. Adams (2014) indicou uma pistola com vazão volumétrica superior a 0,01 L/s e, para garantir a repetibilidade, o processo foi realizado sobre uma balança a fim de controlar através do peso a quantidade de emulsão aplicada em todas as amostras produzidas.

Em contraponto com os processos manuais realizados em laboratório por Loiola (2009) e Pereira (2010, 2013), Adams (2014) utilizou um espalhador automático de agregado (Figura 24). A vantagem do processo automatizado é a possibilidade de controlar a taxa de agregado que se deseja aplicar na amostra fabricada. Após esse processo, descarta-se o agregado solto e pesa-se a amostra para a obtenção da taxa exata de agregado obtida.

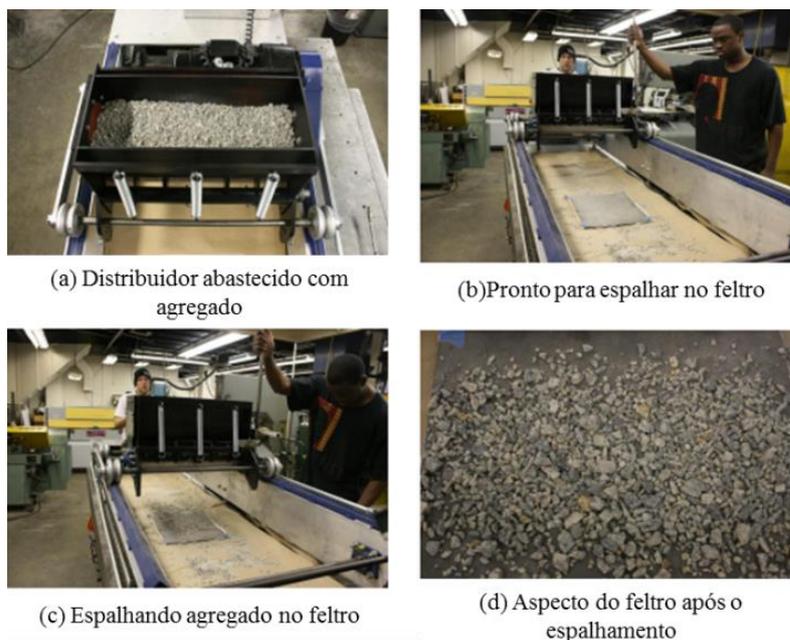
Figura 23 – Espalhamento de ligante pelo método da NCSU



Fonte: Adaptado de Adams (2014).

Após o processo de aplicação de ligante e agregado, simulou-se o processo de compactação. Adams (2014) buscou simular a compactação combinada (ou mista) utilizando inicialmente o compactador da Figura 23b seguido da compactação com um material de borracha (*rubber mat*), pois esse foi o tipo de compactação considerada a mais eficiente por Kim & Lee (2008a). Esse processo foi indicado porque o compactador de aço é eficiente na compactação, mas pode ocasionar quebra do revestimento se feito em excesso.

Figura 24 – Espalhamento do agregado pelo método da NCSU



Fonte: Adams (2014).

O compactador foi passado três vezes longitudinalmente à amostra e uma vez transversalmente para garantir uniformidade e eficiência na compactação. Após esse processo, a amostra é curada em estufa à 35°C por 24 horas.

2.9. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TSPs EM LABORATÓRIO

2.9.1. Pesquisas realizadas na UFC

Conforme comentado anteriormente, Loiola (2009) comparou o desgaste obtido em campo com o obtido em amostras de laboratório. O autor depositou mantas asfálticas no momento da execução de um trecho de TSP para serem ensaiados no ensaio WTAT com os equipamentos utilizados em campo. Após quatro dias da aplicação do revestimento, retiraram-se as mantas e realizou-se o ensaio WTAT adaptado nas amostras para avaliação do desgaste.

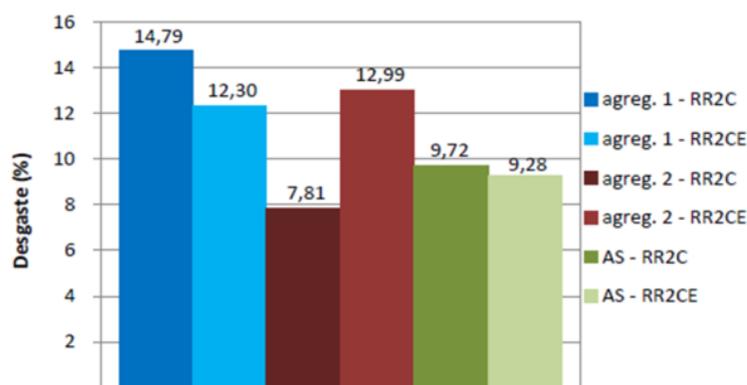
O ensaio WTAT é simplificado um ensaio de desgaste, usado comumente para dosagem de MRAF, que avalia a abrasão úmida de misturas, especificada na ABNT NBR 14746/2001. Nos estudos feitos por Loiola (2009) e Pereira (2010, 2013) adaptou-se a utilização do ensaio com corpos de prova em forma circular, de aproximadamente 22 cm para verificação da abrasão/desgaste do revestimento do tipo TSP.

Da mesma forma foram moldados corpos de prova em laboratório, com as mesmas taxas de agregados e ligantes usadas em campo, e ensaiados em seguida no WTAT. Obteve-se como resultado um desgaste aproximadamente duas vezes maior nas amostras de laboratório, o que era esperado uma vez que a compactação de campo é mais eficiente do que a de laboratório. Loiola (2009) sugeriu que as diferenças de resultado podem ter sido obtidas pela diferença de equipamentos utilizados, pois em campo utilizam-se máquinas de grande porte e automatizadas, enquanto no laboratório essa simulação é feita manualmente.

Pereira (2013) também realizou o ensaio de WTAT em laboratório para amostras de TSS, TSD e TST com o uso de agregados convencional e siderúrgico. A Figura 25 a seguir exemplifica os diferentes valores de desgaste obtidos por Pereira (2013), em amostras de TSS produzidas com agregados e emulsões diferentes. A partir deste estudo foi possível se entender melhor qual o melhor tipo de agregado e emulsão a serem selecionados para cada tipo de TSS, TSD e TST. Para maiores detalhes do desgaste obtido em amostras de TSD e TST, consultar a referência original.

Pereira (2013) considerou que o ensaio de WTAT, aplicado ao TSP, pode não ser um bom indicativo 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. Mesmo com essas ressalvas, o WTAT é um equipamento acessível e de baixo custo que pode auxiliar na avaliação preliminar dos TSPs em laboratório.

Figura 25 – Desgaste obtido no WTAT em amostras de TSS



Fonte: Pereira (2013).

Pereira (2013) utilizou além do ensaio do WTAT um simulador de pequeno porte, o SISTRAN, para a avaliação de perda de agregado de TSPs conforme ilustrado na Figura 22 do item anterior. A simulação realizada no SISTRAN foi adaptada, pois o equipamento foi projetado para a simulação de misturas asfálticas, não para revestimentos de TSP. Além disso,

utilizaram-se as amostras produzidas para avaliação de macro e microtextura como indicado na Figura 26.

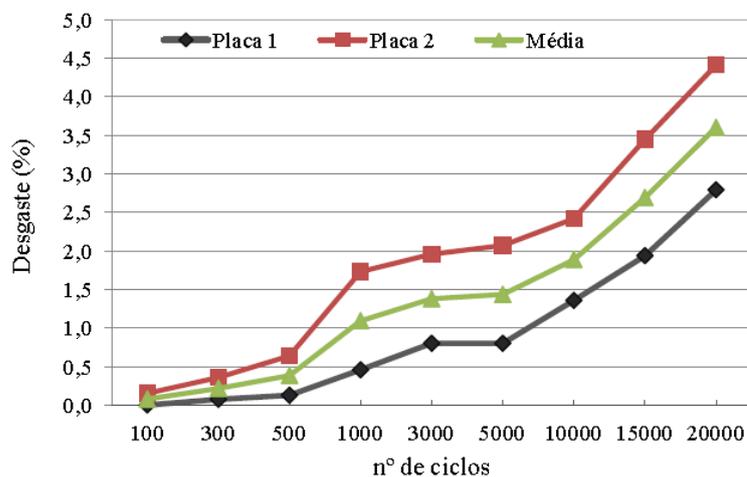
Figura 26 – Construção das placas de TSP para avaliação de macro e microtextura



Fonte: Pereira (2013).

A Figura 27 a seguir exemplifica os resultados obtidos para placas de 10 cm de espessura e para diversos ciclos diferentes. Para maiores detalhes das cargas aplicadas e resultados de desgastes obtidos no ensaio, consultar a referência de Pereira (2013). De um modo geral, esse autor concluiu que o procedimento laboratorial para construção de revestimentos de TSP pode ser considerado uma boa ferramenta para avaliar as melhores taxas dos materiais constituintes e fazer um chamado *ranking* para diferentes tipos de agregados e ligantes.

Figura 27 – Desgaste em placas de TSD de 10 cm no simulador de pequeno porte



Fonte: Pereira (2013).

2.9.2. Pesquisas internacionais realizadas na NCSU

Conforme comentado anteriormente, nas pesquisas da NCSU são empregados diversos ensaios (*Flip-Over Test*, *Vialit Test* e MMLS3) para a avaliação do desempenho dos *chip seals*. Esses ensaios já foram aplicados por Kim & Lee (2008a) para verificação do processo de compactação, por Kim & Lee (2008b) 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 dos *chip seals*.

O MMLS3 é um simulador de carga móvel 3D que simula carregamentos de tráfego de campo. O simulador aplica cargas repetidas a uma taxa constante (990 cargas de roda/10 minutos) a fim de avaliar o desempenho do revestimento. O modelo utilizado na NCSU (Figura 28) permite o ensaio de três amostras simultaneamente com temperaturas controladas durante o ensaio que podem variar de 10°C a 60°C. Geralmente esse equipamento é utilizado para simular as cargas provenientes do tráfego inicial, que é o que causa maior desprendimento de agregados.

O simulador pode avaliar a desagregação através de pesagens das amostras. As pesagens foram feitas nos tempos de 10, 20, 40, 80 e 160 minutos, nos quais a máquina teve que ser parada para a retirada das amostras da base para verificação do peso em função do tempo de carregamento. As pesagens não foram realizadas em intervalos menores que 10 minutos, pois esse é o tempo mínimo para que o simulador percorra toda a amostra.

O MMLS3 também pode auxiliar na avaliação do excesso de ligante/exsudação dos TSPs. Nessa avaliação, realiza-se um ensaio similar ao de desagregação até 120 minutos em 25°C, pois a exsudação também é função da perda de agregado. Em seguida as amostras são submetidas a uma temperatura de 50°C por três horas buscando simular a ocorrência de exsudação durante os meses de verão. Após esse tempo, utiliza-se um Processamento Digital de Imagens (PDI) para comparar o estado da amostra antes e depois do carregamento de três horas no simulador.

A análise do excesso de ligante pelo PDI possui mais de uma abordagem na NCSU. Kim & Lee (2008b) utilizavam 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 a análise digital das imagens utilizava-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 *gray scale 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 29).

Figura 28 – Equipamento MMLS3 da NCSU

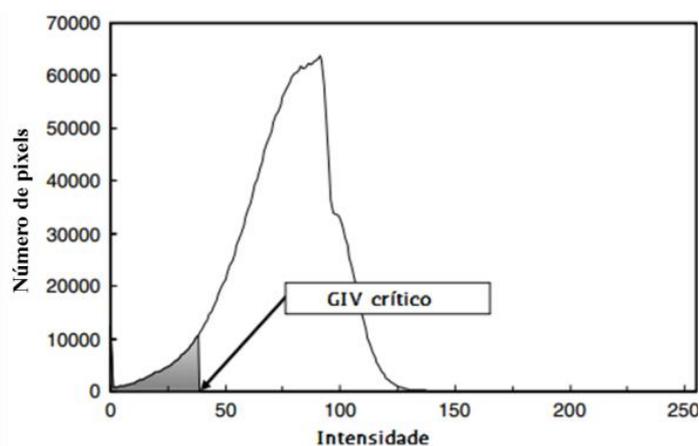


Fonte: Adams (2014).

(a) preparação do teste no MMLS3; (b) instalação de amostras com base de aço; (c) posicionamento do MMLS3 na câmara de temperatura controlada e (d) equipamento totalmente posicionado.

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 com excesso de ligante era altamente afetada pelos reflexos de luz no momento do ensaio.

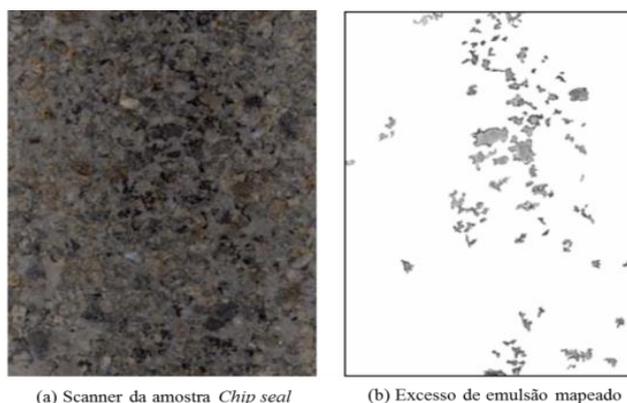
Figura 29 – Histograma representando o valor crítico de GIV



Fonte: Kim & Lee (2008b).

Para superar esse problema, decidiu-se 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 (Figura 30). Para maiores detalhes do processo completo de mapeamento, consultar a referência original de Kim & Lee (2008b).

Figura 30 – Mapeamento digital de Kim & Lee

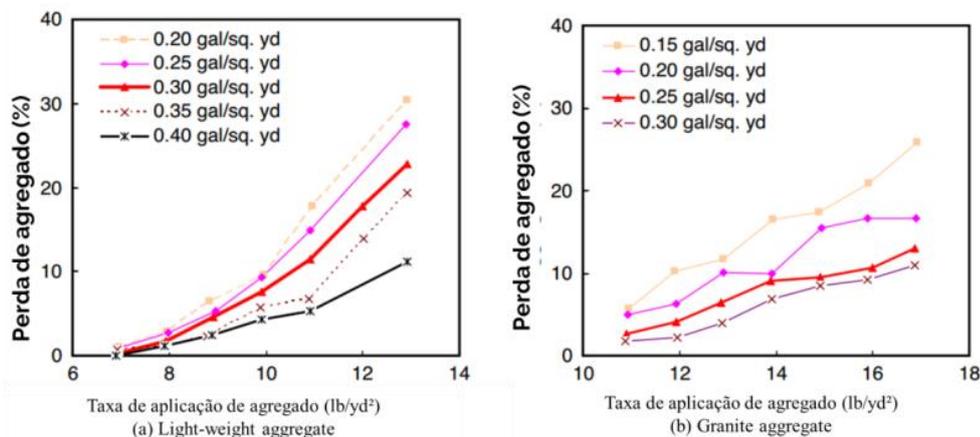


Fonte: Kim & Lee (2008b).

Algumas das conclusões obtidas por Kim & Lee (2008b) foram as seguintes:

- i. os testes feitos com o simulador MMLS3 atestaram que a perda de agregado diminui à medida que a taxa de emulsão aumenta e a taxa de agregado diminui. Pela Figura 31, percebe-se que a perda é maior com o aumento da taxa de agregado, para o *lightweight aggregate* que pode ter origem de xistos, argilas ou ardósias e tem tamanho reduzido com partículas de baixo peso próprio. No entanto para o *granite aggregate*, de origem granítica, esse aumento é constante. A diferença aumenta com a diminuição da taxa de emulsão, indicando que o *lightweight aggregate* é mais sensível a mudanças na taxa de agregado quando a taxa de emulsão é menor que a ótima.

Figura 31 – Taxa de aplicação de agregado por perda de agregado



Fonte: Kim & Lee (2008b).

- ii. o aumento da taxa residual de agregado, que é a taxa de agregado do pavimento após a perda inicial de agregados, é função direta da sua distribuição granulométrica.
- iii. no que concerne à perda de agregado, percebe-se que a suposição de que o valor teórico limite permitido de 10% para a desagregação é razoável para distribuições relativamente uniformes⁷.
- iv. os vazios de referência, que são os vazios compactados pelo teste do MMLS3, dependem dos vazios que o agregado apresenta em seu estado solto, os quais dependem da sua granulometria. Os testes realizados mostraram que agregados de diferentes origens mantiveram a proporção de vazios, como pode ser observado na Tabela 6.

Em relação à conclusão “ii”, Pereira (2013) chegou a uma conclusão semelhante, no entanto ele considerou que TSPs com desgaste (perda de agregado, D) de até 20% ainda seriam satisfatórios. O autor sugeriu a seguinte escala: (I) $D < 10\%$, o desempenho pode ser considerado muito bom; (II) $10\% \leq D < 20\%$, o desempenho pode ser considerado bom; (III) $20\% \leq D < 30\%$ o desempenho pode ser considerado regular e (IV) $D \geq 30\%$ o desempenho pode ser considerado ruim.

Já Adams (2014) utilizou o scanner, mas o processamento foi feito 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 32).

⁷Distribuição uniforme é aquela em que as partículas maiores apresentam em média o dobro do diâmetro das partículas menores (NBR 248:2003).

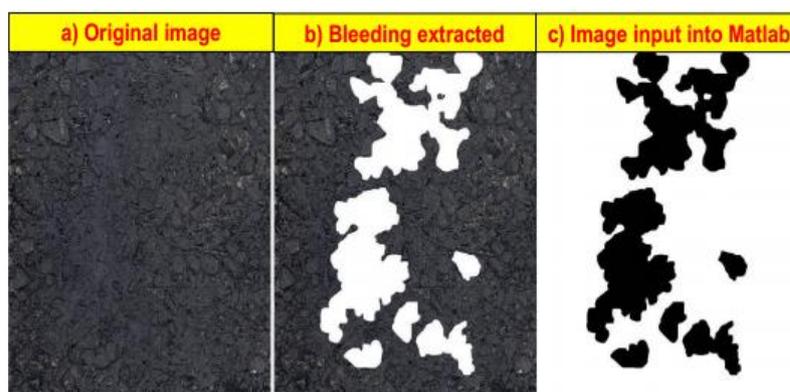
Tabela 5 – Proporção dos vazios

	Vazios de referência	Vazios no estado natural	Proporção
<i>Lightweight</i>	0,35	0,51	0,69
<i>Granite</i>	0,32	0,47	0,68
Proporção	1,09	1,09	

Fonte: Kim & Lee (2008b).

O *Flip-Over Test* (FOT) é especificado na ASTM D7000: *Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples* (Figura 33) e 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. Após esse processo, pesa-se a amostra e obtém-se a quantidade de agregado em excesso que foi aplicada.

Figura 32 – PDI utilizado por Adams (2014)

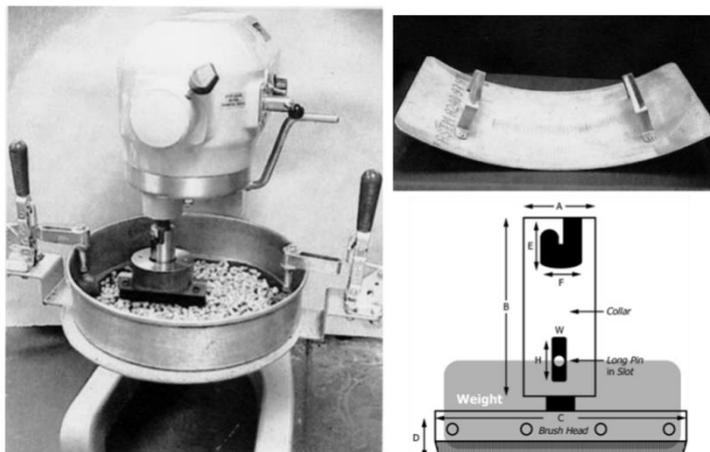


Fonte: Adams (2014).

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

O *Vialit Test* (Figura 34) é um ensaio de adesão cujas amostras são produzidas como indicado anteriormente, com a diferença de que a base utilizada é uma placa de aço quadrada de 203 × 203 mm, ao invés do papel de feltro do simulador. A cura também é feita a 35°C por 24 horas na estufa. Após esse processo é realizado 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. No ensaio uma esfera de metal de 500±5 g é posicionada a 50 cm da placa da amostra. Para que o ensaio seja válido, a esfera 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.

Figura 33 – Equipamento *Flip-over test*



Fonte: ASTM D7000 (2011).

Detalhes do equipamento ensaiando uma amostra, compactador utilizado e detalhes da escova que realiza a varrição.

Figura 34 – Equipamento para o *Vialit test*



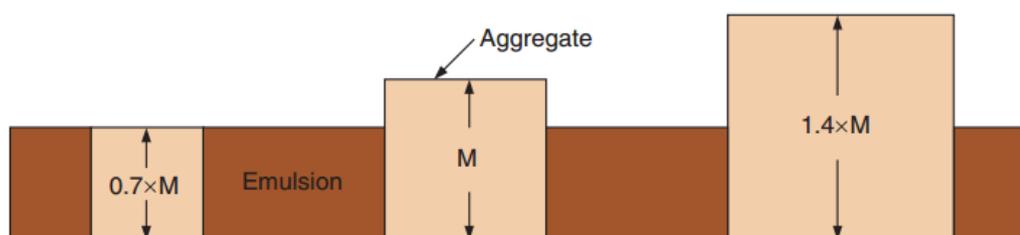
Fonte: Adams (2014).

Além dos ensaios citados, existem algumas características intrínsecas aos materiais que indicam uma boa aplicabilidade na construção de TSPs. Percebendo a importância da distribuição granulométrica dos agregados no *chip seal*, Kim & Lee (2009) desenvolveram uma variável para avaliar o desempenho dos *chip seals*, o coeficiente de uniformidade baseado no desempenho, do inglês *Performance-Based Uniformity Coefficient* (PUC). O PUC une o critério de falha de *chip seals* de McLeod e o coeficiente de uniformidade (CU) utilizado para solos. O teste de desagregação já citado, realizado no MMLS3 foi utilizado para avaliar e confirmar a pertinência do PUC dos agregados no desempenho do *chip seal*.

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 médio de partícula, H; isto gera exsudação. Partículas maiores do que o dobro de $0,7 \times H$ causam perda de agregado [...]. (MCLEOD, 1969 *apud* KIM & LEE, 2009, p. 53-54, tradução nossa) ⁸.

A Figura 35 esclarece o critério criado por McLeod. De acordo com a sua teoria, o risco de falhas pelo excesso de ligante ou perda de agregado seria minimizado caso a graduação dos agregados fosse corretamente escolhida. O critério de McLeod pode ser comparado com o conceito de *Embedment Depth* já citado, que os órgãos responsáveis exigem das empreiteiras.

Figura 35 – Critério de McLeod



Fonte: Kim & Lee (2009).

Com base nos conceitos apresentados a porcentagem de excesso de ligante e de perda de agregado pode ser calculada pelas equações (1) e (2), respectivamente. Após vários estudos, equacionou-se o PUC como sendo função de duas variáveis, como pode ser observado na equação (3).

$$\text{Excesso de ligante (\%)} = P_{EM} \quad (1)$$

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

$$PUC = \frac{P_{EM}}{P_{2EM}} \quad (3)$$

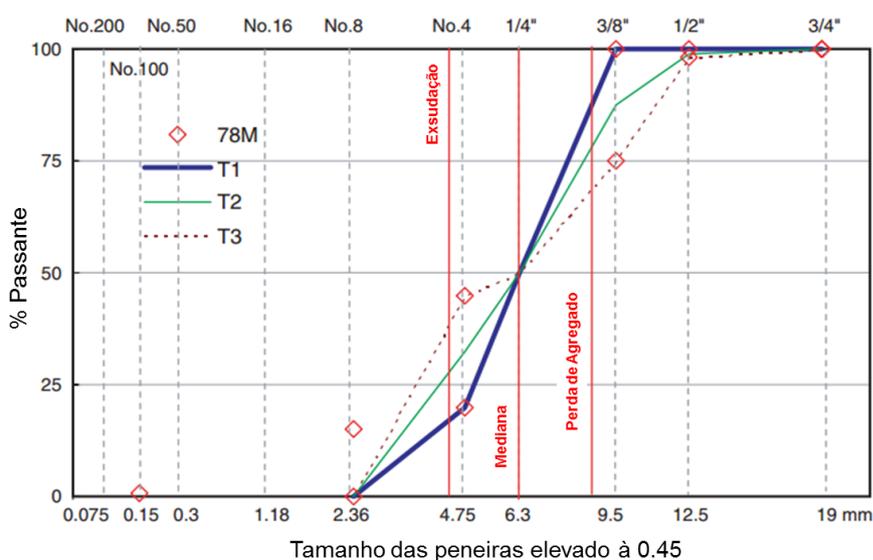
Sendo:

⁸ According 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 [...].

- 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 $0,7M$. Esse percentual representa a quantidade de agregado que apresenta tamanho muito menor que o da mediana e apresenta riscos de esxudação.
- P_{2EM} é o percentual que passa, retirado da curva granulométrica do agregado, correspondente ao diâmetro $1,4M$. Esse percentual representa a quantidade de agregado que apresenta tamanho muito maior que o da mediana e apresenta riscos de se soltar do revestimento.

Na Figura 36 a seguir podem ser verificados agregados que apresentam a mesma mediana e, no entanto, possuem PUCs diferentes devido a sua granulometria. Para os agregados T1, T2 e T3, Kim & Lee (2008b) calcularam o Coeficiente de Uniformidade (CU), o PUC e a perda de agregado gerada no MMLS3 (Tabela 7). O agregado T1 apresentou o maior CU que os demais, indicando maior uniformidade granulométrica, no entanto o seu PUC foi menor, indicando melhor aplicação para TSP, o que é comprovado pela menor perda de agregado entre as três amostras. Kim & Lee concluíram que quão menor o PUC, mais adequado para aplicação em serviços de TSP é o agregado.

Figura 36 – Exemplo para cálculo do PUC



Fonte: Kim & Lee (2008b).

O PUC calculado acima avalia o desempenho para tratamentos simples, de apenas uma camada. Entretanto, na realidade, é frequente o emprego de revestimentos de múltiplas

camadas ou até mesmo a sobreposição de grãos em TSS (Figura 37). Levando isso em consideração, observa-se que os dados obtidos nas equações 1 e 2 acima não são exatamente os mesmos em casos de TSPs múltiplos, que ainda precisam ser investigados.

Tabela 6 – Exemplos dos resultados de PUC

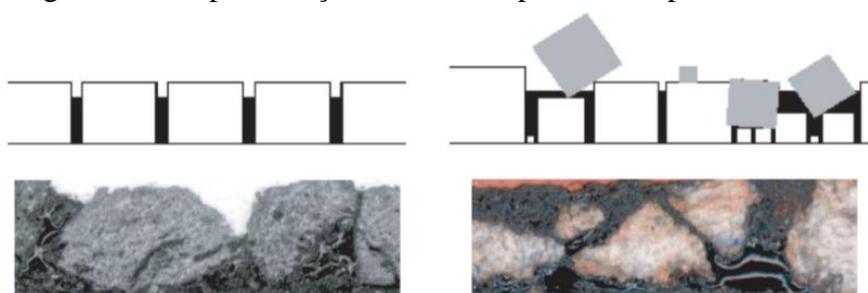
Parâmetros	T1	T2	T3
D₆₀, mm	6,9	7,2	7,6
D₁₀, mm	1,6	2,6	2,9
CU	4,34	2,77	2,62
P_{EM}, %	17,2	27,9	38,6
P_{2EM}, %	89,4	79,5	69,7
PUC	0,19	0,35	0,55
Perda de agregado no MMLS3, %	4	7,1	9,3

Fonte: Kim & Lee (2008b).

As conclusões dos estudos realizados por Kim & Lee (2009) foram as seguintes:

- i. o critério de falha proposto por McLeod pode ser aplicado como ferramenta limitante para as especificações de agregados apropriados para aplicação em *chips seals*.
- ii. o PUC é um melhor indicador de qualidade do que apenas o CU, pois ao associá-lo com o critério de McLeod comprova-se um menor desprendimento de agregados no revestimento.
- iii. por fim, o PUC pode ser uma ferramenta para a escolha do agregado a ser aplicado e, portanto, facilitar a comunicação e o controle entre os construtores de *chip seals*.

Figura 37 – Representação de TSP simples e múltiplo



Fonte: Kim & Lee (2009)

2.10. MÉTODOS DE DOSAGEM DOS TSPS

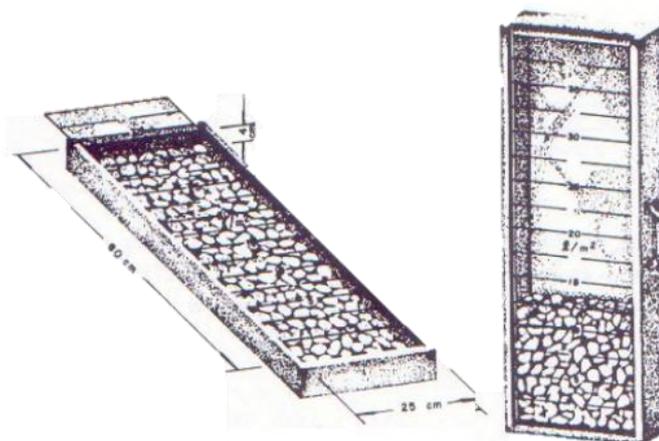
Em linhas gerais, a dosagem dos tratamentos superficiais por penetração pode ser classificada em dois tipos, os métodos diretos e os indiretos. Os *métodos diretos* tem caráter totalmente experimental, em que a taxa de agregado e ligante são determinadas através de

ensaios e resultados empíricos. Os *métodos indiretos*, no entanto, se baseiam em equações matemáticas que determinam as taxas de materiais a serem utilizados (PEREIRA, 2013). Esse cálculo da taxa varia de um método para o outro, mas geralmente têm como variáveis o tamanho e a forma do agregado a ser empregado (MELO, 1978). A seguir serão apresentados mais detalhadamente alguns desses métodos.

2.10.1. Método da Caixa Dosadora (LARSEN, 1985)

Esse método utiliza uma caixa dosadora padrão, de dimensões 80×25×4cm, na qual os agregados são colocados no fundo da caixa disposta horizontalmente. Propõe-se nessa etapa que os agregados sejam colocados de forma semelhante ao desejado em campo, com pouca quantidade de vazios. Na sequência, a caixa é colocada em posição vertical, fazendo-se a leitura direta a partir da graduação da tampa da caixa e obtém-se a taxa de agregado em L/m^2 a ser utilizada. A Figura 38 representa o processo acima descrito.

Figura 38 – Método da caixa dosadora



Fonte: Larsen (1985).

2.10.2. Ensaio de Placa ou Método da Bandeja (DER-CE)

Esse método é muito difundido e é considerado um método direto, 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 coberto. 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. A Figura 39 mostra o processo de colocação dos agregados na bandeja.

Figura 39 – Exemplo do método da bandeja



Fonte: Pereira, 2013.

2.10.3. Método de Hanson (HANSON, 1935 *apud* PINTO, 2002)

O método de Hanson surgiu na Nova Zelândia a partir de estudos do engenheiro F. M. Hanson sobre métodos de dosagem. Hanson apresentou algumas hipóteses a respeito do comportamento dos agregados ao longo das etapas de aplicação de um TSP.

Inicialmente, Hanson considerou que os agregados apresentavam orientação aleatória após o primeiro espalhamento e que o índice de vazios observado era de 50%. Após a primeira compactação, os agregados se reorganizavam mantendo-se mais horizontais em relação à sua maior dimensão e o índice de vazios diminuía para 30%. Depois de certo período sofrendo as ações do tráfego, os agregados atingiriam sua conformidade final com 20% de índice de vazios e o ligante preencheria uma faixa entre 50% e 70% desses vazios. Dessa forma, foram formuladas as seguintes equações de dosagem:

$$V_f = 1,6 \times d_0 \quad (4)$$

$$V_e = 1,76 \times d_0 \quad (5)$$

$$Q_L = 0,133 \times d_0 \quad (6)$$

Sendo:

- V_f : o volume fixado de agregado, em L/m²;
- V_e : o volume de agregado que deve ser espalhado, em L/m²;
- Q_L : a quantidade de ligante, em L/m²;
- d_0 : a média da maior dimensão do agregado, em mm.

2.10.4. Método da Califórnia (PINTO, 2002)

O método proposto por Hanson na Nova Zelândia foi considerado inadequado para aplicação na Califórnia, principalmente devido aos diferentes tipos de agregados presentes em cada região. Foi nesse método que se introduziu primeiramente o conceito de tamanho máximo efetivo (TME), que por definição é a abertura da malha da peneira em que passam 90% dos agregados. As equações desenvolvidas na Califórnia foram as seguintes:

$$V_f = 0,70 \times TME \quad (\text{L/m}^2) \quad (7)$$

$$V_e = 0,80 \times TME \quad (\text{L/m}^2) \quad (8)$$

$$Q_l = 0,07 \times V_f + 0,33 \quad (\text{L/m}^2) \quad (9)$$

2.10.5. Método de Tagle e Podestá (PINTO, 2002)

As variáveis mais importantes neste método são os tamanhos máximo e mínimo efetivo dos grãos. Com esses dados é possível calcular a quantidade de agregado e ligante que deve ser utilizada. As equações do método são as seguintes:

$$Q_A = \frac{K \times (D+d)}{2} \quad (10)$$

$$Q_L = \frac{Q_A}{10} \quad (11)$$

Sendo:

- Q_A : a quantidade de agregado, em L/m^2 ;
- Q_L : a quantidade de ligante, em L/m^2 ;
- D : o diâmetro máximo do agregado em cada camada, em mm;
- d : o diâmetro mínimo do agregado em cada camada, em mm;
- K : constante que varia de acordo com o tipo de TSP:
 - $K = 1,0$ para o agregado da 1ª camada do TSD e TST;
 - $K = 1,1$ para o agregado da 2ª camada do TST ou 1ª camada do TSS;
 - $K = 1,2$ para o agregado da 2ª camada do TSD e 3ª camada do TST.

2.10.6. Especificações do DER-CE (Baseada em Tagle e Podestá)

Como foi citado, o DER-CE apresenta duas especificações de serviço para TSS e TSD, a DERT-ES-P 10/00 e a DERT-ES-P 11/00, respectivamente. A fórmula para cálculo da taxa de agregado é a mesma proposta por Tagle e Podestá, com uma pequena diferença na constante K adotada.

$$T_{ag} = \frac{K \times (D+d)}{2} \quad (12)$$

Sendo:

- T_{ag} a taxa de agregado, em L/m²;
- D e d os diâmetro máximo e mínimo do agregado por camada, em mm;
- K uma constante que varia de acordo com o tipo de TSP:
 - $K = 0,9$ se $d \geq 16$ mm (5/8”);
 - $K = 0,93$ se 10 mm (3/8”) $\leq d < 16$ mm (5/8”);
 - $K = 1,10$ se $d < 10$ mm (3/8”).

Em seguida, determina-se a taxa de agregado em kg/m² utilizando o método da bandeja. Pelas especificações do DERT-CE, determina-se a taxa em volume através da massa específica solta observada na caixa dosadora de dimensões conhecidas.

Para a taxa de ligante, a especificação apresenta equações que fornecem a taxa de emulsão asfáltica catiônica (EAC). Seja para TSS:

$$T_{RR-1C} = \frac{0,94 \times T_{CAP}}{0,62} \text{ ou } T_{RR-1C} = 0,126 \times T_{ag} \quad (13)$$

$$T_{RR-2C} = \frac{0,94 \times T_{CAP}}{0,67} \text{ ou } T_{RR-2C} = 0,117 \times T_{ag} \quad (14)$$

A especificação apresenta as seguintes equações para TSD:

$$T_{RR-1C} = \frac{0,90 \times T_{CAP}}{0,62} \text{ ou } T_{RR-1C} = 0,121 \times T_{ag} \quad (15)$$

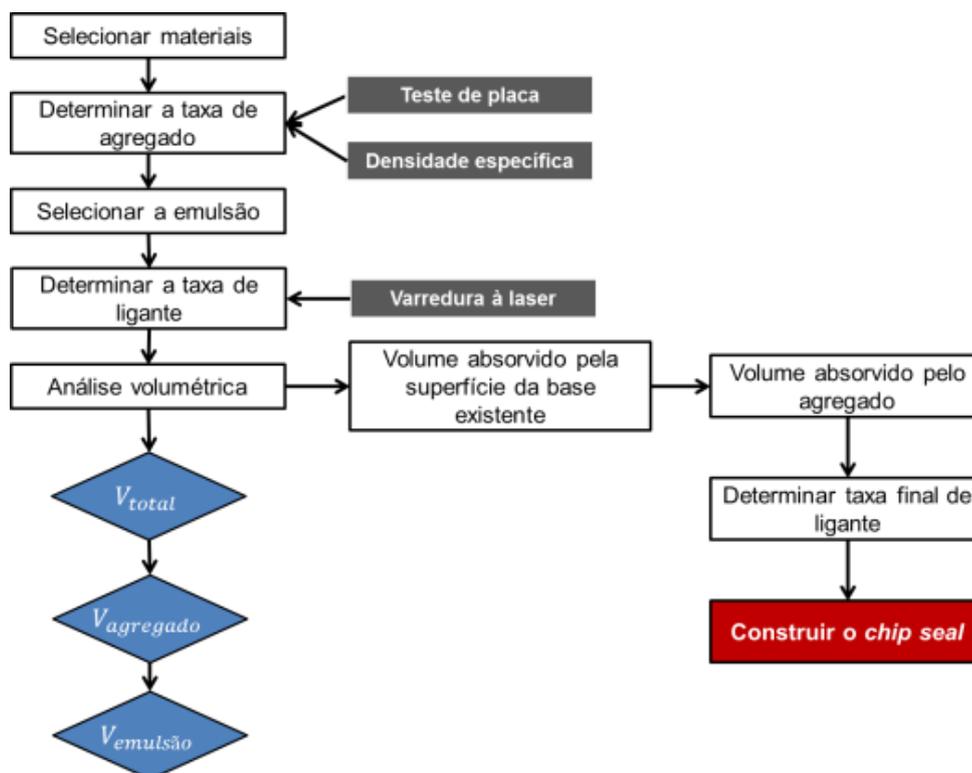
$$T_{RR-2C} = \frac{0,90 \times T_{CAP}}{0,67} \text{ ou } T_{RR-2C} = 0,112 \times T_{ag} \quad (16)$$

Sendo: T_{ag} a taxa de agregado em L/m² e T_{CAP} a taxa de CAP em L/m².

2.10.7. Método do NCSU (Adams, 2014)

Em estudos recentes, propôs-se na Carolina do Norte, uma nova metodologia para a concepção dos “*chip seals*” que incorpora análise dos agregados, análise volumétrica e utilização de processamento digital de imagens para determinar as taxas de agregado e ligante ideais que garantam a qualidade do “*chip seal*” em campo.

Adams (2014) propôs um método de dosagem de “*chip seals*” de uma camada, utilizando como critérios de desempenho principais a perda de agregado e o excesso de emulsão (exsudação). A Figura 40 apresenta o processo original proposto por esse pesquisador.

Figura 40 – Método misto de dosagem de *chip seal*

Fonte: Adaptado de Adams (2014).

Primeiramente escolhe-se o agregado a ser utilizado e realizam-se alguns testes para definir a taxa de aplicação necessária. Realiza-se o *boardtest* (ensaio da placa ou bandeja) com o agregado escolhido. O ensaio de placa utilizado foi baseado no proposto por Kearby (1953) apud Adams (2014) e tem caráter semelhante ao recomendado pelo DER-CE, já citado anteriormente. Neste, avaliou-se qual a influência da área da bandeja utilizada na determinação da taxa de aplicação de agregado, do inglês *Aggregate Application Rate* (AAR).

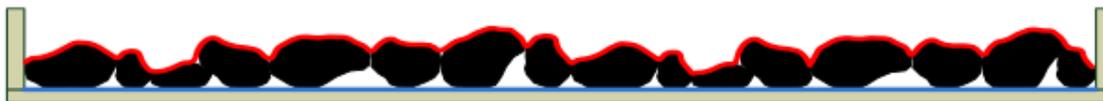
O autor então concluiu que a área da bandeja utilizada no ensaio poderia ser reduzida, para facilitar o manuseio e diminuir a quantidade de material utilizado. A partir de diversas repetições, observou-se que uma bandeja com área de 508×305 mm apresentava pouca variância e poderia ser representativa para áreas maiores. A utilização de uma área de bandeja diferente foi denominada pelo autor como ensaio da bandeja modificado, com o qual também foi avaliada a taxa de agregado da segunda camada do *chip seal*.

Após a realização do ensaio de bandeja modificado e com a taxa de agregado definida, realizou-se um ensaio de densidade nos agregados para auxiliar na determinação da taxa de aplicação de emulsão (*Emulsion Application Rate* - EAR). A determinação da densidade do agregado foi realizada seguindo as normas americanas ASTM C127-07 e C128-07 que já

possuem versões mais atualizadas de 2015. Pelo peso obtido no ensaio de bandeja e a densidade obtida no ensaio de densidade encontrou-se o volume ocupado pelo agregado.

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 esquema da bandeja visualizado na varredura pode ser observado na Figura 41.

Figura 41 – Perfil do ensaio de bandeja modificado na máquina de varredura a laser



Fonte: Adams (2014).

O volume total do *chip seal* 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 é possível obter o volume de vazios através das equações a seguir:

$$V_{\text{vazios}} = V_{\text{total}} - V_{\text{agregado}} \quad (17)$$

$$V_{\text{agregado}} = \frac{W_{\text{agregado}}}{\gamma_{\text{agregado}}} \quad (18)$$

Sendo: W_{agregado} a massa e γ_{agregado} a densidade do material.

Após a determinação do volume de vazios da amostra, calculou-se o volume de emulsão necessário. A taxa de ligante, *emulsion application rate* (EAR) final é dada a partir da seguinte equação:

$$V_{\text{emulsão}} = V_{\text{vazios}} + V_{\text{ag-abs}} + V_{\text{pav-abs}} \quad (19)$$

Sendo: $V_{\text{ag-abs}}$ o volume de emulsão absorvido pelo agregado e $V_{\text{pav-abs}}$ o volume de emulsão absorvido pela própria base do revestimento.

Supõe-se que a adição das variáveis $V_{\text{ag-abs}}$ e $V_{\text{pav-abs}}$ evita que a taxa de emulsão seja subestimada e diminui a desagregação excessiva do agregado. A determinação desses volumes também é feita utilizando a varredura à laser. O autor propôs então através dessa metodologia e de ensaios posteriores gráficos de dosagem para *chip seal* para agregados de três granulometrias diferentes.

O autor pôde perceber ainda com a pesquisa realizada que a granulometria do agregado é muito impactante no desempenho do revestimento. Para maiores detalhes da metodologia proposta e resultados obtidos, consultar Adams (2014).

Existem ainda diversos métodos de dosagem de TSP conhecidos, como os métodos de *Lovering*, de *Linckennhyel*, de *Vogt*, entre outros, que não foram abordados na presente revisão, mas que foram detalhados e comentados por PINTO (2002) e PEREIRA (2013).

2.11. DEFEITOS DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

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. O autor constatou que alguns desses defeitos poderiam ter apenas importância estética, como as descontinuidades 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 todo. Os defeitos típicos dos TSPs e propostas de correção podem ser observados na Tabela 8 e as imagens complementares na Figura 42.

Uma alternativa para que os defeitos citados por Loiola (2009) sejam mitigados ou minimizados é o investimento em estudos de dosagem dos TSPs, pois a adequação das técnicas construtivas com o material disponível nas proximidades é essencial para a concepção de um TSP satisfatório. Os órgãos gestores responsáveis poderiam diminuir a ocorrência dessas falhas caso fosse elaborado um manual de defeitos específico para tratamentos superficiais.

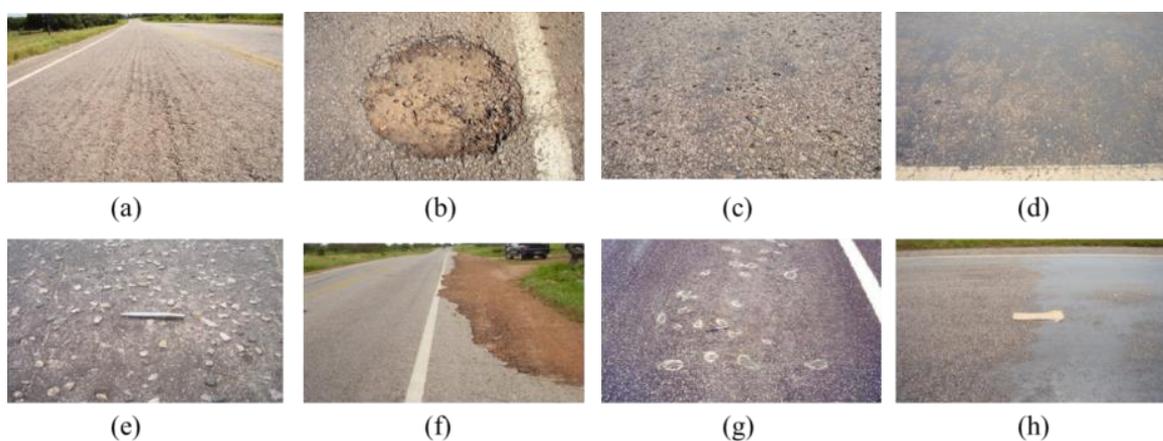
Tabela 7 – Defeitos específicos para tratamentos superficiais

DEFEITOS	DESCRIÇÃO	CAUSAS MAIS PROVÁVEIS	EVOLUÇÃO	CORREÇÃO	
DESAGREGAÇÃO	Longitudinal (penteaduras) foto (a)	Falhas longitudinais devido ao desprendimento do agregado	Altura da barra espargidora Ângulo dos bicos Bomba de ligante Falha de bico	Perda de agregado pelo tráfego Buraco Panela	Quando no início, aplicar capa selante Remendar ao identificar buraco ou panela
	Do revestimento foto (b)	Desprendimento de partículas do agregado sob ação do tráfego e do intemperismo. São normalmente localizadas.	Adesividade ligante/agregado Subdosagem de ligante Excesso de agregado Granulometria deficiente Presença de pó Natureza/estado do substrato	Buraco Panela	Remendar o revestimento
REJEIÇÃO EXCESSIVA DE AGREGADO foto (c)	Rejeição excessiva de agregado da última camada pela ação do tráfego	Excesso de pó Agregado úmido Abertura precoce do tráfego Tráfego em altas velocidades logo após a abertura Granulometria deficiente Excesso de agregado Subdosagem de ligante	Textura rugosa Exsudação	Reposição do agregado da última camada Aplicar capa selante	

DEFEITOS	DESCRIÇÃO	CAUSAS MAIS PROVÁVEIS	EVOLUÇÃO	CORREÇÃO
EXSUDAÇÃO foto (d)	Afloramento do ligante em excesso na superfície do revestimento Ocorrência localizada em zonas ou faixas	Excesso de ligante	Escorregamento do revestimento Arrancamento do revestimento	Adicionar agregado Aplicar capa selante ou TSP em grandes áreas
DESGASTE	Do agregado foto (e)	Revestimento em que os agregados sofreram arredondamento devido às ações do tráfego e deixaram a superfície lisa Agregado com baixa resistência a abrasão	Emprego de agregado natural já arredondado, liso ou sem britagem	Superfície propícia à derrapagem quando molhada Aplicar MRAF Aplicar capa selante
	Da borda foto (f)	Arrancamento de agregado situado nas bordas do revestimento	Rodovias muito estreitas ou falta de acostamento	Danos ao revestimento Reconstrução manual do TSP nas bordas
SUPERPOSIÇÃO OU ENCRAVAMENTO foto (g)	Taxa elevada de agregado por deficiência de dosagem ou técnica construtiva	Excesso de agregado Deficiência de ligante Técnica construtiva errada	Corrugação do revestimento	Novo tratamento Extenso remendo no revestimento
JUNTAS DE CONSTRUÇÃO DEFEITUOSAS foto (h)	Juntas longitudinais e transversais visíveis Considerado defeito estético	Execução deficiente Recobrimento de ligante excessivo Agregado insuficiente Superposição das juntas	Exsudação Prejuízo à sinalização do eixo	Colocação de papel laminado para evitar a superposição
CORRUGAÇÃO	Pequenas ondulações formadas transversalmente	Distribuição do ligante Bomba dosadora Velocidade da bomba	Ondulações transversais	Aplicar agregado e ligante manualmente nas falhas Aplicar capa selante
RUGOSIDADE GEOMÉTRICA INADEQUADA	Superfície demasiadamente lisa, com baixa resistência à derrapagem	Excesso de ligante Baixa viscosidade do ligante Agregado inadequado	Exsudação Superfície derrapante	Aplicar capa selante Aplicar MRAF

Fonte: Loiola (2009).

Figura 42 – Exemplos de defeitos em tratamentos superficiais



Fonte: Loiola (2009).

No Brasil, para se analisar defeitos em pavimentos flexíveis e semirrígidos emprega-se a Norma DNIT 005/2003 - TER que classifica os defeitos em oito tipos: (1) Fendas (fissuras e trincas); (2) Afundamentos; (3) Ondulação ou Corrugação; (4) Escorregamento; (5) Exsudação; (6) Desgaste; (7) Panela e (8) Buraco. A aplicação dessa terminologia para o caso dos revestimentos do tipo TSP apresenta algumas limitações, pois alguns defeitos típicos dos TSPs não são relatados nesta norma. Outra consideração pertinente é que os fenômenos que explicam o aparecimento de certos defeitos em TSPs são diferentes dos concretos asfálticos (CA). Por exemplo, as trincas por fadiga nos tratamentos superficiais não decorrem de um problema de fadiga, como no caso dos CA, mas sim devido à retração da camada de base.

Conforme comenta Loiola (2009) é importante ressaltar que os defeitos mais frequentes encontrados nos TSPs são decorrentes de causas que se localizam no próprio revestimento. Considerando-se apenas os defeitos resultantes de falhas no próprio revestimento, pode-se afirmar que eles podem decorrer de técnicas de execuções inadequadas, emprego de equipamento defeituoso, equipamento usado inadequadamente e, até mesmo, utilização de ligante e agregado de má qualidade. Alguns outros defeitos podem ser decorrentes da má qualidade dos materiais usados na construção das camadas inferiores do pavimento, na concepção errada do projeto e devido o pavimento encontrar-se no final de sua vida útil.

A perda de agregados (*loss aggregate/raveling*) e a exsudação são os dois defeitos mais críticos que podem ser encontrados nos TSPs (KIM & LEE, 2008a). 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: tempo chuvoso, taxa excessiva de agregados, controle de tráfego inadequado durante a construção, quantidade de ligante inadequado 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.

Adams (2014) mencionou também outros defeitos comuns em *chip seals*, tais como o *stripping*, a perda de adesão entre o agregado e o ligante, que causa danos à textura do revestimento, e o *streaking*, conhecido como penteadura no Brasil, caracterizado por falhas longitudinais no revestimento. Além desses também são muito presentes defeitos devido ao excesso de ligante, como *bleeding* e *flushing*, termos utilizados para a exsudação.

Com base em diversas observações de campo e leitura de diversas fontes propõe-se que o DNIT desenvolva uma terminologia típica para os TSPs. Para auxiliar esta elaboração,

desenvolveu-se a Tabela 9 com base nos defeitos relatados nos estudos de Loiola (2009) realizados no estado do Ceará e no de Adams (2014) realizados no estado da Carolina do Norte.

Tabela 8 – Defeitos encontrados dos revestimentos do tipo TSP nos estados do Ceará (CE) e da Carolina do Norte (NC)

DEFEITOS	FOTO CE	FOTO NC
Perda de Agregados (<i>aggregate loss/raveling</i>)		
Exsudação (<i>Bleeding/Flushing</i>)		
<i>Stripping</i> (perda de adesão/descolamento provocada pela superfície molhada)	-	
Penteadura (<i>Streaking</i>)		

Fonte: Loiola (2009) e Adams (2014).

2.12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o que foi apresentado, pôde-se compreender melhor o estágio de desenvolvimento das técnicas de concepção, construção e avaliação de tratamentos superficiais por penetração na Carolina do Norte e no Brasil. Após as pesquisas realizadas, avaliou-se que os equipamentos utilizados em campo, para a construção de TSPs são muito similares, apresentando poucas diferenças. Já em nível laboratorial, a Carolina do Norte encontra-se muito mais desenvolvida que qualquer estado do Brasil, aplicando diversas

metodologias de avaliação de desempenho e propondo metodologias e dosagem próprias. Concluiu-se que é necessário direcionar os estudos no Brasil para a criação ou adaptação de metodologias de avaliação de desempenho que busquem avaliar a perda de agregado e a exsudação em TSPs, para em seguida propor uma metodologia de dosagem adequada. A falta de equipamentos correspondentes no Brasil direcionou a pesquisa para a introdução do PUC, um coeficiente que permite avaliar se um agregado é adequado para a aplicação em TSPs apenas observando sua distribuição granulométrica.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para alcançar os objetivos propostos no estudo, dividiu-se a presente pesquisa em cinco etapas metodológicas, listadas abaixo:

- i. Revisão bibliográfica;
- ii. Coleta de dados de granulometria e desgaste de agregados;
- iii. Verificação de limites das faixas granulométricas do DNIT;
- iv. Cálculo do PUC;
- v. Análise dos resultados.

A etapa inicial do trabalho constou de uma revisão bibliográfica que ficou concentrada nos estudos desenvolvidos na UFC e na NCSU. Assim, notou-se por pesquisas mais recentes que os estudos voltados para tratamentos superficiais por penetração no Brasil estavam defasados com relação aos realizados no exterior. Não havia método de dosagem específico que não fosse empírico, as normas estão desatualizadas e havia poucos estudos científicos voltados para a temática. Dessa forma, viu-se a necessidade de realizar uma revisão bibliográfica mais aprofundada, investigar as boas práticas adotadas em outros países, bem como realizar um diagnóstico dos serviços de TSPs realizados no Brasil atualmente.

A etapa inicial da metodologia do presente trabalho foi realizada no capítulo 2, no qual foi apresentado o cenário atual do Brasil e foram explanadas algumas das práticas realizadas no estado da Carolina do Norte, nos Estados Unidos. A escolha da Carolina do Norte como referência de estudo deu-se devido à proximidade com os acadêmicos da NCSU que facilitaram a obtenção das informações e dados de pesquisas realizadas no local.

Após a análise das técnicas realizadas na NCSU, percebeu-se que seria complexo e demorado reproduzir todas as técnicas de avaliação de desempenho e de dosagem recomendadas pelo órgão responsável local (NCDOT) e pelos acadêmicos da área. Isso ocorreu devido à falta de equipamentos semelhantes que pudessem realizar os mesmos tipos de experimentos. Mesmo que do ponto de vista experimental não tenha sido possível uma aplicação direta, buscou-se uma forma mesmo que conceitual de avaliar os TSPs a partir de experiências já realizadas na NCSU.

Observou-se que no Brasil, não existem métodos de avaliação de desempenho para TSPs normatizados, o que dificulta a evolução da técnica. Existem, no entanto, algumas pesquisas mais recentes, de Loiola (2009), Pereira (2010, 2013) que buscaram avaliar o

desprendimento de agregados em TSPs adaptando o ensaio de WTAT utilizado para avaliação de MRAF. Apesar de ter sido desenvolvido um método laboratorial, não se pode afirmar que os resultados obtidos por eles são de fato representativos do comportamento do revestimento em campo.

Enquanto isso, a NCSU sempre buscou avaliar em suas pesquisas os dois principais parâmetros causadores de defeitos em *chip seals*, a perda de agregado e a exsudação. A análise da perda de agregado é medida experimentalmente através do *Flip-Over Test*, do *Vialit Test* e do MMLS3. Os três ensaios já foram abordados na seção 2.9 deste estudo. Já a avaliação da área de exsudação vem evoluindo e é feita através de processamento digital de imagens.

Além dos ensaios que medem a perda de agregado efetiva e o nível de exsudação no revestimento, Kim & Lee (2008b) definiram um parâmetro teórico chamado de PUC, o coeficiente de uniformidade baseado no desempenho, do inglês *Performance-Based Uniformity Coefficient*, que fornece um indicativo de qualidade do agregado para emprego em *chip seals* através da análise da sua curva granulométrica. Nas pesquisas realizadas na NCSU, avaliou-se o PUC apenas para TSSs, portanto este será o tipo de revestimento avaliado a seguir.

Na presente pesquisa, optou-se por fazer uma análise teórica de dados obtidos por Pereira (2013), utilizando o conceito do PUC, para avaliar a eficiência do ensaio de WTAT adaptado na obtenção de desgaste de amostras de TSPs produzidas em laboratório.

3.2. COLETA DE DADOS

A fim de confirmar a eficácia do ensaio de WTAT na avaliação do desempenho de TSPs adaptado por Loiola (2009) e modificado por Pereira (2010, 2013), coletaram-se dados de pesquisas que utilizaram esse método para verificação do desgaste de TSS. O método de ensaio utilizado para a produção das amostras e para o ensaio no WTAT foi abordado na seção 2.8.

Pereira (2013) utilizou em seu estudo três agregados diferentes para TSS, dois de origem mineral, sendo um da pedra Pyla, localizada em Caucaia, e o segundo da pedra OCS, localizada no Eusébio, e um agregado siderúrgico. O agregado siderúrgico utilizado foi coletado na sede da Gerdau. Pereira (2013) produziu amostras em laboratório de TSS, TSD e TST, mas foram coletados apenas os dados referentes ao TSS para análise no presente estudo. Ele também utilizou dois tipos de ligante, uma emulsão RR-2C e outra RR2C-E modificada por polímero. Em sua pesquisa não se observou diferenças significativas entre as amostras

produzidas com ambas as emulsões, portanto foi considerado como referência apenas os desgastes obtidos nas amostras de RR-2C.

Como ferramenta de armazenamento, organizaram-se os dados em uma planilha Excel. Para fins de comparação e de análise, os dados coletados foram:

- dados do agregado: tipo/origem (mineral ou siderúrgico), caracterização, taxa aplicada e curva granulométrica;
- dados do ligante: tipo de ligante, caracterização e taxa aplicada;
- dados do TSP: tipo (simples) e desgaste obtido no WTAT;

3.3. CÁLCULO DO PUC

Para este estudo serão analisados os desempenhos de amostras de TSP produzidas em laboratório por outros autores através do cálculo do PUC. O processo de cálculo do PUC foi detalhado na seção 2.9 desta pesquisa, mas serão mais explorados a seguir nas etapas *i*, *ii*, *iii*, *iv* e *v* a seguir:

- i. Plotagem da curva granulométrica do agregado

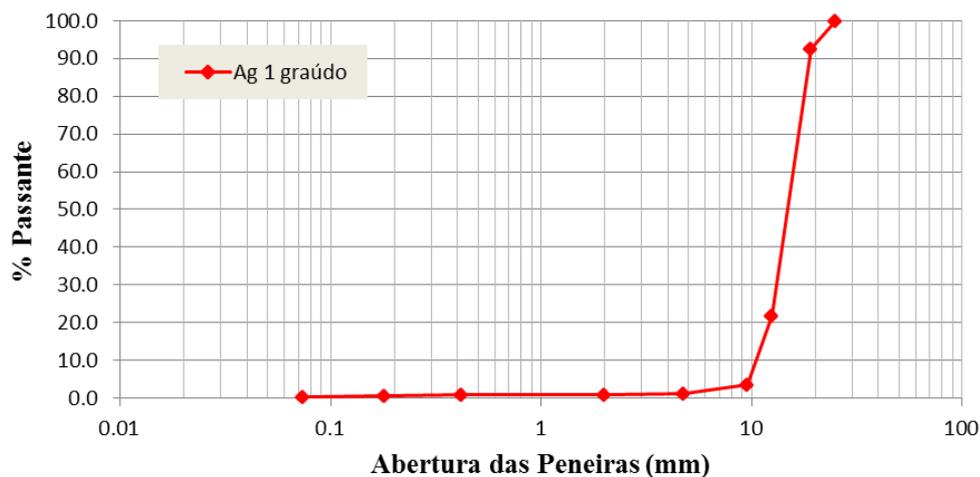
Para calcular o PUC, traçou-se inicialmente a curva granulométrica do agregado. Como exemplo para o método utilizaram-se os dados do agregado mineral da pedreira Pyla, organizados na Tabela 10 para plotagem do gráfico da Figura 43 a seguir.

Tabela 9 – Exemplo de dados para plotagem de curva granulométrica

Peneiras (mm)	% passante do agregado
25	100.00
19.1	92.50
12.5	21.94
9.5	3.64
4.76	1.03
2.0	0.99
0.42	0.92
0.18	0.66
0.074	0.24

Fonte: Adaptado de Pereira (2013).

Figura 43 – Passo 1 para obtenção do PUC

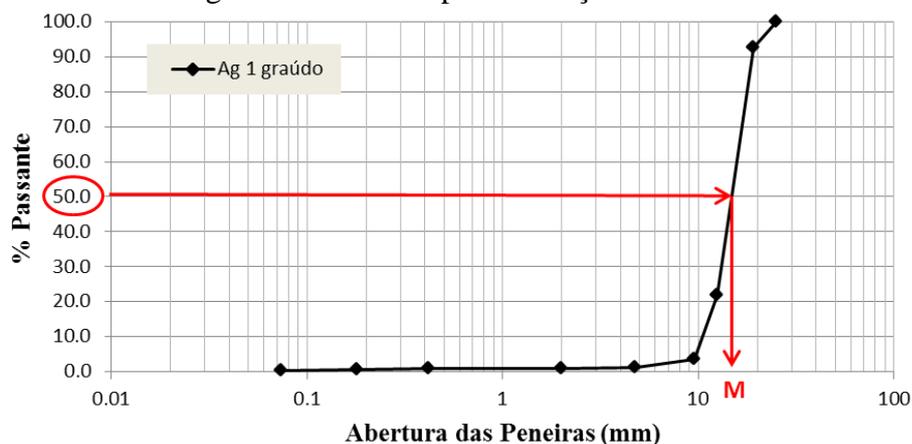


Fonte: Autor (2015).

ii. Identificação da mediana “M” da curva

Com o gráfico plotado, traça-se uma reta horizontal correspondente a porcentagem de 50% que passa do material, no eixo y, até a interseção com a curva granulométrica. Partindo-se do ponto de interseção, traça-se uma reta vertical até o eixo x do gráfico (Figura 44). O valor da interseção é a mediana da curva (M) e é definida como o tamanho da peneira (mm) em que 50% do material passa e 50% é retido.

Figura 44 – Passo 2 para obtenção do PUC

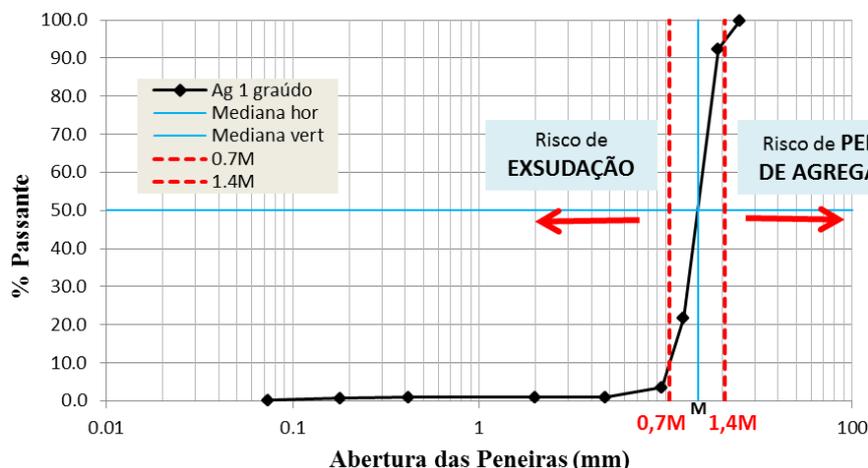


Fonte: Autor (2015).

iii. Cálculo de “ $0,7 \times M$ ” e “ $1,4 \times M$ ”

Depois de identificado o valor de “M”, calculam-se $0,7 \times M$ e $1,4 \times M$. De acordo com o princípio de McLeod, uma das bases teóricas do PUC, “ $0,7 \times M$ ” é o tamanho limite inferior dos agregados para que não ocorra exsudação, enquanto “ $1,4 \times M$ ” é o tamanho limite superior para que não ocorra perda de agregado no revestimento. Com esses parâmetros calculados, traçaram-se retas verticais a partir do eixo x do gráfico (Figura 45).

Figura 45 – Passo 3 para obtenção do PUC

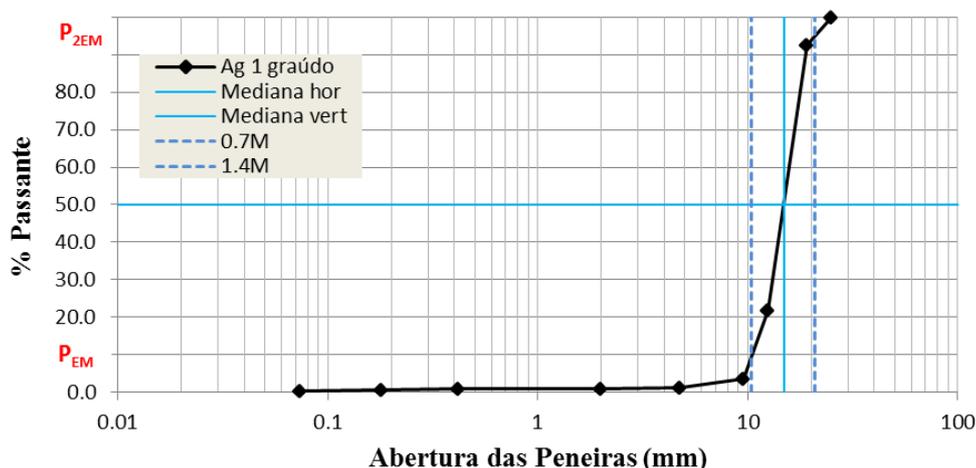


Fonte: Autor (2015).

iv. Obtenção de P_{EM} e P_{2EM}

A partir da interseção da curva granulométrica com as retas verticais traçadas de “0,7×M” e “1,4×M”, traçaram-se retas horizontais até o encontro com o eixo y (Figura 46). O ponto de interseção da reta de “0,7 M” é definido como P_{EM} e é a porcentagem teórica que apresentará exsudação (P_{EM}). O ponto de interseção da reta de “1,4 M” é chamado de P_{2EM} e a porcentagem de perda de agregado teórica pode ser calculada como $100\% - P_{2EM}$ conforme a equação 2 apresentada anteriormente (Equação 2).

Figura 46 – Passo 4 para obtenção do PUC



Fonte: Autor (2015).

v. Cálculo do PUC

Finalmente, com os valores obtidos de P_{EM} e P_{2EM} , calcula-se o PUC como foi definido na Equação 3 da seção 2.9.2, que é a relação entre esses valores. Por definição, quão menor a área exsudada e menor a perda de agregado, melhor a qualidade do revestimento. Portanto, dado que o PUC é diretamente proporcional ao P_{EM} , quão menor for esse parâmetro melhor.

Em contraponto, P_{2EM} maiores geram menor porcentagem de perda de agregado e menor PUC, logo quão maior for esse parâmetro melhor.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão do cálculo do PUC e do que ele representa para o agregado é essencial para o entendimento dos resultados obtidos nesta pesquisa. O presente capítulo trouxe detalhadamente o cálculo do PUC para um agregado, mas os resultados dos demais serão apresentados no próximo capítulo. Após a obtenção do PUC, e comparação dos resultados com os obtidos no ensaio WTAT foram analisados os resultados.

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o cálculo do PUC para todos os agregados de Pereira (2013), bem como verificados os PUCs para as faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT.

4.1. DADOS DE GRANULOMETRIA, CARACTERIZAÇÃO E DOSAGEM

Os dados utilizados nessa pesquisa se referem aos resultados obtidos por Pereira (2013) em sua pesquisa, e que foram devidamente organizadas em forma de tabelas para facilitar a compreensão. Separaram-se os dados de caracterização (Tabela 11) dos referentes à dosagem e desgaste (Tabela 12) e dos de granulometria (Tabela 13). Os valores aqui dispostos são valores médios, cujas análises estatísticas completas podem ser verificadas na fonte original.

Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

PARÂMETROS	Agregado 1	Agregado 2	Ag. siderúrgico
	Graúdo	Graúdo	Graúdo
% Passante #200	0,24	0,21	1,15
Abrasão Los Angeles (%)	36,59	18,33	22,13
Índice de forma	0,87	0,94	0,96
Durabilidade	1,7	2,4	3,1
Densidade	2,7	2,5	3,4
Absorção (%)	0,6	0,4	1,8

Fonte: Pereira (2013).

Tabela 11 – Dados de desgaste e dosagem obtidos por Pereira (2013)

Dados		TSS Ag 1	TSS Ag 2	TSS Ag Siderúrgico
TSP	Tipo	Simple	Simple	Simple
	Desgaste médio no WTAT	14,79%	7,81%	9,72%
Agregado	Tipo	Mineral	Mineral	Siderúrgico
	Método dosagem	DER-CE	DER-CE	DER-CE
	Teor 1ª camada	14,39 kg/m ²	13,82 kg/m ²	18,58 kg/m ²
	Granulometria	Anexa	Anexa	Anexa
Ligante	Tipo	RR-2C	RR-2C	RR-2C
	Teor 1ª camada	0,9 L/m ²	0,9 L/m ²	1,69 L/m ²
	Banho diluído	0,3 L/m ²	0,3 L/m ²	0,3 L/m ²

Fonte: Adaptado de Pereira (2013).

Tabela 12 – Resumo dos percentuais passantes

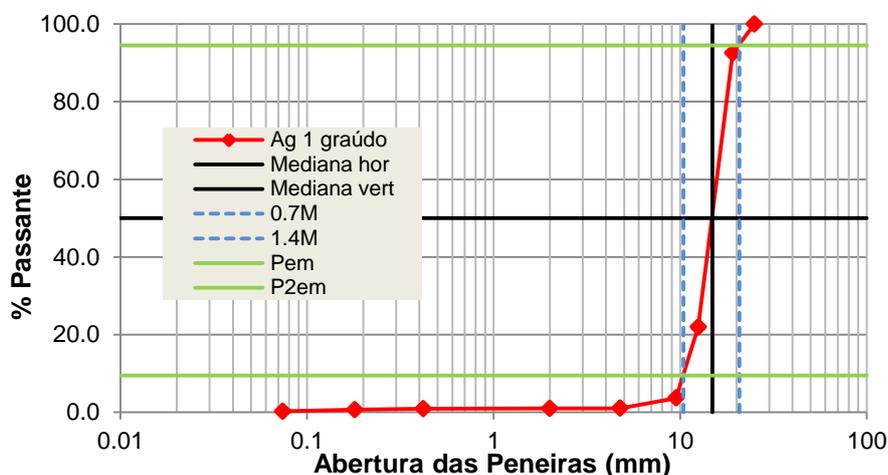
PENEIRAS		% PASSANTE		
Pol	mm	Ag 1 (Pyla)	Ag 2 (OCS)	Siderúrgico
		Graúdo	Graúdo	
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	92,50	80,81	100,00
1/2"	12,5	21,94	19,04	73,08
3/8"	9,5	3,64	7,87	62,08
Nº 4	4,76	1,03	2,21	38,09
Nº 10	2	0,99	1,26	23,81
Nº 200	0,074	0,92	0,68	7,99
Fundo	-	0,66	0,41	4,65

Fonte: Pereira (2013).

4.2. PUC DOS AGREGADOS DE PEREIRA (2013)

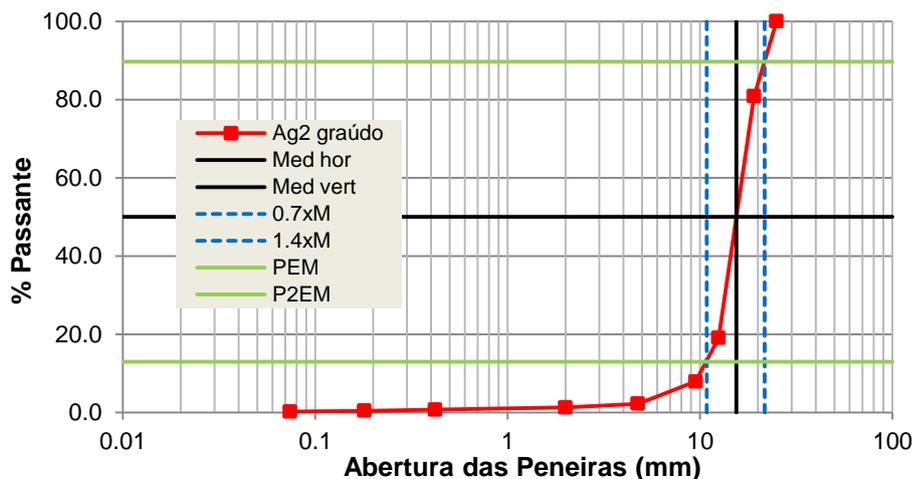
Para dar início ao cálculo do PUC traçou-se a curva granulométrica dos agregados a partir dos dados da Tabela 13 e em seguida continuou-se o processo detalhado no capítulo anterior para obtenção dos demais parâmetros. Os valores obtidos para os parâmetros $0,7 \times M$, $1,4 \times M$, P_{EM} , P_{2EM} e PUC de cada agregado foram obtidos graficamente de acordo com as Figuras 47, 48 e 49.

Figura 47 – Agregado 1 graúdo (Pyla)



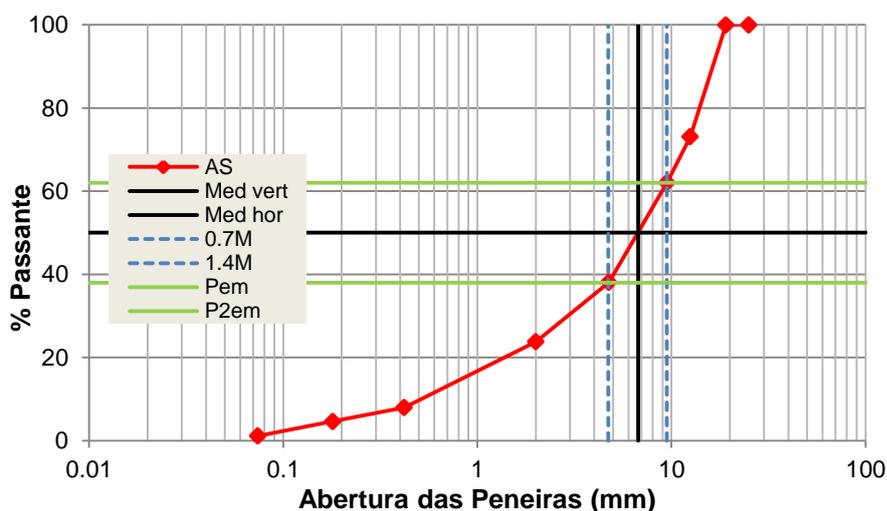
Fonte: Autor (2015).

Figura 48 – Agregado 2 graúdo (OCS)



Fonte: Autor (2015).

Figura 49 – PUC Agregado siderúrgico



Fonte: Autor (2015).

Os parâmetros foram organizados na Tabela 14, bem como alguns dados referentes à dosagem, origem do agregado, perda de agregado no WTAT e perda teórica ($100 - P_{2EM}$) suposta por Kim & Lee (2009).

Para melhor visualização, elaborou-se o gráfico da Figura 50 com os dados dos três agregados de PUC e perda de agregado no WTAT. Verificando o valor da PUC dos agregados minerais, percebeu-se certa coerência (uma vez que os mesmos apresentam granulometrias parecidas), diferente do valor obtido para o agregado siderúrgico. O agregado siderúrgico apresenta distribuição não uniforme, por isso obteve-se um valor de PUC muito alto, o que não foi comprovado pelo valor obtido de perda no WTAT.

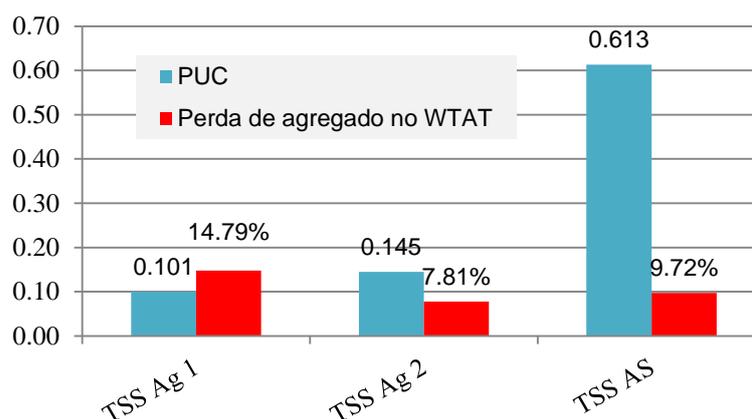
Tabela 13 – Resumo dos valores obtidos de PUC e demais parâmetros

PARÂMETROS	TSS Ag 1	TSS Ag 2	TSS Ag Siderúrgico
0,7×M	10,40	10,85	4,73
1,4×M	20,79	21,70	9,45
P_{EM} (%)	9,5	13,0	38,0
P_{2EM} (%)	94,5	89,7	62,0
100 - P_{2EM} (%)	5,5	10,3	38,0
PUC	0,101	0,145	0,613
Tx emulsão (L/m²)	1,20	1,20	1,99
Tx agregado (kg/m²)	14,39	13,82	18,58
Origem do agregado	Gnaisse	Fonolito	Escória de aciaria
Perda de agregado no WTAT	14,79%	7,81%	9,72%

Fonte: Autor (2015).

Avaliando os valores de perda teórica (Figura 51), apenas o agregado 2 mostrou-se coerente com os estudos de Kim & Lee (2009). Tal fato poderia sugerir que o WTAT não é um bom indicador de perda de agregado efetiva, já que ele não simula exatamente o mesmo movimento que os simuladores utilizados na NCSU, e sim uma abrasão mais agressiva. Outros motivos que podem ter afetado os resultados do ensaio estão associados com a sua execução, tais como compactação não uniforme ou insuficiente, dosagem inadequada ou até mesmo demora no processo, que diminuiria a interação ligante-agregado.

Figura 50 – Gráfico comparativo da PUC e do Desgaste no WTAT

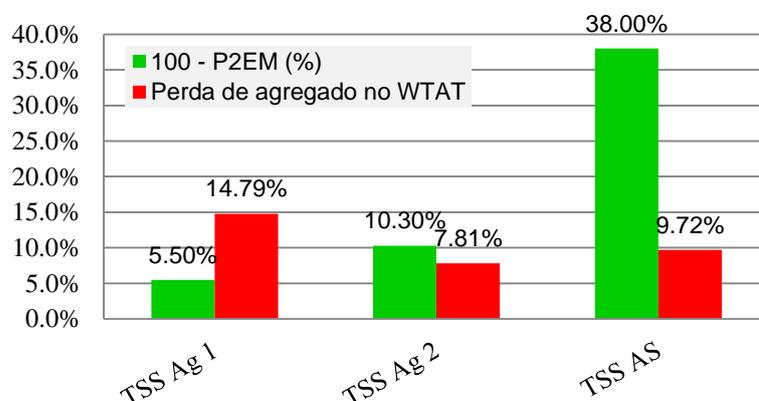


Fonte: Autor (2015).

Apesar das hipóteses citadas acima, acreditou-se que a principal causa dos resultados pouco homogêneos foi a diferença de origem dos agregados avaliados, tornando impossível correlacionar diretamente o valor da PUC com os valores obtidos de perda de agregado do

WTAT. Para agregados de mesma origem, que possuem textura e forma semelhantes seria possível avaliar diretamente granulometrias diversas.

Figura 51 – Gráfico comparativo da Perda teórica e da Perda de agregado no WTAT

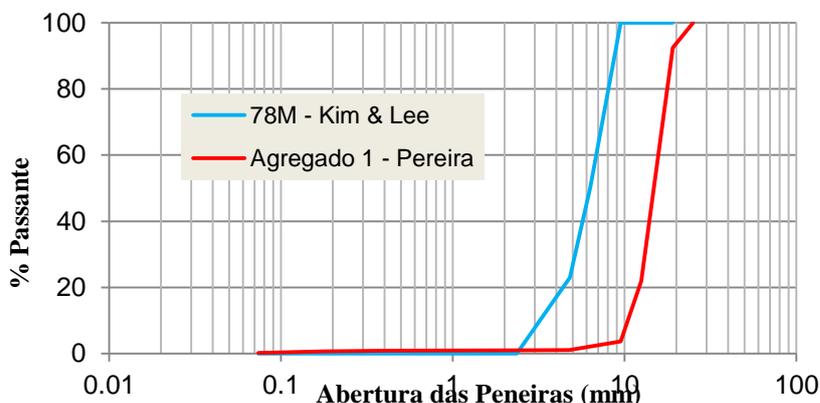


Fonte: Autor (2015).

Portanto, é necessário realizar estudos futuros com um plano experimental que varie a granulometria de agregados de mesma origem, para então verificar uma relação com o PUC. Em seguida poderiam ser avaliados diversos parâmetros que afetam o desempenho do TSP, como aplicação de diferentes emulsões, diferentes dosagens, variação da compactação, entre outros.

Além disso, as discrepâncias nos resultados obtidos em comparação aos de Kim & Lee (2008b) poderiam ser justificadas pela diferença de tamanho médio dos agregados empregados. Pereira (2013) empregou no seu TSS um agregado de tamanho médio próximo a 3/4'', enquanto que Kim & Lee (2008b) mais próximo a 1/4'' (Figura 52). O agregado mais graúdo de Pereira poderia ser mais suscetível ao arrancamento pelo tráfego que o de Kim & Lee.

Figura 52 – Tamanho dos agregados de Kim & Lee (2008b) e Pereira (2013)



Fonte: Autor (2015).

4.2.1. Faixas do DNIT

O DNIT recomenda em suas especificações a utilização de faixas específicas para que o agregado seja considerado adequado. A seguir serão calculados os PUCs dos limites das faixas impostas pelo DNIT e será verificada qual a uniformidade de agregado é exigida pelo órgão.

a) Tratamento Superficial Simples

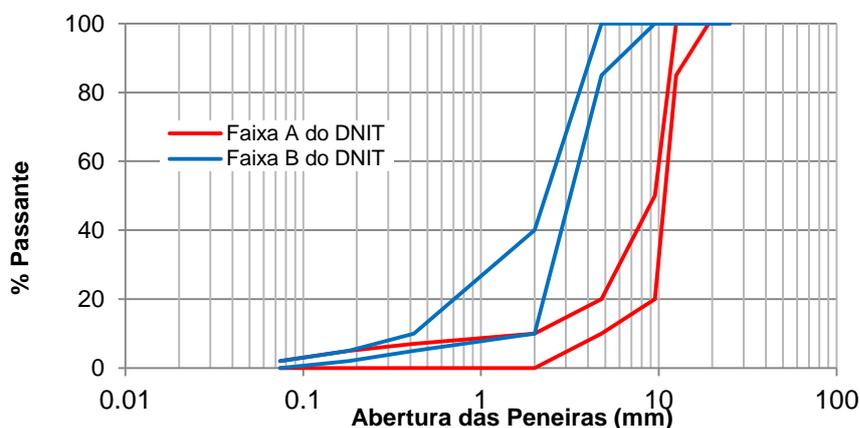
Para verificação do PUC das faixas granulométricas do DNIT recomendadas para emprego em TSS, construiu-se a partir dos dados fornecidos de granulometria dos agregados (Tabela 15) o gráfico da Figura 53.

Tabela 14 – Granulometria dos agregados para aplicação em TSS

Peneiras		Faixas		Tolerância da faixa de projeto
Polegadas	mm	A	B	
1/2"	12,7	100	-	± 7
3/8"	9,5	85-100	100	± 7
Nº 4	4,8	10-30	85-100	± 5
Nº 10	2,0	0-10	10-40	± 5
Nº 200	0,074	0-2	0-2	± 2

Fonte: DNIT 146/2012 – ES.

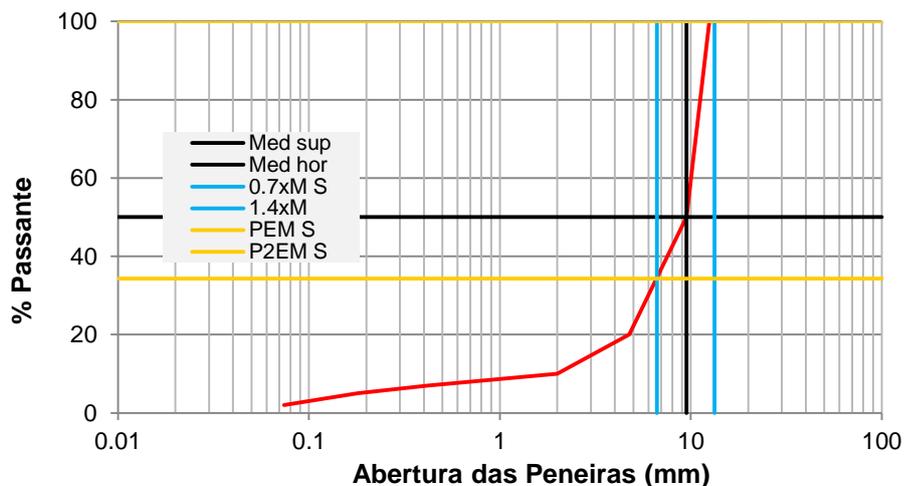
Figura 53 – Faixas A e B do DNIT 146/2012 – ES



Fonte: Autor (2015).

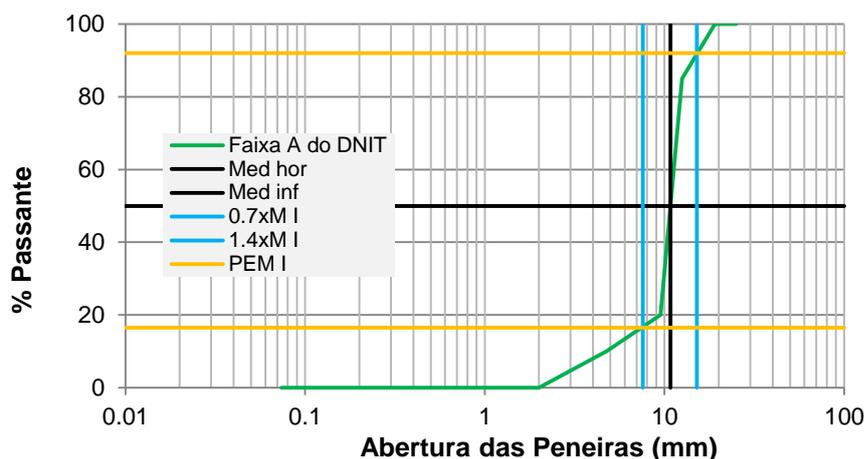
Para melhor visualização, separou-se a faixa A da faixa B e calculou-se o PUC dos limites inferiores e superiores de cada uma. O processo de cálculo da faixa A pode ser observado nos gráficos das Figuras 54 e 55, dos limites superior e inferior, respectivamente.

Figura 54 – PUC limite superior Faixa A TSS



Fonte: Autor (2015).

Figura 55 – PUC limite inferior Faixa A TSS



Fonte: Autor (2015).

Na Tabela 16 podem ser verificados os parâmetros obtidos para a faixa A e observa-se o valor do PUC entre 0,179 e 0,343, aproximadamente. Tais valores indicam que agregados próximos ao limite inferior da faixa A, apresentarão caráter mais uniforme, com baixa porcentagem de grãos muito maiores ou muito menores que a mediana da curva.

Tabela 15 – PUC dos limites da Faixa A do DNIT

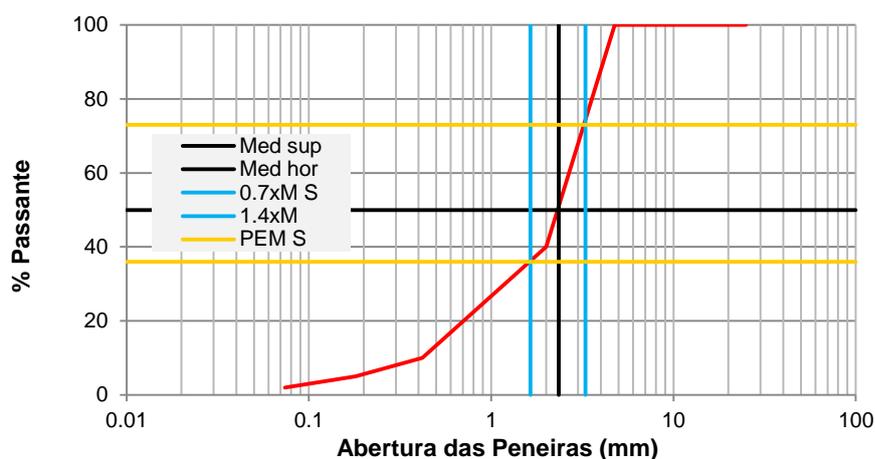
LIMITE SUPERIOR				LIMITE INFERIOR			
0,7×M	6,65	P_{EM}	34,3%	0,7×M	7,56	P_{EM}	16,5%
M	9,50 mm	P_{2EM}	100%	M	10,80 mm	P_{2EM}	92%
1,4×M	13,30	PUC_{SUP}	0,343	1,4×M	15,12	PUC_{INF}	0,179

Fonte: Autor (2015).

Além disso, o PUC do limite superior é considerado alto para os padrões de Kim & Lee (2009), sugerindo que agregados muito próximos deste limite, mesmo ainda satisfazendo a curva exigida pelo DNIT, podem apresentar altos índices de perda de agregado ou exsudação. Ao analisar os demais parâmetros, observa-se um valor alto de P_{EM} , indicando a exsudação como crítica para esses agregados.

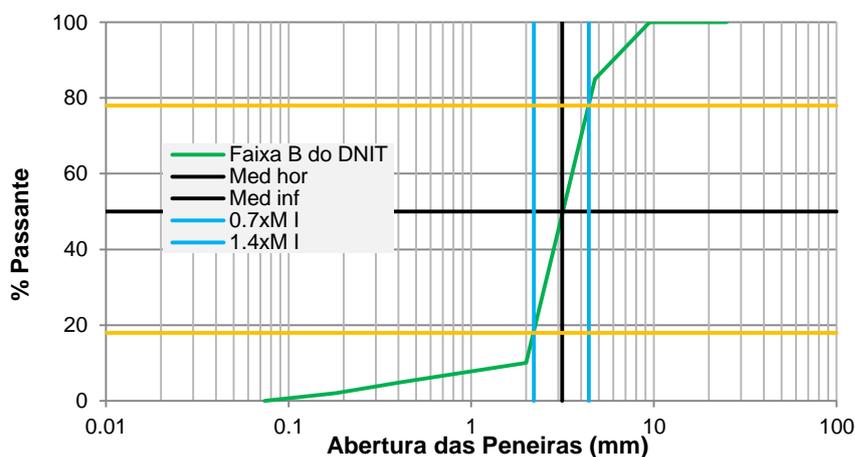
O processo de cálculo da faixa B pode ser observado no gráfico das Figuras 56 e 57, dos limites superior e inferior, respectivamente. Na Tabela 17 organizaram-se os parâmetros obtidos para a faixa B e observam-se valores de PUC entre 0.231 e 0.493, aproximadamente. O PUC do limite superior é considerado alto para os padrões de Kim & Lee (2009), indicando que agregados muito próximos deste limite, mesmo ainda satisfazendo a curva exigida pelo DNIT, podem apresentar altos índices de perda de agregado ou exsudação. Ao analisar os demais parâmetros, observa-se um valor alto de P_{EM} , indicando a exsudação como crítica para esses agregados.

Figura 56 – PUC limite superior Faixa B TSS



Fonte: Autor (2015).

Figura 57 – PUC limite inferior Faixa B TSS



Fonte: Autor (2015).

Tabela 16 – PUC dos limites da Faixa B do DNIT

LIMITE SUPERIOR				LIMITE INFERIOR			
0.7×M	1,65	P_{EM}	36%	0.7×M	2,21	P_{EM}	18%
M	2,35 mm	P_{2EM}	73%	M	3,15 mm	P_{2EM}	78%
1.4×M	3,29	PUC_{SUP}	0,493	1.4×M	4,41	PUC_{INF}	0,231

Fonte: Autor (2015).

Portanto, com base nas recomendações de Kim & Lee (2009), agregados de granulometria semelhante ao limite inferior da faixa A seriam mais recomendados ao emprego em TSS, pois apresentariam menor PUC e por consequência melhor desempenho.

b) Tratamento Superficial Duplo

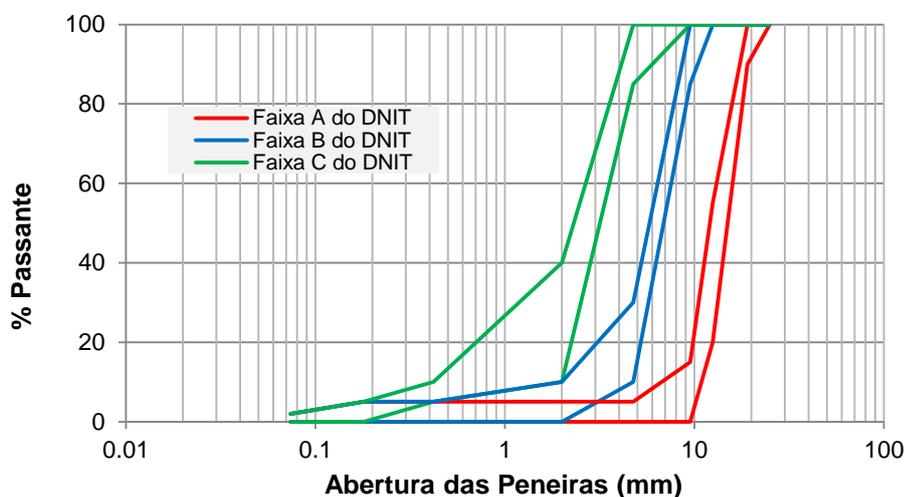
Para verificação do PUC das faixas granulométricas do DNIT recomendadas para emprego em TSD, construiu-se a partir dos dados fornecidos de granulometria dos agregados (Tabela 18) o gráfico da Figura 58.

Tabela 17 – Granulometria dos agregados para aplicação em TSD

Peneiras		% passante (Peso)			Tolerância da faixa de projeto
Polegadas	mm	A 1ª camada	B 1ª ou 2ª camada	C 2ª camada	
1/2"	12,7	20-55	100	-	± 7
3/8"	9,5	0-15	85-100	100	± 7
Nº 4	4,8	0-5	10-30	85-100	± 5
Nº 10	2,0	-	0-10	10-40	± 5
Nº 200	0,074	0-2	0-2	0-2	± 2

Fonte: DNIT 147/2012 – ES.

Figura 58 – Faixas A, B e C do DNIT 147/2012 – ES

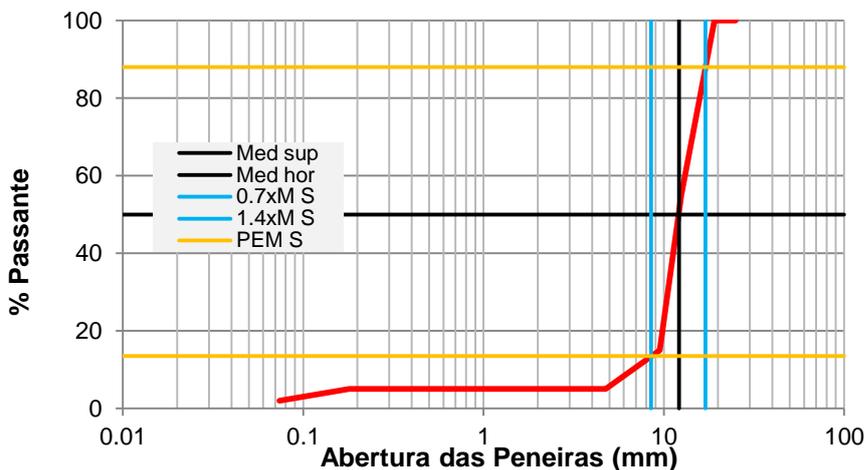


Fonte: Autor (2015).

Para melhor visualização, separou-se a faixa A da faixa B e calculou-se o PUC dos limites inferiores e superiores de cada uma. O processo de cálculo da faixa A pode ser observado no gráfico das Figuras 59 e 60, dos limites superior e inferior, respectivamente. A faixa C apresenta os mesmos limites da faixa B da Tabela 15 do TSS, portanto o processo de cálculo e os valores obtidos são os mesmos e não serão repetidos.

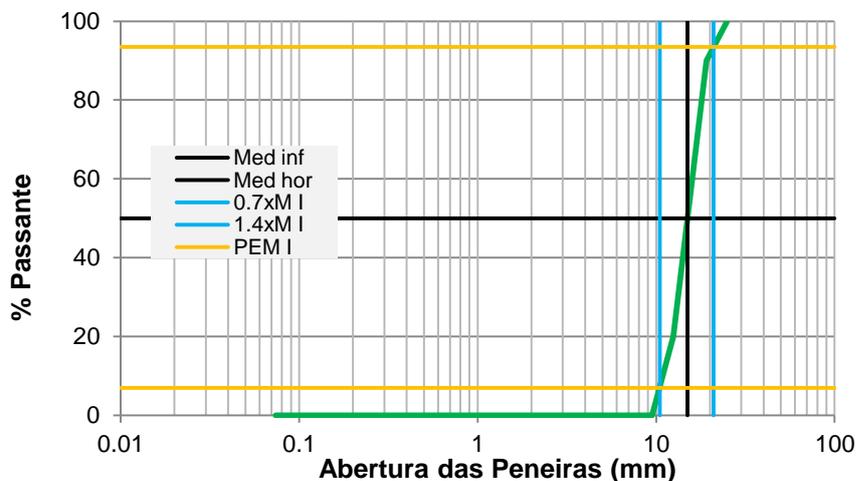
Na Tabela 19 podem ser verificados os parâmetros obtidos para a faixa A e observam-se valores de PUC entre 0.075 e 0.153, aproximadamente. Para os padrões de Kim & Lee (2009), esses valores de PUC comprovam o caráter uniforme da curva, bem como pouca quantidade de grãos muito maiores ou muito menores que a mediana. Dessa forma, consideram-se agregados contidos na faixa A como satisfatórios para emprego em TSPs.

Figura 59 – PUC limite superior Faixa A TSD



Fonte: Autor (2015).

Figura 60 – PUC limite inferior Faixa A TSD



Fonte: Autor (2015).

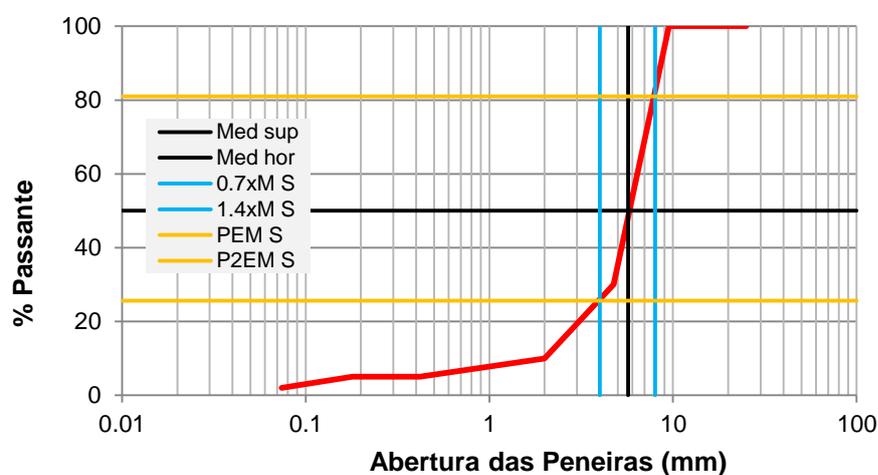
Tabela 18 – PUC dos limites da Faixa A do DNIT

LIMITE SUPERIOR				LIMITE INFERIOR			
0.7×M	8,51	P_{EM}	13,5%	0.7×M	10,50	P_{EM}	7%
M	12,15 mm	P_{2EM}	88%	M	15,00 mm	P_{2EM}	93,5%
1.4×M	17,01	PUC_{SUP}	0,153	1.4×M	21,00	PUC_{INF}	0,075

Fonte: Autor (2015).

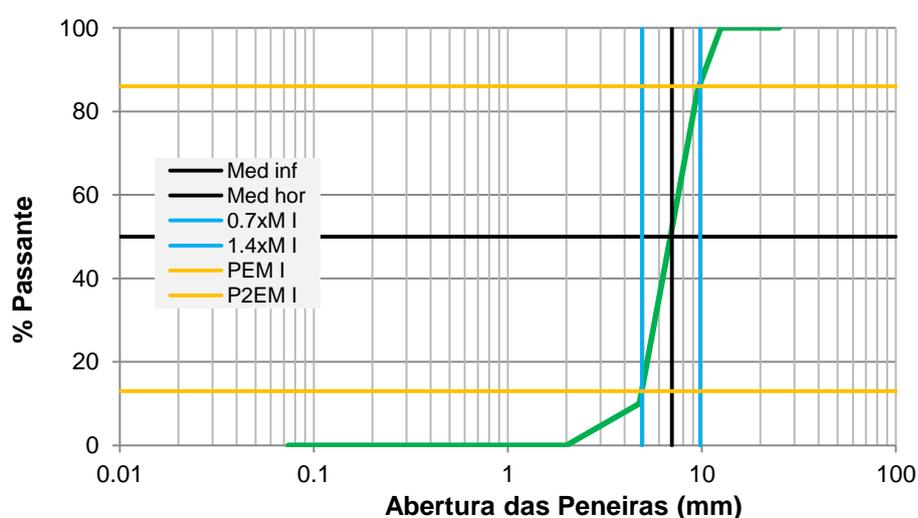
O processo de cálculo da faixa B pode ser observado nos gráficos das Figuras 61 e 62, dos limites superior e inferior, respectivamente.

Figura 61 – PUC limite superior Faixa B TSD



Fonte: Autor (2015).

Figura 62 – PUC limite inferior Faixa B TSD



Fonte: Autor (2015).

Na Tabela 20 organizaram-se os parâmetros calculados para a faixa B e observam-se valores de PUC entre 0.151 e 0.316, aproximadamente. O PUC do limite superior é

considerado alto para os padrões de Kim & Lee (2009), indicando que agregados muito próximos deste limite, mesmo ainda satisfazendo a curva exigida pelo DNIT, podem apresentar altos índices de perda de agregado ou exsudação. Ao analisar os demais parâmetros, observa-se um valor alto de P_{EM} , indicando a exsudação como crítica para esses agregados. Entretanto, esse tipo de revestimento é composto por duas camadas e é possível que o PUC alto não seja indicativo de exsudação ou perda de agregado, pois os grãos podem se acomodar nos vazios da camada inferior.

Tabela 19 – PUC dos limites da Faixa B do DNIT

LIMITE SUPERIOR				LIMITE INFERIOR			
0.7×M	3,99	P_{EM}	25,6%	0.7×M	4,90	P_{EM}	13%
M	5,70 mm	P_{2EM}	81%	M	7,00 mm	P_{2EM}	86%
1.4×M	7,98	PUC_{SUP}	0,316	1.4×M	9,80	PUC_{INF}	0,151

Fonte: Autor (2015).

Portanto, pelas recomendações de Kim & Lee (2009), agregados pertencentes à faixa A ou de granulometria semelhante ao limite inferior da faixa B seriam mais recomendados ao emprego em TSD, pois apresentariam melhor desempenho. A faixa C não apresentou bons resultados de PUC, pois tanto os valores de P_{EM} e P_{2EM} foram muitos altos. Não foram avaliadas neste estudo as faixas de TST por ser um tipo de TSP pouco aplicado no estado do Ceará/Brasil e na Carolina do Norte/Estados Unidos.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. CONCLUSÕES QUANTO AO PUC E AO WTAT

Concluiu-se pela bibliografia consultada que o parâmetro PUC por si só já é um bom indicativo de qualidade para o agregado. No entanto, o desempenho final do revestimento irá depender simultaneamente de outros fatores, como a dosagem aplicada, o método construtivo e a compatibilidade ligante-agregado.

Não foi possível identificar uma correlação direta entre o PUC e o desgaste no WTAT, pois os agregados estudados eram de diferentes origens. Apesar de não haver comprovação de que o WTAT pode ser empregado para a avaliação de perda de agregado em TSPs, este ainda é o único método laboratorial existente no Ceará que avalia esse parâmetro.

Pôde-se perceber que em amostras produzidas com agregados de mesma origem mineralógica e que passaram pela mesma britagem, com apenas granulometrias diferentes, o conceito de PUC para verificação da aplicabilidade em TSPs deve ser eficaz. Pelo que foi estudado, sugere-se o cálculo do PUC como auxiliar na escolha preliminar dos agregados, a fim de diminuir os riscos de defeitos decorrentes da perda de agregado e da exsudação.

5.2. CONCLUSÕES QUANTO ÀS FAIXAS DO DNIT

Ao calcular a PUC das faixas recomendadas pelo DNIT observaram-se algumas inconsistências. Das faixas recomendadas para TSS, observou-se que apenas agregados com granulometria semelhante ao limite inferior da faixa A seriam considerados ideais para esse tipo de revestimento. Teoricamente o limite superior da faixa A e toda a faixa B teriam grande tendência à exsudação.

Para o TSD considerou-se toda a faixa A e o limite inferior da faixa B como as de granulometria mais adequadas para o revestimento. A faixa C apresentava o mesmo perfil da faixa B do TSS, portanto inviável ao uso, assim como o limite superior da faixa B. Concluiu-se a partir disso que as faixas do DNIT deveriam ser alvo de algum programa experimental que comprovasse, ou não, as hipóteses aqui levantadas. No futuro, seria interessante incluir nas normas algum parâmetro semelhante ao PUC que caracterizasse os agregados que apresentassem menor risco de gerar defeitos no revestimento.

5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. Avaliar o parâmetro PUC para agregados empregados em estudos de *Cape Seal* e Microrrevestimento asfáltico a frio;
- ii. Adaptar novos ensaios para avaliação de perda de agregado em laboratório, como o *Vialit test* e o *Flip-over test*;
- iii. Investigar a influência do parâmetro PUC em TSDs e TSTs. Verificar qual das camadas impacta mais no desempenho do revestimento, a mais graúda ou a mais miúda;
- iv. Investigar agregados com a mesma PUC, variando os demais parâmetros, como taxa de ligante, compactação, etc.;
- v. Utilizar processamento digital de imagens para avaliação de exsudação em tratamentos superficiais por penetração;
- vi. Criar metodologia de avaliação de desempenho completa para TSPs que inclua a verificação de perda de agregado e de exsudação adaptados às técnicas nacionais, bem como uma metodologia de acompanhamento em campo para validação de resultados laboratoriais;
- vii. Investigar detalhadamente o processo de compactação realizado em campo no Brasil à luz dos estudos realizados na NCSU, avaliando a quantidade de passadas ótima, quais tipos de rolo são os ideais, qual a influência da compactação em cada uma das camadas em caso de TSDs e TSTs, entre outros aspectos.
- viii. Desenvolver um manual de defeitos específicos de tratamentos superficiais por penetração, caracterizando-os e explanando medidas preventivas e corretivas;
- ix. Aplicação de questionário desenvolvido no presente estudo, para criação de um banco de dados que contenha o estado de desenvolvimento da técnica e as práticas e métodos empregados no Brasil;
- x. Criação de um *checklist* de inspeção de TSPs adaptado aos processos realizados localmente, semelhante ao *checklist* utilizado pelo NCDOT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO – ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas.** 2ª edição. Rio de Janeiro, 2010.

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

_____. **NBR NM 248:2003 Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C127-07, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

_____. **ASTM C128-07, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

_____. **ASTM D7000 – 11, Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

BARROSO, S. H. A., SANT'ANA, W. C., ALBUQUERQUE, F. S., SOARES, J. B. **PC03 - Ensaio Acelerados em Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego - Relatório Final,** 2014. (Relatório interno de pesquisa).

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Petrobras / ABEDA. Rio de Janeiro, 2007.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Plano CNT de Transporte e Logística 2014.** Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/plano-cnt-transporte-logistica>>. Acesso em: 02 jun. 2015.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES, RODOVIAS E TRANSPORTES – DERT-CE. **ES-P 10/00 (2000). Tratamento Superficial Simples.** Especificações gerais para serviços e obras rodoviárias. Pavimentação. Fortaleza, Ceará.

_____. **ES-P 11/00 (2000). Tratamento Superficial Duplo.** Especificações gerais para serviços e obras rodoviárias. Pavimentação. Fortaleza, Ceará.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE RODOVIAS/ CEARÁ – DER-CE. **Informativo gerencial 2014.** Fortaleza, CE, 2014. Disponível em: <<http://portal.der.ce.gov.br/index.php/noticias/43689-ingo>>. Acesso em: 7 jul. 2015.

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

_____. **ES 392/99 (1999). Pavimentação – Tratamento superficial duplo com asfalto polímero.** Rio de Janeiro.

_____. **ES 393/99 (1999). Pavimentação – Tratamento superficial triplo com asfalto polímero.** Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 005/2003 - TER - Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia.** Rio de Janeiro.

_____. **DNIT 070/2006-PRO - Condicionantes ambientais das áreas de uso de obras: procedimento.** Rio de Janeiro.

_____. **Manual de Pavimentação.** Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT-ES 146/2012 (2012a). Pavimentação asfáltica – Tratamento superficial simples – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro.

_____. **DNIT-ES 147/2012 (2012b). Pavimentação asfáltica – Tratamento superficial duplo – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro.

_____. **DNIT-ES 148/2012 (2012c). Pavimentação asfáltica – Tratamento superficial triplo – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro.

_____. Sistema Nacional de Viação. **Plano Nacional de Viação 2014.** Disponível em: <<https://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 10 mai. 2015.

KIM, Y. R.; LEE, J. S. **Evaluation of Performance and Cost-Effectiveness of Polymer-Modified Chip Seals.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2150, Transportation Research Board of the National Academies.* Washington, D.C., 2010, p. 79–86.

_____. **Performance-Based Uniformity Coefficient of Chip Seal Aggregate.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2108, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009, p. 53–60.*

_____. **Quantifying the Benefits of Improved Rolling of Chip Seals. Final Report. To North Carolina Department of Transportation.** *North Carolina State University.* Raleigh, 2008a.

_____. **Understanding the Effects of Aggregate and Emulsion Application Rates on Performance of Asphalt Surface Treatments.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2044, Transportation Research Board of the National Academies.* Washington, D.C., 2008b, p. 71–78.

LARSEN, J. **Tratamento Superficial na Conservação e Construção de Rodovias**. Abeda. Rio de Janeiro, 1985.

LOIOLA, P. R. R.(2009); **Estudo de Agregados e Ligantes Alternativos para Emprego em Tratamentos Superficiais de Rodovias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza, 2009.

MELO, A. L. **Tratamentos Superficiais**. Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Recife, 1978.

MESQUITA JÚNIOR, G. S.; BARROSO, S. H. A. **Estudo do emprego de agregados da região nordeste em revestimentos delgados do tipo tratamento superficial**. Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza, 2013.

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

NORTH CAROLINA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **NCDOT Chip Seal Best Practices Manual**. Raleigh, 2015.

_____. **Standard Specifications for Roads and Structures**. *N.C. Department of Transportation Design Services Unit*. Raleigh, 2002.

PEREIRA, S. L. O. **Avaliação de Tratamentos Superficiais de Rodovias através de Análise de Laboratório**. Monografia. Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza, 2010.

_____. **Avaliação dos Tratamentos Superficiais simples, duplo e triplo de rodovias através do emprego de diferentes agregados da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza, 2013.

PINTO, S. **Tratamento Superficial Betuminoso**. Instituto Militar de Engenharia – IME/RJ. Rio de Janeiro, 2002.

ROCHA, F. L. L. da. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP. Ouro Preto, 2011.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA/ CE – SEINFRA-CE. **Tabela de custos desonerada**. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/tabela-de-custos-unificada-desonerada>>. Acesso em: 18 set. 2015.

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

VASCONCELOS, M. A. G. **Estudo Sobre o Emprego do Cape Seal em Revestimentos Rodoviários do Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2013.

ANEXO A – CHECKLIST PARA INSPEÇÃO DE *CHIP SEALS* (Traduzido de NCDOT, 2015)

1. O certificado de compatibilidade foi submetido para cada tipo de *chip seal*?
2. A superfície da via que receberá o *chip seal* foi devidamente preparada e limpa?
3. As condições climáticas, do ar e temperatura estão aceitáveis para a aplicação do *chip seal*?
4. As placas e equipamentos de controle de tráfego estão a postos e o carro auxiliar está pronto?
5. Os documentos fiscais de expedição (*bills of lading*) da emulsão asfáltica foram recebidos?
6. O caminhão basculante foi ajustado para essa obra?
7. É conhecida a taxa de ligante ideal a ser aplicada para cada tipo de *chip seal*?
8. Como o volume de emulsão será medido ou determinado?
9. A temperatura de aplicação da emulsão está entre 160-170°F ($\approx 70-77^{\circ}\text{C}$)?
10. O caminhão espargidor está liberando uma quantidade uniforme de emulsão?
11. O padrão de espalhamento da emulsão está livre de falhas ou de excesso de ligante?
12. O distribuidor de agregado foi calibrado para essa obra?
13. É conhecida a taxa de agregado a ser aplicada para cada tipo de *chip seal*?
14. O distribuidor de agregado foi calibrado totalmente na barra distribuidora?
15. O distribuidor está liberando uma quantidade uniforme de agregado?
16. O agregado está livre de sujeira, poeira e detritos?
17. As juntas centrais e as bordas da pista estão totalmente cobertas?
18. O excesso de agregado está sendo removido antes da aplicação de novas camadas?
19. Os compactadores pneumáticos e de tambor de aço estão operantes?
20. A compactação está finalizada no intervalo de 5 minutos após a aplicação da emulsão?
21. O tráfego está interrompido na zona de trabalho?
22. As vassouras mecânicas e demais tipos estão adequadas para uso?