



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

MÁRCIO ANDERSON GUEDES VASCONCELOS

**ESTUDO SOBRE O EMPREGO DO *CAPE SEAL* EM REVESTIMENTOS
RODOVIÁRIOS DO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA-CE

2013

MÁRCIO ANDERSON GUEDES VASCONCELOS

ESTUDO SOBRE O EMPREGO DO *CAPE SEAL* EM REVESTIMENTOS
RODOVIÁRIOS DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

FORTALEZA-CE

2013

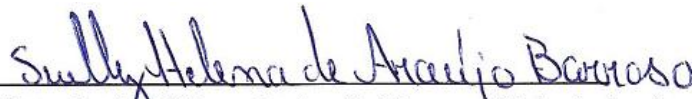
MÁRCIO ANDERSON GUEDES VASCONCELOS

ESTUDO SOBRE O EMPREGO DO *CAPE SEAL* EM REVESTIMENTOS
RODOVIÁRIOS DO ESTADO DO CEARÁ

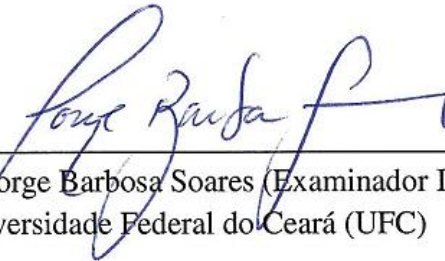
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovado em: 17/06/2013

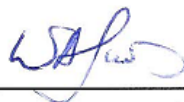
BANCA EXAMINADORA



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



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



Prof. Dr. Washington Peres Núñez (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Aos meus Pais, Mirtila e Evando
(in memoriam). Aos meus irmãos e familiares
pelo incentivo e apoio ao longo destes anos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre ter me dado a força e a coragem necessária para alcançar meus objetivos.

À minha orientadora Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso, pelo apoio, amizade e palavras de motivação ao longo de toda essa jornada que passamos juntos. Agradeço sinceramente as orientações e conselhos que tive a oportunidade de receber ao longo desses anos de trabalho, com certeza, lições que vou levar para toda minha vida.

À empresa Asfaltos Nordeste, Gerdau e a pedreira Pyla, pela disponibilidade quanto ao fornecimento dos materiais asfálticos, agregado siderúrgico e agregado mineral, respectivamente.

À Capes pelo apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus familiares que durante minha graduação e mestrado me ajudaram e incentivaram a realizar meus objetivos, grande parte dessas conquistas somente foi possível pela ajuda de vocês.

Aos professores Dr. Jorge Barbosa Soares e Dra. Verônica Castelo Branco pelas sugestões e materiais didáticos.

Aos demais Professores do PETRAN e funcionários do DET, pelos ensinamentos e amizade construída ao longo do mestrado.

Aos amigos e colegas de mestrado Synardo Leonardo e Pedro Castro pelo apoio e companheirismo durante a realização de todo o programa experimental.

Aos amigos André, Talita, Rômulo, Daniel e Michel, pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios.

Aos amigos e companheiros de mestrado, Isael, Jardel, Camila, Juceline, Lucimar, Amanda, Nelson, Junior, Eder, William, Rômulo, Iuri, Felipe, Renato, Lélío, Alessandra e Kélvia, pelas experiências compartilhadas ao longo desse período.

As pessoas que fizeram parte do grupo de solos do LMP e que durante os sete anos que participei deste grupo tive a oportunidade de conhecer e aprender com seus ensinamentos. Agradeço a todos que contribuíram na minha formação profissional e pessoal, em especial aos amigos Arielton, Nobre Rabêlo, Bruno, Paulo Loiola, Lílian, Boris, Gerlânia, João Henrique e Marcondes.

As pessoas que formam o grupo de solos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, em especial a nova geração de bolsistas, Ricardo, Wendy, Marília, Lucas e Gledson.

Aos demais colegas de trabalho e amigos do LMP que durante esse período tive a alegria de conviver e compartilhar essa nossa segunda casa.

A todos que direta ou indiretamente ajudaram na conclusão dessa pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os tratamentos de superfície se apresentam como um dos tipos de revestimentos asfálticos mais aplicados em pavimentos flexíveis nas rodovias brasileiras. Isso se deve a sua utilização na construção de rodovias de baixo e médio volume de tráfego, bem como na conservação e manutenção de pavimentos existentes. Dentre os tratamentos de superfície, destacam-se o Tratamento Superficial Simples (TSS) e Duplo (TSD), que juntos representam 63% da malha rodoviária pavimentada do estado do Ceará, e o Microrrevestimento Asfáltico (MRAF), cuja aplicação tem crescido ao longo dos anos. A junção do TSS e MRAF é conhecida como *Cape Seal* (CS) e tem como diferencial reunir características de ambos os tratamentos, entretanto, sem aplicação conhecida em rodovias cearenses. A dissertação tem como objetivo geral desenvolver um programa experimental que avalie o desempenho do CS em laboratório para um agregado mineral (AM) e um agregado siderúrgico (AS). Na metodologia desenvolvida no estudo, dividiu-se o programa laboratorial em quatro procedimentos experimentais que conduziram o desenvolvimento da pesquisa desde a caracterização dos materiais utilizados, moldagem e dosagem dos corpos de prova, até a realização dos ensaios de desempenho e avaliação dos pavimentos testados em um simulador de tráfego de laboratório. Os resultados da caracterização do AS atenderam com segurança aos parâmetros recomendados pelas especificações técnicas. Os corpos de prova confeccionados com agregado siderúrgico e submetidos ao simulador de tráfego apresentaram resultados melhores do que o agregado mineral quanto à avaliação ao desgaste, deformação e rugosidade, indicando assim a potencialidade do AS em tratamentos do tipo CS e TSD. Observou-se, diante do programa experimental executado, que o *cape seal* quando comparado ao TSD através de parâmetros técnicos e econômicos, apresentou uma melhor capacidade de absorção de cargas, maior qualidade de rolamento e menor desgaste. Entretanto, quanto ao aspecto de custos, a aplicação do CS deve ser analisada cuidadosamente diante da viabilidade do projeto. Acredita-se que o *cape seal* seja aconselhável para rodovias que necessitem de um revestimento de melhor qualidade quando comparado ao TSD.

Palavras-chave: Tratamento Superficial, Microrrevestimento Asfáltico, *Cape Seal*, Agregado Siderúrgico.

ABSTRACT

Surface treatment is one of the main bituminous wearing courses applied in flexible pavements in Brazil. This is due its use in roads with low to medium traffic volume, as well as in the conservation and preventive maintenance. Among the surface treatments, the Simple Surface Treatment (SST) and the Double Surface Treatment (DST) represent together 63% of the state roads in Ceará. Microsurfacing has increased its application in the last years. The composition of a SST as a first layer and a microsurfacing as a second one is known as Cape Seal (CS), and it has as an advantage the combination of the characteristics of these two techniques. However, there is still no application of Cape Seal in Ceará. The main objective of this research is to develop a laboratory procedure to evaluate the cape seal performance when using steel slag or mineral aggregates. The laboratory procedure developed was separated in four different procedures that began with the characterization of the materials, mix design, performance test using the Wet Track Abrasion Test, and a lab traffic simulator. The characterization results of steel slag attend the safety parameters recommended by technical specifications. The steel slag's specimens were analyzed with the lab traffic simulator and showed better results when compared to the mineral aggregate considering surface deterioration, rutting and roughness. The results indicated the applicability of steel slag in both CS and DST. The laboratory procedure results indicated that cape seal, when compared to double surface treatment with respect to technical and economic parameters, showed a better capacity to absorb loads and presented lower deterioration. However, the cape seal's application should be carefully considered in the project's feasibility. The results showed that cape seal is recommended to roads that require a better quality wearing course, when compared to double surface treatment.

Keywords: Surface Treatment, Microsurfacing, Cape Seal, Steel slag.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Ilustração de diferentes perfis de pavimentos.....	10
Figura 2.2 - Comparação da malha rodoviária pavimentada e não pavimentada no Brasil	10
Figura 2.3 - Revestimentos do tipo tratamentos de superfície	15
Figura 2.4 - Ilustração dos diferentes tipos de tratamento superficial.....	17
Figura 2.5 - Ilustração do método da bandeja para determinação da taxa de agregado	24
Figura 2.6 - Etapas construtivas de um TSS.....	31
Figura 2.7 - Revestimento do tipo TSD.....	31
Figura 2.8 - Aplicação de MRAF em rodovias do Nordeste	33
Figura 2.9 - Aplicação de MRAF em trilhas de roda	35
Figura 2.10 - Materiais constituintes do MRAF.....	37
Figura 2.11 - Faixas granulométricas do DNIT para MRAF	40
Figura 2.12 - Aspecto visual de trecho de MRAF (faixas I e II do DNIT)	41
Figura 2.13 - Componentes da mistura de MRAF e cuidados a serem observados	43
Figura 2.14 - Procedimentos para a preparação da superfície a ser aplicada o MRAF.....	48
Figura 2.15 - Usina móvel de MRAF.....	48
Figura 2.16 - Etapas de aplicação do MRAF em campo	50
Figura 2.17 - Revestimento <i>cape seal</i>	51
Figura 2.18 - Esquema ilustrativo do ensaio de permeabilidade.....	56
Figura 2.19 - Esquema ilustrativo do ensaio de cisalhamento	57
Figura 2.20 - Localização do trecho experimental executado na RST/101.....	58
Figura 2.21 - Esquema ilustrativo do trecho experimental executado na RST/101	60
Figura 2.22 - Etapas de execução do trecho experimental executado na RST/101.....	61
Figura 2.23 - Aspecto visual do trecho experimental da RST/101 após 10 anos de tráfego....	62
Figura 2.24 - Aplicação do <i>cape seal</i> na Rodovia Presidente Castelo Branco (SP280).....	63
Figura 2.25 - Aplicação de MRAF sobre TSD no interior da Paraíba	64
Figura 2.26 - Esquema ilustrativo de execução do <i>cape seal</i>	67
Figura 2.27 - Técnicas construtivas do <i>cape seal</i>	68
Figura 2.28 - Principais aplicações do agregado siderúrgico em 2011	70
Figura 2.29 - Fornos utilizados no beneficiamento do aço.....	71
Figura 2.30 - Processo simplificado de produção do aço	72
Figura 2.31 - Exemplo de AS produzido em forno elétrico (EAF) e a oxigênio (LD).....	73
Figura 3.1 - Ilustração do programa experimental da pesquisa.....	80
Figura 3.2 - Localização da pedreira no município de Caucaia.	81
Figura 3.3 - Aspecto visual dos agregados minerais utilizados na pesquisa	81
Figura 3.4 - Etapas de produção do agregado mineral empregados na pesquisa	82
Figura 3.5 - Localização do município de Maracanaú na RMF	83
Figura 3.6 - Agregado siderúrgico utilizado na pesquisa	83
Figura 3.7 - Tanques de armazenamento e coleta das emulsões asfálticas	84
Figura 3.8 - Materiais estudados no primeiro procedimento experimental.....	85
Figura 3.9 - Ensaio de granulometria	86

Figura 3.10 - Ensaio de índice de forma.....	87
Figura 3.11- Equipamento de abrasão Los Angeles	87
Figura 3.12 - Imersão dos agregados para os ensaios de absorção e densidade.....	87
Figura 3.13 - Ensaio de densidade do agregado miúdo	88
Figura 3.14 - Ensaio de equivalente de areia.....	88
Figura 3.15 - Resultado do ensaio de azul de metileno	89
Figura 3.16 - Ensaio de durabilidade.....	89
Figura 3.17 - Ensaio de adesividade ao ligante betuminoso.....	89
Figura 3.18 - Ensaio de expansão do agregado siderúrgico	91
Figura 3.19 - Ilustração do segundo procedimento experimental	93
Figura 3.20 - Determinação da taxa de agregado pelo método da bandeja.....	94
Figura 3.21 - Compactação das mantas de TSP segundo Loiola (2009) e Pereira (2010)	96
Figura 3.22 - Moldagem de uma manta de TSD	97
Figura 3.23 - Modelo de distribuição dos agregados	98
Figura 3.24 - Carrinho distribuidor dos agregados e simulação da aplicação da taxa	99
Figura 3.25 - Moldagem de corpo de prova de MRAF para o ensaio de WTAT.....	102
Figura 3.26 - Moldagem de corpo de prova de LWT	103
Figura 3.27 - Moldagem de corpo de prova para realização do ensaio de coesão	103
Figura 3.28 - Exemplo de definição de teor ótimo de emulsão	105
Figura 3.29 - Etapas de execução do ensaio de WTAT.....	106
Figura 3.30 - Etapas de execução do ensaio de LWT	107
Figura 3.31 - Corpos de prova após o ensaio de tempo mínimo de misturação.....	107
Figura 3.32 - Ilustração do terceiro procedimento experimental.....	109
Figura 3.33 - Etapas de execução do ensaio de WTAT adaptado para TSD.....	111
Figura 3.34 - Etapas de execução do ensaio de coesão	112
Figura 3.35 - Etapas de execução do ensaio de adesividade	113
Figura 3.36 - Ilustração esquemática do quarto procedimento experimental.....	114
Figura 3.37 - Etapas de moldagem das placas de solo-brita.....	115
Figura 3.38 - Etapas desenvolvidas na moldagem do revestimento TSD	118
Figura 3.39 - Placas de TSD de agregado mineral submetidas ao simulador de tráfego	119
Figura 3.40 - Execução do ensaio de mancha de areia.....	120
Figura 3.41 - Ensaio de pêndulo britânico realizado nas placas de TSD	121
Figura 3.42 - Etapas desenvolvidas nas placas de TSD	122
Figura 3.43 - Etapas desenvolvidas na moldagem do revestimento <i>cape seal</i>	124
Figura 3.44 - Placa de <i>cape seal</i> de agregado mineral submetidas ao simulador de tráfego ..	125
Figura 3.45 - Etapas desenvolvidas nas placas de <i>cape seal</i>	126
Figura 4.1 - Curva granulométrica da brita ¾”.....	129
Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita 3/8”	130
Figura 4.3 - Curva granulométrica do Pó de pedra.....	130
Figura 4.4 - Curva granulométrica do agregado siderúrgico (AS).....	131
Figura 4.5 - Resultado do azul de metileno para o pó de pedra e AS.....	135
Figura 4.6 - Ensaio de adesividade da brita ¾” e do AS	136
Figura 4.7 - Curva de compactação do AS para o ensaio de expansão	138

Figura 4.8 - Evolução da expansão ao longo do ensaio.....	139
Figura 4.9 - Curva granulométrica de projeto do MRAF	144
Figura 4.10 - Definição do teor de projeto do MRAF-AM	146
Figura 4.11- Definição do teor de projeto do MRAF-AS	147
Figura 4.12 - Taxas de emulsão RR-2C aplicadas no TSD-AM e TSD-AS	152
Figura 4.13 - Taxas de agregados aplicadas no TSD-AM e TSD-AS.....	153
Figura 4.14 - Desgastes médios dos TSD-AS e TSD-AM	154
Figura 4.15 - Torque obtido nas amostras de MRAF-AM e MRAF-AS.....	158
Figura 4.16 - Aspecto visual das misturas após a realização do ensaio de adesividade.....	159
Figura 4.17 - Curva granulométrica dos agregados constituintes da camada de base das placas	160
Figura 4.18 - Ensaio de densidade <i>in situ</i>	161
Figura 4.19 - Aspecto visual da textura do TSD-AM antes do ensaio do simulador	162
Figura 4.20 - Evolução do desgaste das placas de TSD-AM pelo simulador de tráfego	163
Figura 4.21 - Massa de agregado desprendida da placa de TSD-AM em percentual.....	164
Figura 4.22 - Varredura e formação de trilha de roda no TSD-AM.....	164
Figura 4.23 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de TSD-AM	165
Figura 4.24 - Ensaio de mancha de areia nas placas de TSD-AM	166
Figura 4.25 - Aspecto visual da textura do TSD-AS antes do ensaio do simulador	167
Figura 4.26 - Evolução do desgaste das placas de TSD-AS pelo simulador de tráfego.....	167
Figura 4.27 - Massa de agregado desprendida da placa de TSD-AS em percentagem	168
Figura 4.28 - Acompanhamento da evolução da trilha de roda do TSD-AS.....	169
Figura 4.29 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de TSD-AS.....	169
Figura 4.30 - Ensaio de mancha de areia nas placas de TSD-AS.....	170
Figura 4.31 - Evolução da desagregação das placas de TSD-AS e TSD-AM em percentagem	171
Figura 4.32 - Aspecto visual das placas de TSD-AM e TSD-AS após o simulador de tráfego	171
Figura 4.33 - Avaliação visual da deformação após o simulador de tráfego.....	172
Figura 4.34 - Evolução da deformação nas placas de CAPE SEAL-AM.....	174
Figura 4.35 - Evolução da deformação permanente nas placas de CAPE SEAL-AM.....	174
Figura 4.36 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de CAPE SEAL-AM.....	175
Figura 4.37 - Ensaio de mancha de areia nas placas de CAPE SEAL-AM.....	176
Figura 4.38 - Evolução da deformação nas placas de CAPESEAL-AS.....	177
Figura 4.39 - Evolução da deformação permanente nas placas de CAPESEAL-AS	177
Figura 4.40 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de CAPE SEAL-AS.....	178
Figura 4.41 - Ensaio de mancha de areia nas placas de CAPE SEAL-AS.....	178
Figura 4.42 - Evolução da deformação permanente nas placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS.....	179
Figura 4.43 - Aspecto visual das placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS	180
Figura 4.44 - Aspecto visual das placas de TSD-AM e CAPE SEAL-AM.....	183
Figura 4.45 - Aspecto visual das placas de TSD-AS e CAPE SEAL-AS	185
Figura 4.46 - Comparativo de custos dos revestimentos moldados com AM e AS	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais funções e aplicações do tratamento superficial por penetração	18
Tabela 2.2 - Regras práticas para a determinação dos diâmetros máximos dos agregados	20
Tabela 2.3 - Granulometrias especificadas pelo DNIT para o TSS, TSD e TST	21
Tabela 2.4 - Classe granulométrica para o TSS.....	21
Tabela 2.5 - Classe granulométrica para o TSD	21
Tabela 2.6 - Taxas de EAC ou CAP para o TSS em função da classe granulométrica.....	28
Tabela 2.7 - Taxas do CAP em função da classe granulométrica	28
Tabela 2.8 - Taxas das emulsões asfálticas em função da classe granulométrica	29
Tabela 2.9 - Taxas de aplicação segundo o DNIT.....	29
Tabela 2.10 - Consumo teórico de materiais no TSS, TSD e TST.....	30
Tabela 2.11 - Principais diferenças entre as técnicas de lama asfáltica e MRAF	36
Tabela 2.12 - Faixas granulométricas para MRAF conforme DNIT, ISSA, ABNT e DER/CE	39
Tabela 2.13 - Consumo teórico de materiais para o MRAF.....	43
Tabela 2.14 - Ensaio de compatibilidade e dosagem de MRAF.....	45
Tabela 2.15 - Parâmetros a serem observados na dosagem do MRAF	46
Tabela 2.16 - Taxas de aplicação típicas de MRAF	49
Tabela 2.17 - Vantagens da técnica do <i>cape seal</i>	53
Tabela 2.18 - Estrutura do trecho executado na RST/101	59
Tabela 2.19 - Consumo teórico de materiais do <i>cape seal</i>	66
Tabela 3.1 - Ensaio de caracterização do AM (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra).....	86
Tabela 3.2 - Ensaio de caracterização do agregado siderúrgico	90
Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização das emulsões asfálticas (RR-2C e RC1C-E)	92
Tabela 3.4 - Classes de macrotextura	120
Tabela 3.5 - Classes de microtextura.....	121
Tabela 4.1 - Resultados do índice de forma dos agregados.....	132
Tabela 4.2 - Resultado de abrasão dos agregados	133
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de absorção e densidade dos agregados.....	134
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de durabilidade para os diferentes agregados	136
Tabela 4.5 - Resultados de caracterização da emulsão asfáltica RR2C	140
Tabela 4.6 - Resultados de caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E.....	140
Tabela 4.7 - Resultados obtidos na dosagem do TSD-AM e TSD-AS.....	142
Tabela 4.8 - Composição granulométrica dos agregados utilizados no MRAF	143
Tabela 4.9 - Resultados do ensaio do WTAT e LWT para o MRAF-AM	145
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de WTAT e LWT para o MRAF-AS.....	146
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de WTAT para o TSD-AM.....	149
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio do WTAT para o TSD-AS.....	151
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio do WTAT para as misturas MRAF-AM e MRAF-AS ..	156
Tabela 4.14 - Modelos de avaliação do MR.....	161
Tabela 4.15 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de TSD-AM e TSD-AS	172

Tabela 4.16 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS	181
Tabela 4.17 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de TSD-AM e CAPESEAL-AM	182
Tabela 4.18 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de TSD-AS e CAPE SEAL-AS.....	184
Tabela 4.19 - Comparativo de custos do TSD e <i>cape seal</i> para os diferentes agregados.....	187

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AS	Agregado Siderúrgico
AST	<i>Asphalt Surface Treatment</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOF	<i>Blast Oxygen Furnace</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CS	<i>Cape Seal</i>
DAER/RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
DER	Departamento de Edificações e Rodovias
DER/CE	Departamento de Edificações e Rodovias do Estado do Ceará
DETR	Departamento de Edificações Rodovias e Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNIT-ES	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Especificações de Serviço
DNIT-ME	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Método de Ensaio
EAC	Emulsão Asfáltica Catiônica
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EVA	Etileno e acetato de vinila
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HMAC	<i>Hot Mix Asphalt Concrete</i>
IABr	Instituto Aço Brasil
ISSA	<i>International Slurry Surfacing Association</i>
LA	Lama Asfáltica
LA-1	Emulsão Aniônica para Lama Asfáltica
LA-1C	Emulsão Asfáltica Catiônica para Lama Asfáltica
LA-2	Emulsão Aniônica para Lama Asfáltica
LA-2C	Emulsão Asfáltica Catiônica para Lama Asfáltica
LD	Linz e Donawitz
LWT	<i>Loaded Wheel Test</i>
MB	Macadame Betuminoso
MCT	Determination of Set and Cure Characteristics by Cohesion Tester
MRAF	Microrrevestimento Asfáltico a Frio
NBR	Norma Brasileira
NCDOT	<i>North Carolina Department of Transportation</i>
OH	<i>Open Heart</i>
RBVT	Rodovia de Baixo Volume de Tráfego
RC1C-E	Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Controlada Modificada por Polímeros Elastoméricos
RR-1C	Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida - 1C
RR-2C	Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida - 2C
SBR	Látex de Estireno-Butadieno
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
TAP	Tratamento Antipó
TS	Tratamento de Superfície
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSP	Tratamento Superficial por Penetração
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
TxDOT	<i>Texas Department of Transportation</i>

VDM	Volume Diário Médio
WST	<i>Wet Stripping Test</i>
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	4
1.3	QUESTÕES DE PESQUISA	4
1.3.1	<i>Questão principal</i>	4
1.3.2	<i>Questões pertinentes</i>	4
1.4	JUSTIFICATIVA.....	5
1.5	OBJETIVOS.....	6
1.5.1	<i>Objetivo geral</i>	6
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i>	6
1.6	ETAPAS DA PESQUISA	7
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
2.2	CONCEITUAÇÃO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO	8
2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A MALHA RODOVIÁRIA NACIONAL E ALGUNS CONCEITOS SOBRE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO E PAVIMENTO DE BAIXO CUSTO	10
2.4	DEFINIÇÃO SOBRE TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE × TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	13
2.4.1	<i>Tratamento superficial por penetração (TSP)</i>	16
2.4.1.1	<i>Classificação e aplicações do TSP</i>	16
2.4.1.2	<i>Materiais empregados no TSP</i>	18
2.4.1.3	<i>Projeto de dosagem do tratamento superficial</i>	23
2.4.1.4	<i>Etapas construtivas de um TSP</i>	30
2.4.2	<i>Microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF)</i>	32
2.4.2.1	<i>Conceituação, funções e aplicações do MRAF</i>	33
2.4.2.2	<i>Materiais empregados no MRAF</i>	36
2.4.2.3	<i>Projeto e dosagem do MRAF</i>	44
2.4.2.4	<i>Etapas construtivas do MRAF</i>	46
2.4.3	<i>Cape Seal (CS)</i>	51
2.4.3.1	<i>Conceituação e aplicações do cape seal</i>	51
2.4.3.2	<i>Considerações sobre o emprego do cape seal no cenário internacional</i>	53
2.4.3.3	<i>Considerações sobre o emprego do cape seal no Brasil</i>	58
2.4.3.4	<i>Materiais e procedimentos de dosagem do cape seal</i>	64
2.4.3.5	<i>Etapas construtivas do cape seal</i>	66
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O AGREGADO SIDERÚRGICO E SUA APLICAÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO.....	69
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
3	MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	79
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	81
3.2.1	<i>Agregado mineral (AM)</i>	81
3.2.2	<i>Agregado siderúrgico (AS)</i>	82
3.2.3	<i>Emulsão asfáltica</i>	83
3.2.4	<i>Aditivo químico</i>	84
3.2.5	<i>Cimento portland</i>	84
3.3	PRIMEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - COLETA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA	85
3.3.1	<i>Ensaios realizados no agregado mineral (AM)</i>	85

3.3.2	<i>Ensaio realizado no agregado siderúrgico (AS)</i>	90
3.3.3	<i>Ensaio realizado nas emulsões asfálticas</i>	91
3.4	SEGUNDO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - DOSAGEM E FABRICAÇÃO EM LABORATÓRIO DE CORPOS DE PROVA DE TSD E MRAF	92
3.4.1	<i>Confecção dos corpos de prova de TSD com agregados mineral e siderúrgico</i>	93
3.4.1.1	<i>Dosagem dos corpos de prova de TSD</i>	93
3.4.1.2	<i>Moldagem dos corpos de prova de TSD</i>	94
3.4.2	<i>Confecção dos corpos de prova de MRAF com agregados mineral e siderúrgico</i>	100
3.4.2.1	<i>Moldagem dos corpos de prova de MRAF</i>	100
3.4.2.2	<i>Dosagem dos corpos de prova de MRAF e ensaios de compatibilidade</i>	104
3.5	TERCEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CORPOS DE PROVA DE TSD E MRAF EM LABORATÓRIO	108
3.5.1	<i>Análise de desempenho dos corpos de prova de TSD com agregado mineral e agregado siderúrgico</i>	109
3.5.2	<i>Análise do desempenho dos corpos de prova de MRAF com agregado mineral e agregado siderúrgico</i>	111
3.6	QUARTO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO TSD E CAPE SEAL SUBMETIDO AO SIMULADOR DE TRÁFEGO	113
3.6.1	<i>Análise de desempenho do revestimento TSD em simuladores de tráfego de laboratório</i>	114
3.6.1.1	<i>Moldagem das placas de TSD com agregados mineral e siderúrgico</i>	114
3.6.1.2	<i>Avaliação das Placas de TSD em Simulador de Tráfego</i>	118
3.6.2	<i>Análise de desempenho do revestimento cape seal em simuladores de tráfego</i>	123
3.6.2.1	<i>Moldagem das placas de cape seal com agregado mineral e siderúrgico</i>	123
3.6.2.2	<i>Avaliação das placas de cape seal em simulador de tráfego</i>	125
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	128
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	128
4.2	RESULTADOS DO PRIMEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	128
4.2.1	<i>Resultados dos ensaios realizados nos agregados</i>	128
4.2.1.1	<i>Ensaio de granulometria</i>	128
4.2.1.2	<i>Índice de forma</i>	131
4.2.1.3	<i>Abrasão Los Angeles</i>	132
4.2.1.4	<i>Ensaio de absorção e densidade</i>	133
4.2.1.5	<i>Equivalente de areia</i>	134
4.2.1.6	<i>Azul de Metileno</i>	134
4.2.1.7	<i>Ensaio de durabilidade</i>	135
4.2.1.8	<i>Ensaio de adesividade a ligante betuminoso</i>	136
4.2.1.9	<i>Expansão do AS</i>	137
4.2.1.10	<i>Ensaio de lixiviação e solubilização</i>	139
4.2.2	<i>Resultados dos ensaios realizados nas emulsões asfálticas (RR-2C e RRIC-E)</i>	140
4.3	RESULTADOS DO SEGUNDO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	141
4.3.1	<i>Resultados da dosagem dos corpos de prova de TSD com agregados mineral e siderúrgico (TSD-AM) e (TSD-AS)</i>	141
4.3.2	<i>Resultados da dosagem dos corpos de prova de MRAF com agregados mineral e siderúrgico (MRAF-AM) e (MRAF-AS)</i>	143
4.3.2.1	<i>Determinação do teor de aditivo</i>	144
4.3.2.2	<i>Determinação do teor de ligante de projeto</i>	145
4.4	RESULTADOS DO TERCEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	148
4.4.1	<i>Resultados gerais da análise de desempenho do TSD-AM e TSD-AS submetidos ao WTAT</i>	148
4.4.1.1	<i>Análise das taxas de ligante</i>	152
4.4.1.2	<i>Análise das taxas de agregado</i>	152

4.4.1.3	<i>Análise dos desgastes</i>	154
4.4.2	Resultados da análise de desempenho do MRAF-AM e MRAF-AS	155
4.4.2.1	<i>Resultados dos ensaios de MRAF-AM e MRAF-AS submetidos ao WTAT</i>	156
4.4.2.2	<i>Resultados do ensaio de coesão da mistura MRAF-AM e MRAF-AS</i>	157
4.4.2.3	<i>Verificação da compatibilidade agregado-emulsão das misturas (WST)</i>	159
4.5	RESULTADOS DO QUARTO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	159
4.5.1	Caracterização dos materiais utilizados na base das placas submetidas ao simulador de tráfego 160	
4.5.2	Avaliação das placas de TSD-AM e TSD-AS submetidas ao simulador de tráfego	162
4.5.2.1	<i>Resultados das placas de TSD-AM</i>	162
4.5.2.2	<i>Resultados das placas de TSD-AS</i>	166
4.5.2.3	<i>Resumo comparativo dos resultados do TSD-AM e do TSD-AS no simulador de laboratório</i>	170
4.5.3	Avaliação das placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS submetidas ao simulador de tráfego 173	
4.5.3.1	<i>Resultados das placas de CAPE SEAL-AM</i>	173
4.5.3.2	<i>Resultados das placas de CAPE SEAL-AS</i>	176
4.5.3.3	<i>Resumo comparativo dos resultados do CAPE SEAL-AM e do CAPE SEAL-AS</i>	179
4.5.4	Avaliação comparativa dos revestimentos TSD-AM e CAPE SEAL-AM	181
4.5.5	Avaliação comparativa dos revestimentos TSD-AS e CAPE SEAL-AS	183
4.6	LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DE APLICAÇÃO DO TSD E CAPE SEAL PARA O AGREGADO MINERAL E SIDERÚRGICO	185
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	190
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	191
5.1	RESUMO DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES DA PESQUISA	191
5.2	DETALHAMENTO DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES E/OU CONSTATAÇÕES	192
5.2.1	<i>Quanto aos ensaios de caracterização dos agregados - Primeiro procedimento experimental</i> ..	192
5.2.2	<i>Quanto ao processo de dosagem do TSD e MRAF em laboratório - Segundo procedimento</i> <i>experimental</i>	193
5.2.3	<i>Quanto à avaliação do TSD e MRAF submetidos aos ensaios de desempenho - Terceiro</i> <i>procedimento experimental</i>	194
5.2.4	<i>Quanto ao uso do simulador de laboratório na avaliação das placas de TSD e cape seal - Quarto</i> <i>procedimento experimental</i>	196
5.2.5	<i>Quanto à viabilidade econômica e técnica do TSD e cape seal</i>	199
5.3	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS PESQUISAS	200
	REFERÊNCIAS	202

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O Brasil é conhecido por ser um país de dimensões continentais. Esse aspecto no âmbito dos transportes acarreta em uma crescente necessidade de investimentos na área rodoviária. O sistema de transporte de um país ou região é responsável, dentre outros fatores, pelo desenvolvimento econômico, no entanto, para que este desenvolvimento aconteça de forma competitiva, é necessária a oferta de uma infraestrutura de transportes de qualidade.

O modal rodoviário apresenta-se atualmente como o de maior destaque dentre os modais que formam a cadeia de transportes brasileira. Isso se deve às políticas públicas desenvolvidas ao longo dos anos. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT) estudos mostram que no Brasil o modal rodoviário representa em torno de 96% da matriz de passageiros e 61% da matriz de transporte de cargas. Esse percentual retrata a importância do setor rodoviário com relação aos demais modais. Importância essa que vai além do aspecto econômico, pois as rodovias são fundamentais para o deslocamento de passageiros, acesso aos serviços básicos de educação e saúde, bem como para integração entre diferentes regiões (CNT, 2012).

Em contrapartida à importância do modal rodoviário, constata-se que no Brasil grande parte da malha rodoviária ainda não é pavimentada. Segundo DNIT (2012), o Brasil apresenta uma malha rodoviária pavimentada de 13,5%. Não distante dessa realidade, o estado do Ceará tem 84,0% de sua malha viária composta de rodovias não pavimentadas. Dessa forma, percebe-se uma carência de rodovias pavimentadas, tanto em nível nacional como estadual, acarretando menor eficiência das atividades de transporte de cargas e passageiros.

Quanto ao percentual de rodovias pavimentadas, a Pesquisa CNT de Rodovias (2012) concluiu, em uma análise evolutiva dos dados (quando comparado ao ano de 2011), uma redução nas rodovias consideradas satisfatórias e um ligeiro aumento daquelas classificadas como críticas e em condições regulares. A pesquisa visou avaliar o estado das rodovias brasileiras pavimentadas identificando as condições do pavimento, sinalização e geometria da via, dentro de uma metodologia e classificação própria, denominada estado geral das rodovias pesquisadas.

A pesquisa retrata que no ano de 2012 observou-se que 9,9% das rodovias avaliadas foram classificadas como ótimas; 27,4% como boas; 33,4% com condições

regulares; 20,3% ruins e 9,0% como péssimas. Os dados da pesquisa com relação ao estado do Ceará mostram que 4,9% das rodovias foram classificadas como ótimas; 24,7% boas; 38,2% regulares; 23,9% como ruins e 8,3% péssimas.

A metodologia adotada na pesquisa CNT apresenta limitações quanto à abrangência da pesquisa e aspectos estudados, no entanto, devido a grande dificuldade em analisar toda a malha rodoviária brasileira, os resultados observados podem ser considerados indicativos válidos da situação das rodovias.

Diante desses resultados, o mesmo relatório ainda ressalta que são precisos esforços contínuos para a execução de programas de manutenção e conservação do sistema viário, tendo tais medidas impactos diretos na redução dos custos logísticos e diminuição de acidentes.

Logo, observa-se que na concepção dos pavimentos asfálticos, onde a estrutura do mesmo é constituída de diversas camadas, caberia à camada de revestimento (por receber a carga dos veículos, sofrer efeito direto da ação do clima e ser a camada de rolamento) parte da responsabilidade sobre os impactos logísticos e da segurança viária, reforçando a importância dessa na estrutura do pavimento.

O revestimento asfáltico geralmente é a camada de custo mais elevado de um pavimento e requer maior racionalização do projeto e da escolha dos materiais. A determinação quanto ao tipo de revestimento asfáltico a ser empregado em uma rodovia é função de critérios técnicos, econômicos, financeiros e também ambientais. Assim, conciliar técnicas que associem simplicidade de aplicação, aliado a boas condições de desempenho, como os Tratamentos de Superfície (TS), são alternativas potenciais para melhorar ou manter o patrimônio rodoviário brasileiro.

Segundo a ABEDA (2010), os Tratamentos de Superfície (TSs) cobrem uma ampla variedade de serviços rodoviários em que, geralmente, o ligante asfáltico e os materiais pétreos são aplicados em espessuras inferiores a 25mm. Os revestimentos asfálticos constituintes do grupo dos tratamentos de superfície têm ampla utilização em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT), onde o trânsito de veículos pesado é reduzido, podendo ser usado também como solução corretiva ou na manutenção de rodovias de alto volume de tráfego.

A utilização desses tipos de revestimentos esbeltos é feita essencialmente sobre bases granulares ou revestimentos sem comprometimento estrutural, já que os TSs não têm função estrutural. Destaca-se no grupo dos tratamentos de superfície aqueles executados a frio no local, tendo em vista, principalmente, a economia de energia e simplicidade de aplicação.

As principais formas de aplicação dos TSs se dão através do emprego de camadas alternadas de emulsões asfálticas e agregados, podendo-se citar o caso dos revestimentos do tipo tratamento superficial por penetração e tratamento antipoeira ou antipó. Outra forma de aplicação são as misturas previamente dosadas em laboratório e posteriormente aplicadas através de usinas móveis próprias, como o caso da Lama Asfáltica, do Microrrevestimento Asfáltico (MRAF) e do *Cape Seal* (CS).

Segundo o DERT (2006) o tratamento superficial por penetração (TSP) é um dos tipos de revestimentos asfálticos mais econômicos e amplamente utilizados no estado do Ceará, abrangendo aproximadamente 63% de toda a sua malha pavimentada. Consiste basicamente do espalhamento sucessivo de emulsão asfáltica e material granular, sem mistura prévia, e com posterior compactação, de forma a promover a melhor ligação entre agregados e ligantes.

De acordo com o número de camadas de ligantes e agregados o tratamento é denominado simples (TSS), duplo (TSD) ou triplo (TST). Dos 63% de rodovias cearenses pavimentadas com TSP, o revestimento do tipo TSS corresponde a um valor de 9%, enquanto o TSD representa os restantes 54% dos revestimentos em tratamento superficial. Observa-se assim, uma carência na adoção de soluções alternativas viáveis quanto a outros tipos de revestimentos do tipo superficiais.

Uma técnica complementar ao TSS é o *cape seal*, consistindo basicamente na aplicação de TSS e uma camada superior de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), de forma a melhorar a qualidade de rolamento e reunir as propriedades desejáveis de ambos os revestimentos. O MRAF consiste de uma mistura de emulsão modificada por polímeros, agregado mineral, material de enchimento ou fíler, água e, se necessário, aditivo químico e fibras de reforço.

No estado do Ceará, a utilização de revestimentos pertencentes ao grupo dos tratamentos de superfície tem se consagrado ao longo dos anos. Isso se deve à capacidade desse tipo de revestimento de se adequar técnica e economicamente às condições de tráfego solicitadas e principalmente às políticas desenvolvidas no estado quanto aos investimentos no setor de infraestrutura.

Aliado a isso, outro ponto muitas vezes ignorado e que tem tomado cada vez mais destaque nas obras rodoviárias, tanto em nível nacional como local, é a utilização de materiais alternativos. Essa tendência está relacionada a uma concepção atual da construção de uma engenharia mais sustentável, que ao longo dos anos vem trazendo inovações no âmbito da infraestrutura viária.

Dessa forma, pesquisas envolvendo a utilização de materiais não tradicionais, como o Agregado Siderúrgico (AS) em substituição ao agregado mineral (AM), dentre outros materiais, tem sido estudado no meio acadêmico e por empresas, visando à sua aplicação na área de pavimentação. Estudos realizados como os de Castelo Branco (2004), Loiola (2009), Pereira (2010) e Rocha (2011), vêm comprovando a aplicabilidade do AS em camadas de revestimentos asfálticos, seja em misturas asfálticas ou em tratamentos superficiais por penetração.

1.2 Problema de pesquisa

Acredita-se que a preferência pelo emprego de revestimentos do tipo TSS e TSD nas rodovias do estado do Ceará ocorra pela falta de disseminação e prática de outras alternativas que poderiam ser competitivas economicamente e tecnicamente. A disponibilidade e conhecimento de várias alternativas pertencentes à família dos tratamentos superficiais podem ajudar os técnicos na tomada da melhor decisão em função dos recursos disponíveis para a pavimentação e/ou manutenção de estradas locais.

No âmbito do grupo dos tratamentos de superfície, soluções alternativas como o *cape seal* podem ser melhor investigadas, tendo em vista apresentarem características semelhantes e alguns estudos indicarem bons resultados para esse tipo de revestimento quando comparado ao TSD.

Assim, o problema motivador da presente pesquisa advém da carência de estudos técnicos e científicos no Brasil acerca da melhor aplicação do *cape seal* na área rodoviária, aliado à falta de familiaridade dos engenheiros rodoviários locais com esta técnica.

1.3 Questões de pesquisa

1.3.1 Questão principal

- a) Como avaliar a técnica do *cape seal* em laboratório para diferentes agregados do estado do Ceará?

1.3.2 Questões pertinentes

- b) Qual o estado da arte da aplicação do *cape seal* no Brasil e no mundo?

- c) Quais os procedimentos para dosagem e avaliação do *cape seal* em laboratório e no campo?
- d) Quais ensaios podem ser empregados na avaliação do comportamento do *cape seal*?
- e) O agregado siderúrgico pode ser utilizado na técnica do *cape seal*?
- f) Em quais situações a técnica do *cape seal* é competitiva com o TSD quanto às condições de tráfego das rodovias cearenses?

1.4 Justificativa

O estado da arte relativo aos tipos de revestimentos asfálticos tradicionalmente adotados no estado do Ceará apresenta o tratamento superficial por penetração como a técnica mais empregada nas rodovias cearenses. Através de conversas com engenheiros rodoviários e estudiosos na área de pavimentação, verifica-se, de maneira geral, certa restrição ao uso de diferentes técnicas construtivas, como o MRAF e o *cape seal*, devido à familiaridade e experiência já consolidada na região no uso dos tratamentos do tipo TSS e TSD.

Técnicas tradicionais, como o TSS e TSD, muitas vezes se apresentam como as mais adequadas a serem utilizadas no estado do Ceará. No entanto, alternativas poderiam ser melhor avaliadas, sendo muitas vezes descartadas pela falta de familiaridade dos engenheiros. Pode-se citar também que a inexperiência ou mesmo a ausência de estudos técnicos e/ou científicos podem representar um entrave na tomada da decisão mais adequada.

Constata-se a necessidade de uma maior investigação de soluções alternativas que são muitas vezes aplicadas sem um correto estudo prévio e a devida otimização dos materiais envolvidos. De acordo com engenheiros rodoviários, alguns trechos consistindo da superposição de camadas de TSS e MRAF já foram construídos na região Nordeste. Entretanto, os mesmos foram realizados sem o controle metodológico adequado que avaliasse o desempenho do revestimento, constatando-se na presente pesquisa a ausência de registros que avaliem se a aplicação da técnica foi mal ou bem sucedida.

Estudos internacionais e nacionais como, por exemplo, os de Solaimanian e Kennedy (1998) e Oliveira, David e Ceratti (2004), respectivamente, apresentaram observações experimentais visando avaliar o *cape seal* em campo. O trabalho de Oliveira, David e Ceratti (2004) analisou o desempenho do TSD e do *cape seal* sob as mesmas condições de tráfego, tendo em vista ambos terem concepções semelhantes, chegando a

resultados que sugeriram um ganho de desempenho para o revestimento do tipo *cape seal* quanto ao TSD.

No entanto, a carência de estudos que validem a utilização do *cape seal* para finalidades semelhantes ao TSD é um dos fatores que favorece o desconhecimento do meio rodoviário sobre esta técnica. Assim, o conhecimento e desenvolvimento da metodologia de avaliação do *cape seal*, tanto em laboratório quanto em campo, pode favorecer uma maior compreensão sobre o seu emprego.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo geral*

Desenvolver um programa experimental que possa avaliar o desempenho do *cape seal* em laboratório para agregados granítico e siderúrgico.

1.5.2 *Objetivos específicos*

- a) Investigar o estado da arte da aplicação do *cape seal* no estado do Ceará, Brasil e no mundo;
- b) Definir e desenvolver procedimentos de dosagem do *cape seal* em laboratório;
- c) Verificar se o agregado siderúrgico pode ser empregado em revestimentos do tipo *cape seal*;
- d) Comparar o comportamento dos Tratamentos de Superfícies testados com tipos de agregados diferentes;
- e) Investigar os benefícios técnicos e/ou econômicos dos Tratamentos de Superfícies testados;
- f) Desenvolver e aprimorar, em laboratório, as técnicas de execução existentes quanto à moldagem e preparação dos corpos de prova para a avaliação de TSD, MRAF e *cape seal*;
- g) Analisar o TSD e o *cape seal* com o uso de simulador de tráfego de laboratório, observando aspectos referentes à deformação, desgastes e textura dos revestimentos.

1.6 Etapas da pesquisa

A metodologia da pesquisa foi construída de forma a contemplar as seguintes etapas:

- a) revisão bibliográfica;
- b) realização do Primeiro Procedimento Experimental (consistiu na coleta e caracterização dos materiais empregados na pesquisa);
- c) realização do Segundo Procedimento Experimental (consistiu na dosagem e fabricação em laboratório de revestimentos do tipo TSD e MRAF utilizando agregado granítico e agregado siderúrgico);
- d) realização do Terceiro Procedimento Experimental (consistiu na avaliação do TSD e do *cape seal* fabricados com agregado granítico e siderúrgico, quando submetidos ao ensaio de determinação da perda por abrasão úmida e teste de coesão para o MRAF);
- e) realização do Quarto Procedimento Experimental (consistiu na construção de placas de TSD e *cape seal* que foram ensaiadas através do simulador de tráfego de laboratório);
- f) análise dos dados;
- g) redação da dissertação de mestrado.

1.7 Estrutura do trabalho

A dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o Capítulo 1 correspondente a introdução do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica visando abranger todos os tópicos relevantes ao entendimento das atividades da pesquisa. Decidiu-se abordar de maneira geral os tratamentos de superfície, dando maior ênfase aos revestimentos do tipo TSD, MRAF e *cape seal*, assim como a utilização do agregado siderúrgico na pavimentação.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e a metodologia desenvolvida para elaboração da pesquisa. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, sugestões e recomendações para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo aborda e caracteriza alguns tópicos da pavimentação rodoviária, inicialmente introduzindo a visão do pavimento rodoviário e a sua contextualização dentro do tema de pesquisa. Apresenta-se também a importância que os tratamentos superficiais representam no cenário nacional e no estado do Ceará.

Discutem-se como foco do presente trabalho, os tratamentos de superfície, dando ênfase aos revestimentos do tipo: Tratamento Superficial por Penetração (TSP), Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e *Cape Seal* (CS). Esses revestimentos serão caracterizados individualmente, assim como seus métodos de dosagem e materiais constituintes.

Apresenta-se uma revisão sobre o agregado siderúrgico e sua utilização na pavimentação rodoviária, tendo em vista a aplicação do mesmo como material alternativo ao agregado pétreo natural na pesquisa experimental aqui desenvolvida.

As informações contidas no presente capítulo visam contribuir para uma melhor concepção das questões de pesquisa e metodologia a ser abordada no trabalho, além de propor uma discussão do que vem sendo pesquisado e difundido na literatura atual.

2.2 Conceituação de pavimento rodoviário

Segundo Bernucci *et al.* (2010) o pavimento pode ser definido como uma estrutura composta de diversas camadas destinada a resistir aos esforços do tráfego e do clima, melhorando as condições de rolamento ao usuário, sendo concebido técnico e economicamente para tal.

Pinto e Preussler (2010) apresentam a definição de pavimento rodoviário através de pontos de vistas diferentes, abordando a visão do usuário e do engenheiro. Na concepção do usuário, o pavimento seria uma superfície com capacidade de suporte do tráfego, proporcionando conforto e segurança. Na visão do engenheiro, o pavimento é uma estrutura constituída por diversas camadas de forma que as tensões resultantes, devido às cargas aplicadas, sejam menores do que as admissíveis pela estrutura.

Do ponto de vista técnico, é através da mecânica dos pavimentos que a interação das diversas camadas em decorrência das cargas solicitantes é estudada. De acordo com Medina e Mota (2005), na análise dos pavimentos faz-se o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos. Conhecidos os parâmetros de deformabilidade, verifica-se o número de aplicações de cargas que leva o pavimento a ruptura. Pode-se também considerar o efeito de variações sazonais, temperatura e umidade do subleito.

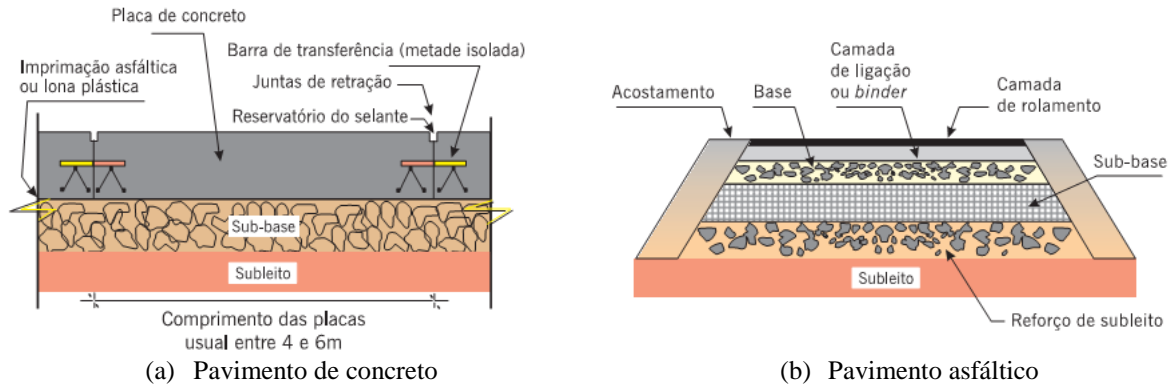
Como observado, verifica-se que a definição de pavimento rodoviário pode ser descrita por diversos pesquisadores de diferentes formas, no entanto, é convergente a ideia que sua principal finalidade é facilitar o deslocamento dos usuários de forma segura e confortável.

Os pavimentos podem ser classificados de três formas distintas: rígido, flexível e semirrígido. Os pavimentos rígidos podem ser concebidos como aqueles em que o revestimento apresenta elevada rigidez em relação às camadas inferiores, tomando como exemplo o pavimento de concreto de cimento *portland*. Pelos pavimentos semirrígidos entendem-se aqueles que possuem base cimentada estabilizada quimicamente, revestida por uma camada asfáltica.

Quanto aos pavimentos flexíveis, entende-se como sendo um determinado pavimento cujas camadas sofrem uma deformação elástica significativa em função do tipo de carregamento aplicado ao mesmo, logo a carga tende a se distribuir em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (Pinto e Preussler, 2010). O pavimento asfáltico tem a sua camada de revestimento constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos, além de uma estrutura dividida em camadas que são denominadas de base, sub-base e reforço do subleito, tendo cada uma função e importância na estrutura como um todo.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), mais recentemente há uma tendência em usar a nomenclatura pavimento de concreto de cimento *portland*, ao invés de pavimento rígido, e pavimentos asfálticos, ao invés de pavimentos flexíveis, de forma a indicar o tipo do revestimento do pavimento. Os perfis transversais de um pavimento de concreto e asfáltico podem ser visualizados na Figura 2.1.

Figura 2.1- Ilustração de diferentes perfis de pavimentos



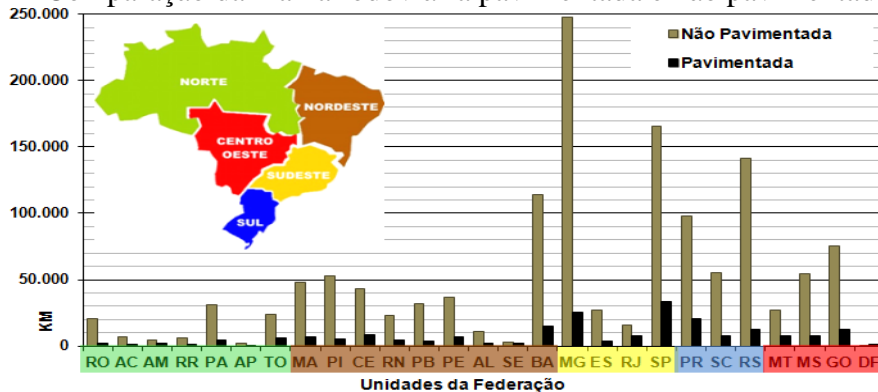
Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Observa-se na Figura 2.1 que a camada de rolamento apresenta diferentes espessuras em função do tipo de revestimento adotado. Quanto ao pavimento asfáltico, geralmente no Brasil utilizam-se espessuras inferiores a 10 cm. No estado do Ceará, é comum a utilização de revestimentos do tipo tratamento superficial, cuja espessura final não supera 2,5cm.

2.3 Considerações sobre a malha rodoviária nacional e alguns conceitos sobre rodovias de baixo volume de tráfego e pavimento de baixo custo

De acordo com dados do DNIT (2012), a malha rodoviária brasileira não pavimentada representa 87,0% do total de rodovias. A região Nordeste apresenta praticamente igual percentual de rodovias não pavimentadas, com 86,8%. Não distante desta realidade, no estado do Ceará esse valor se reduz um pouco, totalizando 84,0% das rodovias. Conforme informações contidas em DNIT (2012), elaborou-se a Figura 2.2 que ilustra a comparação da malha rodoviária pavimentada e não pavimentada por estados no Brasil.

Figura 2.2 - Comparação da malha rodoviária pavimentada e não pavimentada no Brasil



Fonte: Adaptado de DNIT (2012).

Analisando a Figura 2.2, constata-se que a quantidade em quilômetros de rodovias não pavimentadas é superior às rodovias pavimentadas independente da região do país. Em alguns estados a discrepância entre os dados é bastante significativa. No entanto, esses valores não devem ser considerados isoladamente sem observar outras variáveis envolvidas, tendo em vista fatores como a economia e geografia da região.

Verifica-se que o percentual de rodovias não pavimentadas no estado do Ceará é similar a outros estados da região como Maranhão e Piauí. Já o estado de Sergipe apresenta uma menor discrepância entre a malha rodoviária pavimentada e não pavimentada.

A construção da camada de rolamento, seja em revestimento de concreto de cimento *portland* ou asfáltico, agrega em uma rodovia uma série de vantagens no aspecto estrutural, bem como no nível de serviço ofertado aos seus usuários, sem contar na promoção do desenvolvimento regional.

Pinto e Preussler (2010) argumentam que em decorrência do crescimento do volume de tráfego, a construção de uma estrutura capaz de suportar as solicitações do mesmo é justificável pela capacidade de maior suporte das cargas, sendo o investimento exigido na construção do pavimento compensado por fatores como: redução do custo de transporte, diminuição do tempo de viagem, menor consumo de combustível e despesas de conservação, aumento da segurança e redução de acidentes.

A camada do revestimento tem como função direta resistir aos esforços exercidos pelo tráfego e clima, além de promover a impermeabilização das camadas inferiores e possibilitar maior conforto ao usuário. Como função estrutural, a sua parcela de importância depende do tipo de revestimento adotado. No caso do Brasil, onde as espessuras dos revestimentos são mais esbeltas, a função estrutural do pavimento normalmente é mais exigida das camadas de base, sub-base e subleito.

Em um pavimento flexível, a camada do revestimento consiste basicamente de uma mistura de agregados minerais e materiais betuminosos sobre as camadas granulares inferiores. O sucesso de um projeto de um revestimento depende de diversos fatores como o tipo de agregado e ligante, sendo geralmente utilizado mistura a quente em usinas apropriadas e recomendadas para tráfego moderado ou elevado, ou em usinas de mistura a frio, com emulsões asfálticas, recomendado para tráfegos menores (Pinto e Preussler, 2010).

Visando a busca pela otimização dos fatores técnicos e econômicos inerentes a escolha dos materiais a serem usados na pavimentação, os pavimentos asfálticos são construídos de forma a combinar várias camadas, essas, com materiais de propriedades e comportamentos diferentes.

Observa-se ainda uma tendência pela redução das camadas constituintes, muitas vezes condicionada pela questão econômica que limita a viabilidade de determinado projeto ou pela qualidade do material, quando o mesmo favorece esse tipo de decisão. Essa concepção de construção de um revestimento esbelto é típica das Rodovias denominadas de Baixo Volume de Tráfego (RBVT). As RBVTs diferem das demais rodovias basicamente pelo volume de tráfego ser menor do que o das rodovias tradicionais, mesmo sendo esse parâmetro não suficiente para defini-las (RABÊLO, 2006).

Segundo Rabêlo (2006) a definição de RBVT tem como principal parâmetro o volume de tráfego. No entanto, a sua conceituação está condicionada à política adotada por cada órgão que gerencia a malha rodoviária da região, sendo também diferente na visão de diversos estudiosos.

Alguns autores definem como RBVT aquelas cujo número N de repetições de carga equivalente ao eixo padrão não exceda a 10^6 para o período de projeto. Outros consideram como RBVT aquelas rodovias com volume de tráfego inferior a 400 veículos. Para Rabêlo (2006), observando as condições do estado do Ceará e a visão dos órgãos locais, RBVT pode ser conceituada como aquela com volume médio diário de tráfego restringido a 200 veículos por dia, com tráfego limitado de caminhões e que tenha um projeto de intervenção de baixo custo para um período de, no mínimo, 10 anos.

Nas rodovias de baixo volume de tráfego do estado do Ceará, os tratamentos superficiais são utilizados como as principais soluções de revestimento. Conforme DERT (2006), esse tipo de revestimento representa aproximadamente 63% da malha rodoviária estadual, sendo 54% em tratamento superficial duplo e 9% em tratamento superficial simples. Esses números retratam a importância que os tratamentos superficiais alcançaram e como a sua utilização consolidou-se ao longo dos anos, atendendo as características e condições requeridas na pavimentação local do estado do Ceará.

De acordo com Rabêlo (2006), a utilização dos tratamentos superficiais, como revestimento nas rodovias cearense, foi impulsionada devido às estratégias de redução de custos encontradas pelo Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes (DERT), hoje Departamento Estadual de Rodovias (DER). Essa ação ocorreu como forma de retomar uma política de pavimentação de baixo custo, iniciada na segunda metade da década dos anos 70 e início dos anos 80, quando os baixos volumes de tráfego registrados nas estradas de terra existentes inviabilizavam investimentos em rodovias, demandando soluções de projeto de construção menores que os tradicionais.

Assim, a elaboração de projetos com soluções alternativas originaram o conceito de rodovias de baixo custo, onde se visou à elaboração de projetos de soluções de custos reduzidos. Dentre as estratégias verificadas pelo DER do Ceará, optou-se pela flexibilização de normas de projetos geométricos, adoção de greides próximos ao terreno natural, camadas de base com características geotécnicas de sub-base e observou-se a adoção do tratamento superficial simples como solução de revestimento (RABÊLO, 2006).

Da mesma forma como a conceituação de RBVT é controversa, a definição de pavimento de baixo custo apresenta certos critérios que divergem entre diferentes pesquisadores.

Villibor *et al.* (2009) conceituam pavimento de baixo custo como sendo aquele que utiliza bases constituídas de solos locais *in natura* ou em misturas, com custos inferiores as bases tradicionais, onde o pavimento deve ser dimensionado para atender aos tráfegos urbano de muito leve a leve, e rodoviário, com volume diário médio inferior a 1500 veículos, sendo no máximo 30% de veículos comerciais, e com número N inferior a 5×10^6 solicitações do eixo simples padrão. Os autores ressaltam ainda que o tipo de revestimento deva ser do tipo tratamento superficial ou concreto betuminoso com no máximo 3,0 cm de espessura.

Assim, a discussão provocada pela otimização de materiais e adequação das condições técnicas aos fatores econômicos e sociais de determinada região, contribuíram para a necessidade de aprofundamento de pesquisas e a adoção de revestimentos esbeltos que ao longo dos anos se tornaram consagrados como os denominados tratamentos de superfície.

2.4 Definição sobre Tratamentos de superfície × Tratamentos superficiais

Os revestimentos esbeltos compreendem certa diversidade de técnicas e de conceitos. Devido à similaridade no princípio de funcionamento dos mesmos, geram-se muitas vezes dúvidas na nomenclatura utilizada e na conceituação do tipo de revestimento empregado.

Alguns autores como Melo (1978), Loiola (2009) e Bernucci *et al.* (2010), denominam de tratamentos superficiais ou família dos tratamentos superficiais, os revestimentos que consistem basicamente da aplicação de ligante asfáltico e agregados sem mistura prévia e posterior compactação, promovendo a adesão entre ligante e agregado. Melo (1978) reforça que muitos autores, principalmente nos Estados Unidos, consideram como tratamento superficial qualquer tipo de revestimento consistindo da aplicação de ligante

asfáltico ou da associação de ligante-agregado, usualmente com menos de uma polegada de espessura.

A ABEDA (2010) utiliza o termo tratamentos de superfície (TS) para englobar a variedade de serviços rodoviários em que o ligante asfáltico e os materiais pétreos são empregados em espessuras inferiores a 25 mm, sobre bases granulares ou pavimento adequado, utilizando o termo tratamento superficial para o tratamento superficial do tipo simples, duplo ou triplo.

Segundo Lee (2007) e Loiola (2009) existem vários termos similares na nomenclatura dos tratamentos superficiais ou dos tratamentos de superfície. No caso dos Estados Unidos e do Canadá, utiliza-se a denominação *chip seal*, *seal coat*, *betuminous surface treatment*, sendo o termo oficial usado nas especificações pelo *North Carolina Department of Transportation's* (NCDOT's) como *asphalt surface treatment* (AST). Na Áustria denomina-se *sprayed seal* e na Inglaterra *surface dressing*, na África do Sul é conhecido como *surface seals* e na França de *enduits superficiels*.

A fim de evitar uma interpretação ambígua no presente texto, adota-se o termo tratamento de superfície (TS) para falar do grupo dos revestimentos esbeltos com espessuras inferiores a 2,5 cm e restringe-se o termo tratamento superficial, ou tratamento superficial por penetração (TSP), para o tipo específico de revestimento, pertencente ao grupo dos tratamentos de superfície, onde a mistura, ligante e agregado, ocorre na própria pista (caso dos tratamentos superficiais simples, duplo e triplo).

Os principais tipos de revestimentos constituintes do grupo dos tratamentos de superfície são: Tratamento Superficial por Penetração (TSP), Tratamento Antipó (TAP), Capa Selante, Macadame Betuminoso (MB), Lama Asfáltica (LA), Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e *Cap Seal* (CS) (MELO, 1978; PINTO, 2002; LOIOLA, 2009; ABEDA, 2010).

Dentre os diversos tipos de revestimentos pertencentes ao grupo dos tratamentos de superfície, destacam-se os executados a frio ou no local, devido à simplicidade na execução e economia de energia. Os principais tipos de serviços são executados através de aplicação de camadas alternadas de emulsões asfálticas e agregados, podendo ilustrar o caso dos revestimentos do tipo tratamento superficial por penetração (TSP) e Tratamento Antipoeira ou Antipó (TAP). Outra forma de execução dos tratamentos de superfícies é através da aplicação de misturas previamente dosadas em laboratório e posteriormente aplicadas através de usinas móveis próprias, como no caso da Lama Asfáltica (LA),

Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e *Cape Seal* (CS) (ABEDA, 2010). A Figura 2.3 ilustra alguns tratamentos de superfície.

Figura 2.3 - Revestimentos do tipo tratamentos de superfície



Fonte: (a) Autor (2010), (b) (<http://www.brasquimica.com.br>), (c) Loiola (2009), (d) e (e) (www.disbral.com.br), (f) (<http://www.mcasphalt.com>).

A ABEDA (2010) ressalta também que esses tipos de revestimentos superficiais apresentam excelente solução técnica quando se deseja empregar um programa de pavimentação por etapas, tendo em vista assegurarem o sistema de drenagem pluvial em caso de futuro reforço em decorrência do aumento do tráfego.

Morian (2011) comenta que a seleção do tratamento de superfície adequado para um pavimento existente é um desafio complicado, tendo em vista as variáveis que precisam ser consideradas, tais como: condições do pavimento, geografia do terreno, disponibilidade de materiais, entre outras.

Os revestimentos do grupo dos tratamentos de superfície, apesar de não exercerem função estrutural, apresentam uma aplicabilidade de serviços bastante diversificada, proporcionando selagem de fissuras, impermeabilização, rejuvenescimento e manutenção preventiva, servindo também como camada antiderrapante, dentre outras aplicações.

2.4.1 Tratamento superficial por penetração (TSP)

O tratamento superficial por penetração é o tipo de revestimento mais utilizado no estado do Ceará, abrangendo 63% de sua malha rodoviária. O TSP consiste no espalhamento sucessivo de ligante asfáltico e posterior aplicação dos agregados, podendo-se variar as quantidades das camadas. A penetração se dá inicialmente pela acomodação do agregado no ligante depositado sobre a base imprimada, e após a compactação a adesão entre ligante e agregado é reforçada.

O TSP é um tipo de revestimento que apresenta boa resistência ao desgaste, flexibilidade, praticidade na execução, além de ter condição satisfatória de acompanhar as deformações no pavimento. Por ser um revestimento de baixo custo, tem se destacado na pavimentação asfáltica do estado do Ceará, entretanto, outros países também o utilizam para selagem de superfícies trincadas e como proteção do revestimento existente contra o envelhecimento por oxidação (LOIOLA, 2009).

De acordo com Pinto (2002), o tratamento superficial é a mais singela e econômica camada de desgaste de um pavimento flexível, podendo ser utilizado como camada de revestimento de um pavimento novo, ou como recapeamento de revestimentos antigos. Lembra também que quando a distribuição do agregado acontece sobre o ligante, esse revestimento recebe o nome de penetração invertida, devido ao ligante penetrar no agregado de baixo para cima, caso contrário denomina-se penetração direta.

Melo (1978) reforça a definição de tratamento superficial como sendo a camada mais simples e econômica de um pavimento flexível, podendo ser utilizado sobre uma base imprimada, como primeiro revestimento, ou como rejuvenescedor de um revestimento antigo, visando à diminuição de permeabilidade e melhoria na textura.

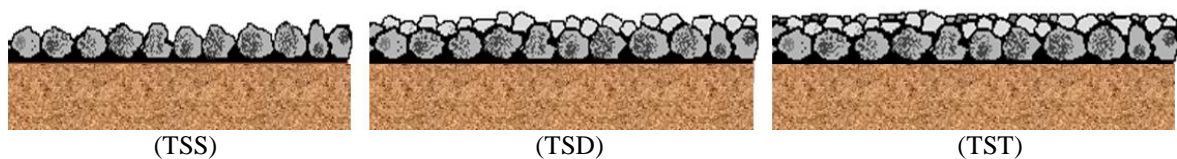
Para ABEDA (2010), o TSP é um revestimento flexível de pequena espessura, normalmente variando de 0,5cm a 2,5cm, sendo um dos métodos mais antigos de se fazer revestimentos asfálticos sobre bases granulares ou recuperar superfícies que ainda se encontram em boas condições estruturais, utilizando emulsões asfálticas convencionais ou modificadas por polímeros.

2.4.1.1 Classificação e aplicações do TSP

O tratamento superficial por penetração é classificado de acordo com o número de camadas sucessivas de ligantes e agregado. Denomina-se Tratamento Superficial Simples

(TSS), quando é constituído de uma única camada de ligante asfáltico e agregado. O TSP é chamado de Tratamento Superficial Duplo (TSD) quando consiste da aplicação de uma camada inicial de ligante sobre o TSS e uma segunda camada de agregados com granulometria menor, de forma a facilitar o preenchimento dos vazios. O TSP é denominado de Tratamento Superficial Triplo (TST) quando é construído segundo a mesma metodologia dos demais (TSS e TSD), no entanto com três camadas de agregados (BERNUCCI *et al.*, 2010). A Figura 2.4 ilustra os diferentes tipos de tratamentos relatados.

Figura 2.4 - Ilustração dos diferentes tipos de tratamento superficial



Fonte: Autor (2013).

A ABEDA (2010) comenta que o TSP é indicado para volume de tráfego de leve a média intensidade com $N \leq 10^6$. Reforça ainda que esse tipo de revestimento é muito utilizado na pavimentação por etapas, quando se prioriza os benefícios socioeconômicos devidos a pavimentação pioneira em virtude dos custos otimizados, ou também, quando não se dispõe de informações seguras do comportamento e expectativa da evolução do tráfego que justifiquem o investimento em outros tipos de revestimentos mais onerosos.

No entanto, deve-se observar que a pavimentação por etapas deve atentar aos mesmos requisitos de projeto do dimensionamento de pavimentos de vida mais longa no Brasil, normalmente 10 anos, mesmo o TSP tendo vida de projeto de 3 a 5 anos. Nesse caso, uma vez atingida à vida de projeto de pavimentos implantados por etapas, se estudará, em função do desempenho da estrutura, a construção de uma nova camada de revestimento que será definida através dos resultados obtidos nas avaliações (ABEDA, 2010).

Melo (1978) argumenta que,

O tratamento superficial, por sua capacidade de suportar deflexões elevadas sem fissurar, é de modo geral, o preferido como primeiro revestimento, mesmo em rodovias sujeitas a tráfego pesado. Neste caso a execução de um tratamento superficial não tem, evidentemente, o caráter de revestimento definitivo, mas, garante que ao ser executado, dois, três ou quatro anos depois, as pequenas deformações já tenham acontecido, havendo assim condições favoráveis para o bom funcionamento do revestimento definitivo, em geral uma mistura asfáltica mais rígida e de custo mais elevado.

A utilização do TSP como camada de revestimento apresenta uma grande variedade de funções cujas principais se apresentam listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Principais funções e aplicações do tratamento superficial por penetração

Proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, elevada flexibilidade e alta resistência contra o desgaste
Proteger e rejuvenescer revestimentos antigos ou fissurados contra efeitos do tráfego
Impermeabilizar e proteger a infraestrutura do pavimento da infiltração de água
Melhorar a resistência ao deslizamento, aderência pneu/pavimento
Aumentar a resistência ao desgaste e a flexibilidade do revestimento
Proporcionar uma condição satisfatória para acompanhar as deformações relativamente grandes da infraestrutura (evitar trinca por fadiga) do pavimento
Minimizar a reflexão, selando as trincas de bases e sub-bases cimentadas para o revestimento denso a ser construído

Fonte: Adaptado de Loiola (2009).

As aplicações e funcionalidades do tratamento superficial por penetração são diversas cabendo destacar alguns pontos em que sua utilização é limitada. O TSP não fornece ganho substancial na resistência estrutural do pavimento, não corrige irregularidades (longitudinais ou transversais) da pista, sendo necessários cuidados em sua execução e projeto para que ele deixe de ser artesanal como é comumente chamado por alguns técnicos (LOIOLA, 2009; BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.4.1.2 Materiais empregados no TSP

De acordo com Melo (1978), na confecção do TSP, utiliza-se basicamente ligante betuminoso e agregado mineral. O ligante tem como objetivo fixar o agregado e impermeabilizar o pavimento, observando que a decisão pela escolha do ligante mais adequado deve ser feita levando em conta fatores como as condições climáticas, tráfego, tipo de superfície e características do agregado, devendo-se, independentemente das limitações como custo no local da obra e equipamentos disponíveis, garantir um bom comportamento do revestimento quanto à qualidade e durabilidade.

Melo (1978) indica alguns tipos de cimentos asfálticos, *cut-back* ou asfalto diluído, e emulsões asfálticas como os ligantes mais adequados para os tratamentos superficiais simples, duplo e triplo, sendo as emulsões asfálticas catiônicas empregadas no Nordeste desde 1968.

Segundo a ABEDA (2010), o TSP é um revestimento constituído de agregado pétreo e emulsão asfáltica catiônica do tipo RR-2C, convencional ou modificada por polímero elastomérico. A emulsão asfáltica é aplicada na superfície da base em taxas que variam de 1L/m² a 1,5L/m² por camada, obedecendo ao projeto de dosagem previamente realizado e aquecido no distribuidor com temperatura variando de 50°C a 70°C.

Bernucci *et al.* (2010) sugerem a utilização de cimentos asfálticos ou emulsões asfálticas, desaconselhando o uso de emulsão de baixa viscosidade. Atualmente também vem sendo aplicado ligantes modificados por polímeros ou por borracha de pneus.

Devido à simplicidade quanto à aplicação da técnica, a escolha dos materiais e construção do revestimento de TSP deve obedecer a determinados critérios. Os agregados devem seguir às especificações de serviço quanto à granulometria, desgaste por abrasão Los Angeles, índice de forma, durabilidade e limpeza. No caso de tratamentos do tipo TSD e TST, os mesmos devem apresentar o diâmetro nominal do agregado da camada superior equivalente à metade do diâmetro do agregado predominante na camada inferior (ABEDA, 2010).

No TSP, o agregado é responsável por algumas funções específicas, sendo as principais: transmitir as cargas até o substrato, resistir aos esforços de abrasão do tráfego e às condições imposta pelo clima, assegurar uma superfície antiderrapante, além de promover uma drenagem superficial adequada (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Conforme DNIT 146/2010-ES, os agregados utilizados em TSP podem ser pedra, agregado siderúrgico, cascalho ou seixo rolado (britados em geral). Essas partículas devem atender às propriedades geométricas, físico-químicas e mecânicas do agregado que são dependentes das características mineralógicas e do processo utilizado na fabricação e consistem em:

- a) desgaste Los Angeles igual ou inferior a 40%;
- b) índice de forma superior a 0,5;
- c) durabilidade com perda inferior a 12%;
- d) granulometria obedecendo às faixas específicas.

Melo (1978) argumenta que na escolha do agregado para emprego em TSP, deve-se observar em particular a granulometria do agregado e o diâmetro máximo do agregado de cada camada, sendo o diâmetro máximo (D) de um agregado a abertura da malha da peneira que corresponde a uma porcentagem passante acumulada de 95%. O diâmetro mínimo (d) de um agregado é a abertura de malha da peneira a qual corresponde uma porcentagem passante acumulada igual a 5%.

No aspecto relacionado à granulometria, as especificações abordam o assunto de dois modos. Algumas indicam a utilização do D e do d para definir os tipos de agregado a aplicar em cada camada. Outras indicam faixas granulométricas nas quais os agregados

devem ser enquadrados. No entanto, observa-se que a condição $d \geq 0,5D$ é um importante requisito a ser atendido, garantido a uniformidade e espessura do tratamento (MELO, 1978).

Pinto (2002) afirma que na seleção dos agregados, o diâmetro máximo D e o diâmetro mínimo d têm um papel fundamental no desempenho do revestimento, sendo conveniente para o TSP manter a relação de $D \approx 2d$ de modo a garantir a uniformidade do agregado e a espessura do tratamento superficial. Esse autor reforça também algumas regras práticas na consideração sobre o diâmetro dos agregados que estão listadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Regras práticas para a determinação dos diâmetros máximos dos agregados

O diâmetro máximo do agregado D da segunda camada de um tratamento deve ser igual ao diâmetro mínimo d da primeira camada e assim para as demais camadas

Quanto mais intenso e pesado for o tráfego, maior deve ser o diâmetro máximo do agregado da primeira camada

Recomenda-se o diâmetro máximo D para a primeira camada de um TSD seja ($D = 1''$) e para um TST ($D = 1\frac{1}{2}''$)

A superfície do TSP é tanto mais rugosa quanto maior for o diâmetro mínimo do agregado da última camada

Quanto menor for o diâmetro máximo do agregado, mais críticas serão as dosagens em agregado e em ligante, requerendo maiores cuidados na execução.

Fonte: Adaptado de Pinto (2002).

De acordo com Pinto (2002), a utilização de agregados de uma só dimensão, uma vez corretamente dosados, proporciona uma excelente superfície de rolamento com elevada estabilidade. Bernucci *et al.* (2010) reforçam que a distribuição mais uniforme é a mais adequada. No caso de granulometria contínua há um envolvimento heterogêneo das partículas podendo-se chegar a ausência de cobertura dos grãos e rejeição desses. No caso de agregados de dimensões similares, aplicados na taxa correta, há uma adesão mais uniforme e maior estabilidade.

Bernucci *et al.* (2010) argumentam que a maior parte da estabilidade do TSS deve-se a adesão conferida pelo ligante entre o agregado e o substrato, observando-se de forma secundária a contribuição dada pelo entrosamento entre as partículas. Afirmam ainda que do TSS até o tratamento múltiplo (TSD ou TST) existe uma transição de estabilidade. Quanto mais aplicações de tratamento superficial forem adotadas, mais serão questionadas as vantagens econômicas do processo, podendo-se levar em conta a utilização de outro tipo de revestimento, como um pré-misturado (microrrevestimento ou lama asfáltica).

O DNIT apresenta em função do tipo de tráfego, faixas granulométricas para o TSS, TSD e TST, apresentadas nas Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Granulometrias especificadas pelo DNIT para o TSS, TSD e TST

Granulometrias especificada pelo DNIT para o TSS					
Peneiras		Faixas		Tolerância da faixa de projeto	
Malha	mm	A	B		
1/2"	12,7	100	-	±7	
3/8"	9,5	85-100	100	±7	
Nº4	4,8	10-30	85-100	±5	
Nº10	2,0	0-10	10-40	±5	
Nº 200	0,074	0-2	0-2	±2	

Granulometrias especificada pelo DNIT para o TSD						
Peneiras		Faixas			Tolerância da faixa de projeto	
Malha	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	
Nº4	4,8	0-5	10-30	85-100	±5	
Nº10	2,0	-	0-10	10-40	±5	
Nº 200	0,074	0-2	0-2	0-2	±2	

Granulometrias especificada pelo DNIT para o TST						
Peneiras		Faixas			Tolerância da faixa de projeto	
Malha	mm	A 1ª camada	B 2ª camada	C 3ª camada		
3/4"	19,1	20-55	-	-	±7	
1/2"	12,7	0-15	100	-	±7	
3/8"	9,5	0-5	85-100	100	±7	
Nº4	4,8	-	10-30	85-100	±5	
Nº10	2,0	-	0-10	10-40	±5	
Nº 200	0,074	0-2	0-2	0-2	±2	

Fonte: DNIT 146/2010-ES, DNIT 147/2010-ES, DNIT 148/2010-ES.

No caso do DER/CE, o órgão sugere para o TSS e o TSD as granulometrias apresentadas nas Tabela 2.4 e Tabela 2.5, respectivamente. Nessas tabelas, observe-se que D é o diâmetro correspondente a 100% do material passante e d é o diâmetro correspondente a 0% do material que passa.

Tabela 2.4 - Classe granulométrica para o TSS

Classe	D - d	N
Classe I	19 - 16 mm (3/4" - 5/8")	$2,5 \times 10^5 < N \leq 7,5 \times 10^5$
Classe II	16 - 10 mm (5/8" - 3/8")	$7,5 \times 10^4 < N \leq 2,5 \times 10^5$
Classe III	10 - 6,3 mm (3/8" - 1/4")	$N \leq 7,5 \times 10^4$

Fonte: DERT-ES-P 10/00.

Tabela 2.5 - Classe granulométrica para o TSD

Classe	D ₁ - d ₁	D ₂ - d ₂	N
I - II	19 - 16mm (3/4" - 5/8")	16 - 10mm (5/8" - 3/8")	$2,5 \times 10^6 - 5 \times 10^6$
II - III	16 - 10mm (5/8" - 3/8")	10 - 6,3mm (3/8" - 1/4")	$10^6 - 2,5 \times 10^6$
IV - III	19 - 10mm (3/4" - 3/8")	10 - 6,3mm (3/8" - 1/4")	$\leq 10^6$

Fonte: DERT-ES-P 11/00.

As especificações do DER/CE recomendam que a granulometria do agregado de cada uma das camadas deve obedecer a inequação $d \geq 0,6D$. Caso a rodovia seja de características mais modestas e estando previsto em projeto, pode-se adotar a relação $d \geq 0,5D$. Entretanto, deve ser observado que, em qualquer hipótese, a tolerância na peneira D é de 5% e de 12% para a peneira d, com no máximo 3% passante na peneira n°10 (2,0mm) e 1,0% passando na peneira n° 200 (0,074mm).

As especificações reforçam que além das inequações citadas no estabelecimento da classe granulométrica, deve-se ter para o TSS, $D \leq 1 \frac{1}{2}$ " (31,8mm) e $d \geq 3/16$ " (4,8mm). No caso do TSD, $D \leq 1$ " (25,4mm) para a camada inferior (1ª camada) e $d \geq 3/16$ " (4,8mm) para a camada superior (2ª camada).

O DER/CE recomenda também as relações $D_2 \approx d_1$, ou pelo menos $D_2 \geq 0,6 d_1$, sejam satisfeitas, para que não haja maiores perigos de exsudação. Como a classe IV - III é um pouco mais sujeita a exsudação, a mesma é recomendada para tráfego mais leve.

Pelo exposto nos parágrafos anteriores, observa-se no que concerne à granulometria que as especificações do DNIT e do DER/CE abordam diferentemente o assunto. O DNIT indica faixas granulométricas nas quais os agregados devem ser enquadrados, enquanto o DER/CE indica o agregado, no caso com granulometria mais uniforme, a ser utilizado em cada camada dependendo dos valores dos diâmetros máximos e mínimos.

Bernucci *et al.* (2010) complementam que de uma forma geral, o tamanho do agregado varia em função do nível de exigência do tráfego, quanto mais intenso e pesado o tráfego, maior deverá ser o tamanho do agregado, entretanto, quanto mais rígido o substrato, menor será o tamanho do agregado. Lembrando que a escolha do agregado deve ainda levar em consideração que valores acima de 12,5mm para TSS, dificultam a ligação agregado e substrato, aumentando o risco de rejeição, além de que quanto maior o tamanho do grão, maior será o ruído gerado e maior o desgaste dos pneus.

Outros aspectos relacionados aos agregados devem ser observados quanto à sua aplicação em tratamento superficial por penetração. Pode-se listar como características principais que interessam ao estudo a forma do agregado, porosidade, resistência, durabilidade, adesividade e limpeza (MELO, 1978).

A forma do agregado afeta o tratamento superficial principalmente no que diz respeito à espessura, sendo preferível a utilização de agregado de forma cúbica, onde o índice de forma não deve ser inferior a 0,5 (MELO, 1978).

No aspecto relacionado à porosidade, Melo (1978) argumenta que não é previsto nas especificações um valor limite de absorção, no entanto, recomenda que o agregado tenha uma porosidade entre 0,5 e 1%. Para Pinto (2002) o valor adequado de absorção do agregado graúdo é entre 0,5 e 2,0%. Observa-se que ambos os pesquisadores concordam que esse pequeno valor de porosidade é benéfico, pois propicia uma penetração do ligante favorecendo assim uma resistência ao deslocamento do filme de ligante pela ação da água.

Quanto à adesividade, percebe-se que uma boa ligação entre ligante e agregado é uma condição necessária para o bom comportamento do tratamento superficial. O TSP, diferentemente de outros revestimentos, fica apenas parcialmente envolvido por ligante e essa ligação influenciará na resistência ao arrancamento que o agregado venha a sofrer pelos efeitos da água e do tráfego (MELO, 1978).

Quanto ao ensaio de resistência, as especificações fornecem um limite máximo de 40% de desgaste para o ensaio de abrasão Los Angeles de forma a garantir um bom desempenho do tratamento superficial. Pinto (2002) comenta que nem sempre valores baixos de Los Angeles garantem agregados estáveis e duradouros. É conveniente para casos de agregados de basalto e rochas ígneas avaliar, em geral, a resistência ao intemperismo, através do ensaio de Durabilidade.

Por todo o material que foi lido e consultado, observa-se que é essencial para a construção de um revestimento de boa qualidade e apto a suportar o esforço a ele submetido, uma dosagem eficiente das taxas de agregado e ligante a serem empregadas, além de um controle adequado quanto à qualidade dos materiais utilizados. Essas ações podem ajudar a evitar problemas como desagregação, falta de aderência, exsudação, etc.

2.4.1.3 Projeto de dosagem do tratamento superficial

O projeto de dosagem do tratamento superficial tem como objetivo adequar o tipo de tratamento aos materiais usados, assim como atender as condições requeridas em obra. A teoria utilizada até hoje foi estabelecida inicialmente pelos estudos de F. M. Hanson na Nova Zelândia, cujos resultados foram avaliados e confirmados em outros países (BERNUCCI *et al.*, 2010; MELO, 1978).

Atualmente, existe um grande número de métodos aplicados à dosagem de materiais para tratamento superficial por penetração, consistindo basicamente na escolha da taxa de agregado e ligante a ser aplicado. Segundo Pereira (2010) essa diversidade de métodos vai de tabelas empíricas até programas de computador, contudo sempre existindo certa

imprecisão independente da metodologia. Rocha (2011) argumenta que os métodos de dosagem de TSP são em geral empíricos e antigos, tendo em vista o aspecto artesanal da construção desse tipo de revestimento.

Na determinação da taxa de agregado existem basicamente dois métodos, os métodos diretos, nos quais a quantidade de agregado é determinada experimentalmente, e os métodos indiretos, nos quais são utilizadas fórmulas estabelecidas por diversos autores (MELO, 1978). Os métodos diretos são os mais empregados, sendo o método da placa ou da bandeja o mais utilizado.

O método da bandeja consiste em colocar sobre uma placa de área conhecida ($50 \times 50\text{cm}$) o agregado, de tal forma a criar uma camada uniforme sem haver superposição e sem deixar vazios visíveis no fundo da placa. O procedimento deve ser repetido pelo menos três vezes para se obter a taxa média em kg/m^2 de agregado (LOIOLA, 2009; PINTO, 2002). A taxa de agregado graúdo (Tg) pode ser obtida pela equação 2.1. A Figura 2.5 ilustra os procedimentos realizados na dosagem pelo método da bandeja para um revestimento TSD.

$$Tg = \frac{Pt - Pp}{A} \quad (2.1)$$

Onde,

P_t : massa da placa com o agregado (kg);

P_p : massa da placa (kg); e

A : área da placa (m^2).

Figura 2.5 - Ilustração do método da bandeja para determinação da taxa de agregado



1ª camada TSS

2ª camada TSD

Fonte: Autor (2013).

Uma vez conhecida a massa específica solta do agregado (g/cm^3), calcula-se a taxa em L/m^2 . No caso de um tratamento do tipo TSD, a taxa de agregado miúdo (T_m) corresponde a 2ª camada e é aproximadamente a metade da taxa de agregado graúdo da 1ª camada. Para a taxa de ligante (T_L), considerando CAP, a mesma é obtida através da equação 2.2 e 2.3 (PINTO, 2002).

$$Tg \left(\frac{L}{m^2} \right) + Tm \left(\frac{L}{m^2} \right) = Tt \quad (2.2)$$

$$TL = 0,10Tt \quad (2.3)$$

Pinto (2002) reforça que a dosagem ótima ocorre quando se verifica a ausência de exsudação e o mínimo de rejeição do agregado da última camada do tratamento. Essa verificação é possível ser feita quando se utilizam simuladores de tráfego de laboratório, onde o esforço de carregamento do tráfego é simulado por rodas padronizadas sobre placas construídas experimentalmente.

Outros métodos podem ser utilizados na determinação da taxa de agregado, dentre os métodos indiretos Melo (1978) cita o método de *Hanson*, o método da Califórnia, o método de Linckenhayl e o método de *Kearley*. Larsen (1985) afirma que para agregados de tamanho entre 5 e 20mm, verifica-se uma pequena diferença nos resultados obtidos para os diversos métodos.

O DER/CE recomenda nas especificações DERT-ES-P 10/00 e DERT-ES-P 11/00 um método para a determinação da primeira indicação da taxa de agregado (Tag) a ser utilizado no TSS e TSD em (L/m^2). O método utiliza os valores D , d e um coeficiente K que varia em função das classes granulométricas definidas pela especificação. Assim, deve-se obedecer às classes indicadas nas especificações podendo ser utilizada para o cálculo da 1ª e 2ª camadas através da equação 2.4.

$$Tag = K(D + d)/2 \quad (2.4)$$

Onde,

Tag : é a taxa do agregado, em L/m^2 ;

D : diâmetro máximo (mm);

d : diâmetro mínimo (mm); e

$$\begin{aligned}
 K &= 0,90 \text{ se } d \geq 16\text{mm (5/8"')} \\
 &= 0,93 \text{ se } 10\text{mm (3/8"')} \leq d < 16\text{mm (5/8"')} \\
 &= 1,10 \text{ se } d < 10\text{mm (3/8"')}
 \end{aligned}$$

A taxa uma vez calculada deve ser confirmada em laboratório através do processo da bandeja que tem como resultado a taxa efetiva em peso. Essa taxa deve ser posteriormente transformada em volume através do uso do parâmetro massa específica solta. A determinação da massa específica solta é obtida com uma caixa de madeira de dimensões internas de volume conhecido, sendo que a especificação do DER/CE sugere dimensões de aproximadamente 30cm × 30cm × 20cm para essa caixa.

A taxa de agregado a espalhar em volume será o resultado da taxa efetiva do agregado em volume, multiplicado por 1,05. A explicação desse acréscimo de 5% não é apresentado na especificação, no entanto acredita-se que seja uma margem de segurança a ser adotada devido aos diferentes aspectos laboratório/campo.

Diversos autores concordam que após a definição das taxas de agregados, deve-se considerar uma sobrecarga no valor da taxa devido aos problemas de rejeição de alguns grãos pela ação do tráfego e as imperfeições eventualmente ocorridas na aplicação (LOIOLA, 2009). O DER/CE considera que essa sobretaxa deve ser de 3% a 7%.

Para Loiola (2009), as taxas de agregado devem ser definidas após a determinação do volume de tráfego e a britagem do agregado, usando-se o método simples da bandeja. O autor considera o referido método como o que melhor retrata as características da superfície do revestimento em laboratório, quando esse é aplicado em uma bandeja de dimensões definidas e logo pesado. Em função da forma do agregado e do tipo, recomenda também que, após a determinação da taxa, seja estimada uma sobretaxa de no máximo 5%.

Observa-se também que ao utilizar somente a expressão da Tag como definido pela especificação do DER/CE, desconsidera-se a influência do tipo de agregado na dosagem, uma vez que os parâmetros da expressão consideram somente os valores de D e d, não abordando a influência da densidade. Logo, observa-se que a utilização do método da bandeja retrata de maneira mais próxima a taxa real de agregado a ser aplicada em campo.

Quanto à dosagem do ligante, Melo (1978) relata diversas fórmulas teóricas ou experimentais. Esse autor ressalta que a quantidade ótima de ligante depende de alguns fatores tais como: as dimensões, forma e porosidade do agregado; a natureza e intensidade do tráfego; e as condições da superfície sobre a qual será executado o tratamento.

Segundo Melo (1978), os diferentes métodos (de *Hanson*, da Califórnia, de Linckenheyl, de *Kearley* e o método de Tagle e Podestá) de dosagem de ligante fornecem, de maneira geral, a quantidade básica de ligante residual, onde para a taxa calculada se faz necessário introduzir correções que levem em consideração uma série de variáveis tais como: o estado da superfície (lisa, porosa, rica ou pobre em ligante), tipo de ligante e variação de volume.

O DER/CE seguindo sua metodologia de dosagem estabelecida nas especificações DERT-ES-P 10/00 e DERT-ES-P 11/00, fornece um procedimento de determinação das taxas de ligantes (Emulsão asfáltica ou CAP) para tratamentos do tipo TSS e TSD. A Taxa de Cimento Asfáltico (T_{cap}) pode ser determinada através da equação 2.5.

$$T_{cap} = Tag/12 \quad (2.5)$$

Onde,

T_{CAP} : taxa de CAP (L/m²)

Tag: taxa de agregado a espalhar (L/m²)

Uma vez calculada a T_{CAP} , a taxa de Emulsão Asfáltica Catiônica (EAC) do tipo (RR-1C e RR-2C) pode ser estimada em função da T_{CAP} , levando em consideração alguns fatores de correção como: (a) que o teor de CAP na EAC do tipo RR-1C é de 62% e de 67% na emulsão RR-2C e (b) que em virtude da menor viscosidade da Emulsão Asfáltica Catiônica, há em torno de 10% de melhor aproveitamento da EAC em comparação ao CAP, em relação ao volume aplicado. Assim, a expressão para o cálculo da taxa de EAC seria dada pela equação 2.6 e 2.7 dependendo do tipo de emulsão utilizado.

$$T(RR - 1C) = \frac{0,90 \times T_{cap}}{0,62} \quad \text{ou} \quad T(RR - 1C) = 0,126 \times Tag \quad (2.6)$$

Onde,

$T_{(RR-1C)}$: taxa da emulsão asfáltica catiônica do tipo RR-1C (L/m²)

T_{CAP} : taxa do CAP (L/m²)

Tag: taxa do agregado

$$T(RR - 2C) = \frac{0,90 \times T_{cap}}{0,67} \quad \text{ou} \quad T(RR - 2C) = 0,117 \times Tag \quad (2.7)$$

Onde,

$T_{(RR-2C)}$: taxa da emulsão asfáltica catiônica do tipo RR-2C (L/m²)

T_{CAP} : taxa do CAP (L/m²)

Tag: taxa do agregado (L/m²)

Logo, no caso do TSS pode-se determinar a taxa de emulsão asfáltica catiônica em função das três classes granulométricas observadas na Tabela 2.4. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Taxas de EAC ou CAP para o TSS em função da classe granulométrica

CLASSE	mm	Pol.	L/m ²			
			Tag	T_{CAP}	T_{RR-1C}	T_{RR-2C}
I	19 – 16	3/4" – 5/8"	16	1,32	1,99	1,85
II	16 – 10	5/8" – 3/8"	12	1,01	1,52	1,42
III	10 – 6,3	3/8" – 1/4"	9	0,75	1,13	1,05

Fonte: DERT-ES-P 10/00.

No caso das EAC, para a taxa de ligante observada na Tabela 2.6, a especificação DERT-ES-P 10/00 sugere subtrair 0,3 L/m² e diluir com 0,3 L/m² de água (diluição de 1:1) de forma a consistir o 2º banho sobre o agregado já rolado, com penetração direta.

Na Tabela 2.7 apresentam-se as taxas do CAP sugeridas pelo DER/CE, em função da classe granulométrica, para uso em TSD.

Tabela 2.7 - Taxas do CAP em função da classe granulométrica

Classe	$D_1 - d_1$	$D_2 - d_2$	1ª camada	2ª camada	Total
I – II	19 – 16mm	16 – 10mm	Tag: 16 kg/m ²	12 kg/m ²	28 kg/m ²
	(3/4" – 5/8")	(5/8" – 3/8")	T_{CAP} : 1,32 L/m ²	1,01 L/m ²	2,33 L/m ²
II – III	16 – 10mm	10 – 6,3mm	Tag: 12 kg/m ²	9 kg/m ²	21 kg/m ²
	(5/8" – 3/8")	(3/8" – 1/4")	T_{CAP} : 1,01 L/m ²	0,75 L/m ²	1,76 L/m ²
III - IV	19 – 10mm	10 – 6,3mm	Tag: 13 kg/m ²	9 kg/m ²	22 kg/m ²
	(3/4" – 3/8")	(3/8" – 1/4")	T_{CAP} : 1,12 L/m ²	0,75 L/m ²	1,87 L/m ²

Fonte: DERT-ES-P 11/00.

Na Tabela 2.8 apresentam-se as taxas das emulsões asfálticas, sugeridas pelo DER/CE, em função da classe granulométrica, para uso em TSD.

Tabela 2.8 - Taxas das emulsões asfálticas em função da classe granulométrica

Classe	$\frac{D_1 - d_1}{D_2 - d_2}$	Tag	RR-1C (L/m ²)	RR-2C (L/m ²)
			T _L : (1) - (2) - (3)	T _L : (1) - (2) - (3)
I - II	19 - 16mm	28	3,38: 1,35 - 1,53 - 0,50	3,12: 1,25 - 1,37 - 0,50
	16 - 10mm			
II - III	16 - 10mm	21	2,55: 1,02 - 1,03 - 0,50	2,36: 0,94 - 0,92 - 0,50
	10 - 6,3mm			
IV - III	19 - 10mm	22	2,72: 1,09 - 1,13 - 0,50	2,52: 1,01 - 1,01 - 0,50
	10 - 6,3mm			

Fonte: DERT-ES-P 11/00.

Devido ao maior poder de penetração da EAC em relação ao CAP, a especificação DERT-ES-P 11/00 recomenda aumentar a taxa do 2º banho em aproximadamente 60% em relação à taxa do 1º banho (40%). Além disso, sugere que na taxa do 2º banho seja subtraída 0,5 L/m² da taxa, diluída em água (1:1) e aplicar esse banho diluído após a compressão da 2ª camada. O DER/CE alerta que esses valores são indicações preliminares de dosagem e que devem ser confirmados experimentalmente com o agregado britado.

O DNIT apresenta nas suas especificações de serviço sobre tratamento superficial, como uma recomendação de taxas a serem aplicadas em campo, uma série de tabelas com taxas previamente definidas de ligante asfáltico (L/m²) e agregado pétreo (kg/m²). A Tabela 2.9 ilustra os valores sugeridos. Entretanto, o DNIT, ressalta que as taxas de aplicação de ligante e agregado devem ser fixadas em projeto e ajustadas em campo.

Tabela 2.9 - Taxas de aplicação segundo o DNIT

Taxas de aplicação para um TSS		
	Ligante asfáltico (L/m ²)	Agregado pétreo (kg/m ²)
	0,8 - 1,2	8 - 12
Taxas de aplicação para um TSD		
Camada	Ligante asfáltico (L/m ²)	Agregado pétreo (kg/m ²)
1ª	2 - 3	20 - 25
2ª	2 - 3	10 - 12
Taxas de aplicação para um TST		
Camada	Ligante asfáltico (L/m ²)	Agregado pétreo (kg/m ²)
1ª	2 - 3	20 - 25
2ª	2 - 3	10 - 12
3ª	2 - 3	5 - 7

Fonte: DNIT 146/2010-ES, DNIT 147/2010-ES, DNIT 148/2010-ES.

Quanto ao aspecto do consumo de materiais, a ABEDA (2010) traz em seu Manual de Emulsões Asfálticas algumas tabelas que fornecem o consumo teórico de materiais em função do tipo de tratamento superficial adotado, TSS, TSD e TST. A Tabela 2.10 resume tais recomendações.

Tabela 2.10 - Consumo teórico de materiais no TSS, TSD e TST

TSS			
TIPO DE MATERIAL	TRATAMENTO SIMPLES (L/m ²) (1)	TRATAMENTO SIMPLES COM BANHO DILUÍDO (L/m ²)	
Pedrisco ¼” ou 3/8”	5 a 6	5 a 6	
Emulsão Asfáltica, RR-2C (2)	1,0 a 1,2	1,40	
TSD			
TIPO DE MATERIAL	TRATAMENTO DUPLO (L/m ²) (1)	TRATAMENTO DUPLO COM BANHO DILUÍDO (L/m ²) (1)	TRATAMENTO DUPLO COM CAPA SELANTE (L/m ²) (1)
Pedra ½” ou 5/8” ou ¾”	9 a 14	9 a 14	9 a 14
Pedrisco ¼” ou 3/8”	5 a 6	5 a 6	5 a 6
Pó de pedra ou areia	-	-	5 a 6
Emulsão Asfáltica, RR-2C (2)	2,0 a 2,2	2,7 a 2,9	3,0 a 3,2
TST			
TIPO DE MATERIAL	TRATAMENTO DUPLO (L/m ²) (1)	TRATAMENTO DUPLO COM BANHO DILUÍDO (L/m ²) (1)	TRATAMENTO DUPLO COM CAPA SELANTE (L/m ²) (1)
Pedra 1”	16 a 18	16 a 18	16 a 18
Pedra ½” ou 5/8” ou ¾”	9 a 14	9 a 14	9 a 14
Pedrisco ¼” ou 3/8”	5 a 6	5 a 6	5 a 6
Pó de pedra ou areia	-	-	5 a 6
Emulsão Asfáltica, RR-2C (2)	3,4 a 3,7	4,1 a 4,4	4,4 a 4,7

(1) Considerando, em média, o peso específico da emulsão asfáltica 1,0kg/L

(2) Dependendo do projeto pode-se empregar emulsão asfáltica elastomérica (RR2C-E)

Fonte: Adaptado de ABEDA (2010).

2.4.1.4 Etapas construtivas de um TSP

No processo construtivo do TSP utilizam-se principalmente três equipamentos: espargidor de emulsão asfáltica, distribuidor de agregado e o rolo compactador. O espargimento do ligante e a distribuição do agregado devem ocorrer simultaneamente evitando a má aderência dos materiais e logo após deve ser iniciada a acomodação com rolo pneumático (BERNUCCI *et al.*, 2010; ABEDA, 2010). Atualmente, existe um equipamento denominado multidistribuidor que melhora a eficiência e a regularidade na execução do TSP, aplicando simultaneamente o ligante e o agregado de forma combinada.

Conforme a ABEDA (2010), utiliza-se na prática geralmente como distribuidor uma caixa metálica acoplada na traseira do caminhão basculante, com uma abertura regulável de forma que o escoamento do agregado pétreo possa ser realizado em marcha ré do caminhão sempre sobre a emulsão asfáltica não rompida. Apesar da simplicidade da aplicação, as taxas de abertura da comporta e a velocidade do caminhão devem ser observadas de acordo com a taxa de aplicação definida em projeto.

O processo construtivo do tratamento superficial favorece a sua utilização pela praticidade como o mesmo é realizado. A Figura 2.6 ilustra as etapas do processo construtivo.

Figura 2.6 - Etapas construtivas de um TSS



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

A Figura 2.7 detalha o aspecto superficial do acostamento e a vista geral de um pavimento do tipo TSD após a construção e posterior liberação ao tráfego.

Figura 2.7 - Revestimento do tipo TSD



Fonte: Autor (2010).

Através das especificações de serviço DNIT 146/2010-ES (TSS sem polímero), DNIT 147/2010-ES (TSD sem polímero), DNIT 148/2010-ES (TST sem polímero), DNER-ES 391/99 (TSS com polímero), DNER-ES 392/99 (TSD com polímero) e DNER-ES 393/99 (TST com polímero) é possível obter toda a sistemática para a correta execução e controle da qualidade do TSP em campo. Esses cuidados são necessários para que haja uma correta execução dos serviços e o bom funcionamento do pavimento construído.

2.4.2 *Microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF)*

A utilização das emulsões asfálticas catiônicas teve início a partir dos anos 60, trazendo grandes vantagens para a evolução dos materiais asfálticos. A facilidade de produção em grandes volumes com aplicação a temperatura ambiente, baixo custo de estocagem e transporte, aliado a elevada capacidade de envolvimento do ligante aos agregados contribuíram para evolução das técnicas a frio (CERATTI; REIS, 2011).

O MRAF surgiu nos anos 70 na Europa como sendo uma técnica derivada da lama asfáltica. No começo dos anos 80, iniciou-se a sua utilização nos Estados Unidos sendo denominado *micro-surfacing*. Nesse período, a utilização de emulsões a frio já estava consolidada e a nova técnica logo se difundiu por diversos países. No Brasil, foi no início dos anos 90 que o uso de emulsões catiônicas com ligantes asfálticos elastoméricos e de ruptura controlada possibilitou o aprimoramento das técnicas a frio (CERATTI; REIS, 2011).

Segundo Solaimanian e Kennedy (1998), no estado do Texas dos Estados Unidos, nos projetos de manutenção e/ou reabilitação a técnica do MRAF sozinha não é amplamente praticada em todo estado, sendo o uso do tratamento superficial mais comum. Apesar disso, o MRAF tem se tornado uma alternativa cada vez mais popular de reabilitação de pavimentos, tendo em vista apresentarem resultados satisfatórios na maioria das situações.

De acordo com a ABEDA (2010), a primeira experiência brasileira de microrrevestimento asfáltico em rodovia de intenso volume de tráfego foi no ano de 1997, na Rodovia Presidente Dutra (BR-116-SP), devidamente monitorada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Nos anos seguintes houve um crescente interesse dos órgãos rodoviários pela utilização do MRAF, totalizando no estado de São Paulo um total de mais de 15 milhões de m², equivalente a 4.100km de faixa aproximadamente.

Castro (2011), citando informações concedidas pela empresa TECNOPAV, afirma que na região Nordeste do Brasil foram executados entre os anos de 2006 a 2010 mais de 16 milhões de m² de MRAF, somente entre os anos de 1998 e 2002, equivalente a aproximadamente 4.600km de faixa. A técnica foi aplicada principalmente nos estados da Paraíba, Piauí e Rio Grande do Norte.

No estado do Ceará, Castro (2011) comenta que segundo informações obtidas com engenheiros do DER/CE, realizou-se no ano de 2011 cerca de 250km de MRAF, um número ainda pouco expressivo quando comparado com outros tipos de revestimentos aplicados no estado. Esses trechos de MRAF foram executados através de programas de recuperação funcional de rodovias realizadas pelo governo estadual.

Castro (2011) relata ainda que em conversas com engenheiros atuantes na área de pavimentação da região Nordeste, os mesmos confirmaram algumas experiências realizadas com o MRAF, entre elas, a aplicação diretamente de MRAF sobre base imprimada no litoral do Rio Grande do Norte. Outra situação relatada pelo autor é a aplicação direta de MRAF sobre paralelepípedos de vias urbanas, como o realizado na cidade de Sapé na Paraíba, com espessura de 30 mm. De acordo com esse autor, ambos os trechos apresentam boas condições de tráfego. A Figura 2.8 ilustra os trechos comentados.

Figura 2.8 - Aplicação de MRAF em rodovias do Nordeste



(a) MRAF sobre base imprimada – RN
Fonte: Castro (2011).

(b) MRAF sobre paralelepípedos - PB

2.4.2.1 Conceituação, funções e aplicações do MRAF

Diferentemente do tratamento superficial que é um tipo de revestimento betuminoso por penetração, o MRAF é um revestimento de mistura pré-dosada em laboratório, cujo processo de mistura dos materiais constituintes é realizado em usinas móveis ou estacionárias.

Pinto (2002) conceitua o MRAF como a associação de agregado, fíler, emulsão com polímero, água e aditivo, apresentando consistência fluida e distribuindo-se uniformemente em uma superfície preparada, podendo ser empregado como capa selante, impermeabilizante e antiderrapante. Segundo Pinto e Preussler (2010), a lama asfáltica e o microrrevestimento asfáltico são revestimentos onde os agregados empregados e a consistência fluida permite que a mistura seja utilizada em espessuras bastante delgadas, favorecendo a sua utilização no rejuvenescimento de superfícies asfálticas e na impermeabilização de revestimentos fissurados.

Quanto ao aspecto aplicação e liberação ao tráfego, a *International Slurry Surfacing Association* (ISSA A-143/2010), comenta que o MRAF quando aplicado

corretamente, é um tipo de revestimento que apresenta rápida aplicação podendo ser liberado ao tráfego em torno de 1 hora.

Quanto à utilização do MRAF para ganho estrutural, verifica-se que devido a sua pequena espessura, 6 a 15 mm, os ganhos estruturais são mínimos ou inexistentes, ocorrendo que para espessuras maiores que 8mm, o mesmo deve ser aplicado em duas camadas (BERNUCCI *et al.*, 2010; ABEDA, 2010).

A técnica de MRAF apresenta uma restrição quanto à capacidade de regularização, não devendo ser aplicável para: (a) pavimentos com deformações relacionadas à base, (b) substratos com trincas ativas e (c) para casos com depressões maiores que 40mm (conforme citado por Santos e Reis (1999), nesse caso deve ser efetuado o reperfilamento com uma camada de usinado a quente conforme ressaltam os autores).

Para a FHWA (2004), o MRAF é um revestimento esbelto com espessuras que varia de 10 a 13mm, visando principalmente à melhoria das características do atrito do pavimento. Outro campo de aplicação do MRAF é sobre pavimentos rígidos, pontes e viadutos.

De acordo com a ABEDA (2010), o MRAF aumenta a rugosidade da camada de rolamento reduzindo problemas na aderência pneu-pavimento, diminuindo o *spray* que se forma pela movimentação dos veículos tornando interessante sua utilização tanto para tráfego pesado, por melhorar as condições de segurança, como para tráfego local pela facilidade de execução e custo atrativo.

As principais características do ponto de vista técnico e econômico nas aplicações do microrrevestimento asfáltico estão listadas a seguir (ABEDA, 2010; SANTOS; REIS, 1999):

- a) a técnica se adapta a todas as classes de tráfego (rodovias, vias urbanas, aeroportos, estacionamentos, etc), bem como para manutenção preventiva e quando não há necessidade de reforço estrutural;
- b) tem como principal área de utilização os pavimentos delgados, além de reduzir a espessura do revestimento asfáltico de reforço estrutural quando empregado como camada intermediária;
- c) pode ser aplicado em pavimentos novos sobre bases granulares flexíveis e rígidas, além de corrigir os defeitos superficiais, através do enchimento das trilhas de roda e selagem das trincas;
- d) preserva a estrutura do pavimento, em função da redução da entrada de água e ar no pavimento;

- e) reestabelece as condições ideais da superfície de rolamento;
- f) tem alta produtividade e rapidez na execução e liberação dos serviços, evitando congestionamentos e perturbações durante a operação;
- g) geralmente não precisa de pintura de ligação;
- h) retarda a reflexão de trincas;
- i) melhora as condições de segurança, meio ambiente e saúde, por ser uma técnica empregada à temperatura ambiente, não conter solventes derivados de petróleo e sem riscos de explosões.
- j) apresenta durabilidade superior à aplicação da lama asfáltica convencional.

Dentre as aplicações possíveis para a utilização da técnica do microrrevestimento asfáltico, a Figura 2.9 exemplifica e ilustra a utilização de MRAF como enchimento de trilha de roda de rodovias que não apresentem sua capacidade estrutural comprometida.

Figura 2.9 - Aplicação de MRAF em trilhas de roda



Fonte: Ceratti e Reis (2011).

O microrrevestimento asfáltico é uma técnica que pode ser considerada uma evolução da lama asfáltica, tendo em vista os seus materiais constituintes serem praticamente os mesmos, ambos utilizam agregados minerais, materiais de enchimento ou fíler, emulsão asfáltica e água (ABEDA, 2010). Além disso, ambos os revestimentos são exemplos de técnicas cujo processo de mistura dos materiais é realizado no local onde o serviço será aplicado, através de usinas móveis. Pode-se observar, entretanto, que o MRAF apresenta uma cura mais rápida e pode ser aplicada em camada mais espessa do que a lama asfáltica (JAHREN *et al.*, 2000). A Tabela 2.11 resume as principais diferenças entre os dois tipos de revestimento.

Tabela 2.11 - Principais diferenças entre as técnicas de lama asfáltica e MRAF

LAMA ASFÁLTICA CONVENCIONAL	MRAF
Admite agregado não britado	Exige agregados mais grossos, 100% britados e de melhor qualidade
Utiliza emulsão de ruptura lenta	Utiliza emulsão elastomérica e de ruptura controlada
A cura depende das condições climáticas	A cura é química e menos dependente das condições climáticas
A abertura ao tráfego é lenta	A liberação ao tráfego é controlada
Utilizada principalmente como camada selante e rejuvenescedora em vias de baixo e médio volume de tráfego	Utilizado como camada antiderrapante e de regularização para qualquer categoria de tráfego
Vida útil média de 3 a 5 anos	Vida útil média de 5 a 8 anos
Exige um longo tempo de interdição da pista (mínimo de 4 horas)	Interdição mínima de tempo de rodovia (em média de 1 hora)
Baixo rendimento na execução devido às condições climáticas	Alto rendimento na execução
Dependendo do substrato exigem aplicação de pintura de ligação	Apresenta ótima adesão ao pavimento existente

Fonte: Adaptado de Ceratti e Reis (2011).

Observa-se que apesar da semelhança entre os dois tipos de revestimentos quanto aos materiais, produção e aplicação da mistura, a utilização do MRAF favorece, de maneira geral, a existência de um revestimento de melhor qualidade, além de espectro diversificado de serviços possíveis de serem realizados através do correto uso da técnica.

As especificações DNIT 035/2005-ES (Microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero) e DNIT 150/2010-ES (Lama Asfáltica) definem a sistemática concernente aos equipamentos, materiais, execução e controle desses tipos de revestimentos. O DER/CE também apresenta na sua especificação DERT-ES-P 20/00, recomendações quanto ao uso correto da técnica de microrrevestimento.

2.4.2.2 *Materiais empregados no MRAF*

Ceratti e Reis (2011) relatam que o MRAF é uma mistura composta de emulsão catiônica elastomérica de ruptura controlada, agregados britados de alta qualidade, fíler, água, e se necessário aditivo químico de controle de ruptura da emulsão e fibras (aditivo de reforço mecânico). A Figura 2.10 ilustra alguns dos materiais utilizados na composição da mistura de MRAF.

Figura 2.10 - Materiais constituintes do MRAF



Fonte: Autor (2013).

Na composição do MRAF é utilizada uma emulsão de ruptura controlada produzida de asfaltos elastoméricos que propicia ao MRAF, menor susceptibilidade térmica, maior flexibilidade e elasticidade em climas frios, melhores características adesivas ao substrato e maior resistência ao desgaste e ao envelhecimento. A utilização desse tipo de emulsão permite a execução dos serviços a noite e com liberação de tráfego entre 1 e 3 horas dependendo de outros fatores como tipo de ligante, reatividade e condições climáticas (ABEDA, 2010).

As emulsões utilizadas para MRAF são do tipo modificadas por polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno), SBR (látex de estireno-butadieno) e etileno e acetato de vinila (EVA) que também tem sido usada (FHWA, 2004). O MRAF também difere da lama asfáltica por utilizar emulsão asfáltica com polímeros (RC1C-E) e eventualmente a adição de fibras, além de empregar equipamentos, controle de qualidade e desempenho mais rigorosos.

A emulsão RC1C-E confere ao MRAF outras características como uma melhor adesividade ao substrato e na selagem de fissuras, como também maior retenção de agregados (coesão) e resistência ao desgaste por abrasão e oxidação (envelhecimento) em relação à lama asfáltica (CERATTI; REIS, 2011).

ISSA A-143 (2010) recomenda que a emulsão utilizada nos serviços de MRAF seja modificada por polímero, cujo mesmo deve ser moído ou misturado ao asfalto ou emulsificante antes do processo de emulsificação, considerando como teor mínimo de polímero o valor de 3% em função do peso do asfalto.

Uma emulsão pode ser definida como a dispersão de pequenas partículas de um líquido em outro líquido, no caso da emulsão asfáltica, a mesma consiste basicamente da combinação de três componentes básicos: cimento asfáltico, água e emulsificante. No geral

apresentam composição química variável, composta de 30% a 50% de água, 50% a 70% de cimento asfáltico e 0,1% a 2,5% de agentes emulsificantes (ABEDA, 2010).

Embora no MRAF possam ser utilizadas emulsões do tipo aniônica ou catiônica, as emulsões que têm se destacado no Brasil e Estados Unidos são as emulsões catiônicas, em função do melhor desempenho observado no que se refere à compatibilidade com os agregados minerais (FHWA, 2004; ABEDA, 2010).

A especificação do DER/CE, DERT-ES-P 20/00, apresenta como material possível de ser utilizado em serviço de MRAF, emulsões asfálticas modificadas com polímeros com ruptura controlada e aditivos, podendo ser catiônica do tipo RR-1C, RR-2C, LA-1C, LA-2C ou aniônicas tipo LA-1 e LA-2.

No entanto, a especificação DNIT 035/2005-ES restringe ao uso de emulsão de ruptura controlada, do tipo RC1C-E, para emprego em MRAF, sendo que os requisitos observados seguem de maneira geral as especificações adotadas pela ISSA A-143 (2010). A especificação de material DNIT 128/2010-EM relata as características que devem ser observadas quanto à utilização da emulsão do tipo RC1C-E em serviços de MRAF.

Outro material de fundamental importância na constituição e na qualidade do microrrevestimento asfáltico é o agregado mineral. Segundo Castro (2011) por representar cerca de 90% em peso do MRAF, a qualidade dos agregados apresenta fator relevante no desempenho da mistura, logo, deve-se ter o cuidado de enquadrar os agregados em todos os padrões das normas de forma a garantir a mistura o desempenho esperado.

De acordo com a FHWA (2004), os agregados devem ser 100% britados, limpos, resistentes, e livre de partículas como argilas, e outros materiais que possam afetar a ligação, mistura e aplicação, adotando preferencialmente agregados de formas angulares e que não possuam partículas muito alongadas.

Conforme DNIT 035/2005-ES, o MRAF pode ser constituído de agregados, pó de pedra ou mistura de ambos. As suas partículas individuais devem apresentar resistência, ser livre de torrões de argila e substâncias nocivas, além de apresentar as seguintes características:

- a) desgaste Los Angeles do agregado igual ou inferior a 40% (DNER-ME 035/98) antes de sua britagem;
- b) durabilidade com perda inferior a 12% (DNER-ME 089/94);
- c) equivalente de areia igual ou superior a 60% (DNER-ME 054/97).

A especificação do DER/CE, DERT-ES-P 20/00, adota os mesmos limites apresentados na especificação do DNIT para valores de durabilidade e desgaste Los Angeles, no entanto, com relação ao equivalente de areia, recomenda um valor igual ou superior a 55%.

Segundo as especificações americanas, abordadas pela ISSA A-143 (2010), os valores de limites estabelecidos quando comparados à especificação brasileira divergem quanto aos requisitos de aceitação. No caso do desgaste Los Angeles a recomendação americana é de no máximo 30%. Já para o equivalente de areia a recomendação é de no mínimo 65%. Com relação ao ensaio de durabilidade, a especificação limita os valores máximos de 15% e 25% para o desgaste com o uso de sulfato de sódio e sulfato de magnésio respectivamente.

Outros ensaios complementares são realizados visando à caracterização completa dos agregados podendo-se listar os ensaios de índice de forma (DNER-ME 086/94), densidade (DNER-ME 084/95) e azul de metileno (NBR 14949/2003).

A seleção da granulometria da mistura a ser utilizada é feita com base na dimensão dos agregados. A especificação DNIT 035/2005-ES contempla três faixas granulométricas possíveis de serem utilizadas para microrrevestimento asfáltico, correspondente às faixas adotadas pela ISSA (CASTRO, 2011). O DER/CE restringe à aplicação ao uso de duas faixas granulométricas, também correspondente às faixas adotadas pela ISSA.

Reis (2005) ressalta que a escolha da faixa depende basicamente da espessura desejada do revestimento e da textura. A Tabela 2.12, ilustra as faixas granulométricas para MRAF conforme as especificações do DNIT, ISSA, ABNT e DER/CE.

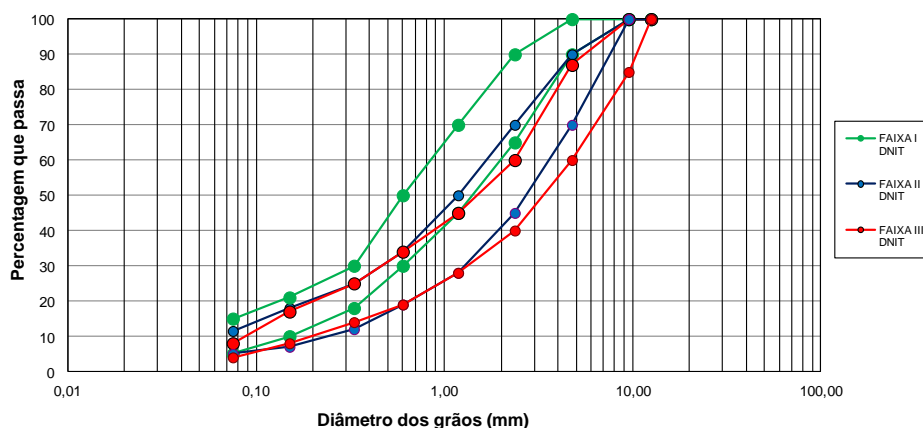
Tabela 2.12 - Faixas granulométricas para MRAF conforme DNIT, ISSA, ABNT e DER/CE

PENEIRAS		FAIXAS GRANULOMÉTRICAS (% QUE PASSA)			TOLERÂNCIA (%)		
ASTM	DIÂMETRO (mm)	FAIXA A, ABNT TIPO II, ISSA FAIXA I, DNIT FAIXA I, DER/CE	FAIXA B, ABNT TIPO III, ISSA FAIXA II, DNIT FAIXA II, DER/CE	FAIXA C TIPO IV, ISSA FAIXA III, DNIT	DNIT	ISSA DER/CE	ABNT
½	12,7	100	100	100	-	-	
3/8	9,5	100	100	85-100	±5	-	
4	4,75	90-100	70-90	60-87	±5	±5	±5
8	2,36	65-90	45-70	40-60	±5	±5	±5
16	1,18	45-70	28-50	28-45	±5	±5	±5
30	0,6	30-50	19-34	19-34	±5	±5	±5
50	0,3	18-30	12-25	14-25	±5	±4	±4
100	0,15	10-21	7-18	8-17	±5	±3	±3
200	0,075	5-15	5-15	4-8	±3	±2	±2

Fonte: Adaptado de Castro (2011) e DERT-ES-P 20/00.

Como se observa na Tabela 2.12, a faixa granulométricas do Tipo II da ISSA é igual à faixa I do DNIT e DER/CE, a faixa Tipo III da ISSA é igual à faixa II do DNIT e DER/CE e a faixa Tipo IV da ISSA é igual à faixa III do DNIT. As faixas granulométricas do DNIT para MRAF podem ser visualizadas na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Faixas granulométricas do DNIT para MRAF



Fonte: Castro (2011).

Reis (2005) comenta que a faixa de graduação mais fina deve ser aplicada em pavimentos envelhecidos e trincados, atuando como impermeabilizante, e a de graduação mais grossa utilizada para fornecer características antiderrapantes.

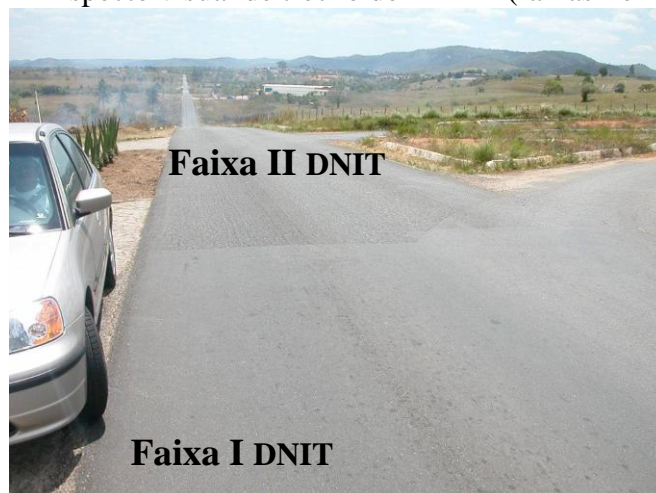
De acordo com Santos e Reis (1999) a faixa I é recomendada para vias urbanas, residências e aeroportos, sendo que a sua utilização não deve ser feita quando aplicada apenas em uma camada para rodovias de alto tráfego e em áreas onde a amplitude térmica é elevada. Uma aplicação típica da faixa I é a sua utilização em duas camadas, na qual a segunda camada é da faixa II, adotada sobre pavimentos de textura intermediária a fim de preencher as trincas e fornecer uma superfície de rolamento (SANTOS; REIS, 1999).

A faixa II é recomendada para rodovias de tráfego pesado e que sofre com uma larga variação na temperatura. Sendo indicada como uma faixa que fornece uma excelente textura antiderrapante (SANTOS; REIS, 1999).

No caso da faixa III, Santos e Reis (1999) comentam que a mesma fornece uma excelente macrotextura, sendo largamente utilizada em regularizações ou restaurações superficiais, sobre bases granulares, pavimentos fresados e/ou reciclados e sobre pavimentos que estejam com a capacidade estrutural preservada, mas apresentem estágios avançados de deterioração do revestimento. Os autores ressaltam que quando aplicada sobre bases granulares, deve-se previamente executar a imprimação da mesma.

Castro (2011) relata que em conversas obtidas com engenheiros e especialistas da área de pavimentação, os mesmos indicam a faixa II como a mais utilizada no estado do Ceará, representando cerca de 80% das aplicações dos serviços de MRAF já realizados. A Figura 2.12 ilustra a diferença visual observada pela textura do pavimento executado seguindo a granulometria da faixa I (textura mais lisa) e faixa II (textura mais rugosa).

Figura 2.12 - Aspecto visual de trecho de MRAF (faixas I e II do DNIT)



Fonte: Castro (2011).

Outros materiais como fíler mineral, aditivo químico, aditivos de reforço (fibras) e água, apesar de representarem uma parcela menor na composição da mistura, têm uma função relevante quanto ao comportamento e desempenho da mesma.

O material de enchimento ou fíler deve ser constituído por materiais não plásticos, secos, e isentos de grumos, podendo-se utilizar pó de pedra, cimento Portland, cal extinta e pós-calcários (DNIT-ES 035/2005). Ceratti e Reis (2011) indicam o cimento Portland CP-II ou a cal hidratada como fíleres preferenciais a serem utilizados.

De acordo com Ceratti e Reis (2011), a utilização de fíler na composição da mistura tem como objetivos melhorar a graduação da faixa utilizada, aumentar a compatibilidade e a consistência da mistura (reduzindo a segregação de agregado e/ou afloramento de ligante), auxiliar no processo de ruptura/cura da emulsão (acelerando a expulsão de água), e aumentar a coesão final da mistura.

A ISSA A-143 (2010) e a FHWA (2004), recomendam a utilização de fíler nos teores de 0% a 3% em função do peso seco do agregado, podendo ser considerado parte da graduação do agregado. Ceratti e Reis (2011), comentam que existe a possibilidade de alterar em 1% o teor de fíler do valor especificado em projeto, para casos onde o procedimento representar ganhos com relação à consistência e/ou ruptura/cura do MRAF.

Com relação aos aditivos utilizados no MRAF, a ISSA A-143 (2010) e a FHWA (2004) citam que o uso de um aditivo químico pode ter como função o aceleração ou retardamento do tempo de ruptura da emulsão, sendo geralmente utilizado para retardar o tempo de ruptura. A FHWA (2004) indica os valores de 0% a 2% como percentuais a adicionar na mistura, não recomendando o seu uso em dias mais frios.

O aditivo químico é utilizado também nas situações onde a temperatura ambiente é maior que 30°C e/ou a mistura apresenta agregados muito reativos, apresentando elevados valores no ensaio de azul de metileno ($> 10\text{mg/g}$) e baixo equivalente de areia ($< 60\%$). Deve-se usar o aditivo na quantidade mais baixa possível que proporcione uma mistura homogênea e espalhamento uniforme, tendo em visto o excesso de aditivo retardar as propriedades de cura e coesão da mistura, dificultando a liberação ao tráfego (CERATTI; REIS, 2011).

As fibras, outro aditivo a ser considerado na mistura de MRAF, funcionam como um aditivo de reforço visando à melhoria do comportamento do revestimento quando aplicado sobre pavimentos trincados, permitindo retardar as operações de reforço estrutural nas rodovias (SANTOS; REIS, 1999).

Quanto à natureza, as fibras podem ser classificadas em geral como orgânicas (acrílicas, poliéster, polietileno, polipropileno) ou minerais (fibras de vidro), possuindo comprimento entre 2 e 4mm, sendo sua dosagem dependente do tipo, forma e número de fibras/m² a serem empregadas, variando entre 0,1% e 0,5% em peso do agregado (CERATTI; REIS, 2011).

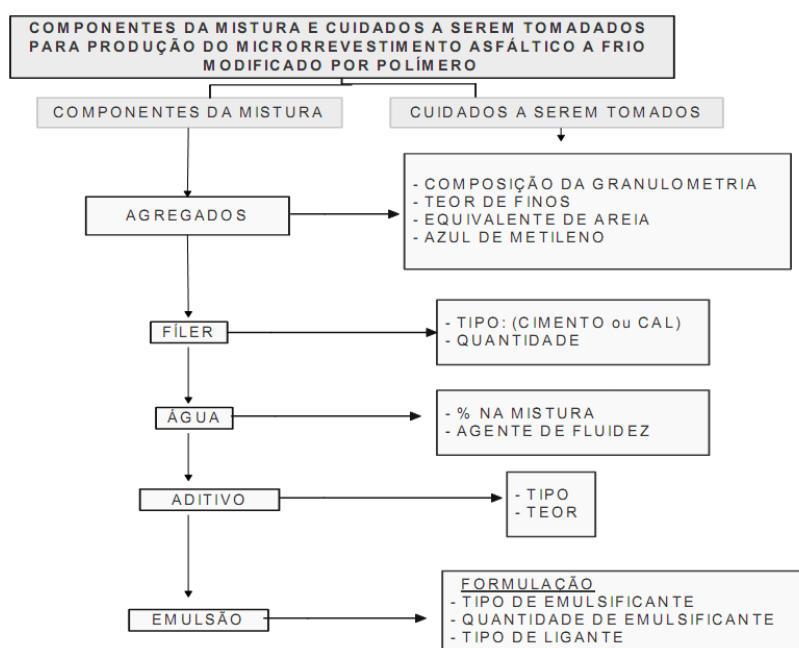
A utilização de fibras, combinada às propriedades do ligante elastomérico, proporciona ao MRAF ganhos nas suas características como um bom comportamento a temperaturas extremas, melhoria das propriedades reológicas, excelente flexibilidade e resistência, melhoria das características de drenagem superficial e aderência dos pneus ao pavimento, além de aumentar a coesão do sistema, em particular a resistência à tração e ao cisalhamento (SANTOS; REIS, 1999).

Outro componente entre os materiais constituintes do MRAF é a água, responsável pela consistência inicial da mistura, estando presente na emulsão e podendo estar presente no agregado. A sua introdução nos componentes da mistura deve estar de acordo com o projeto. A água deve ser limpa, isenta de matéria orgânica, óleos e outras substâncias prejudiciais à ruptura da emulsão asfáltica, sendo empregada a quantidade necessária para promover a consistência adequada (DERT-ES-P 20/00).

Misturas contendo pouca quantidade de água podem ser muito difíceis de espalhar, prejudicando tanto a execução como a adesão ao pavimento existente. No caso de misturas com mais de 12% de água em peso de agregado seco, elas podem se tornar muito fluidas e segregadas. Em geral, a taxa de água na composição da mistura deve variar entre 6% e 11% em peso da composição de agregados (CERATTI ; REIS, 2011).

Observando os componentes da mistura e os possíveis efeitos relacionados à utilização de cada material constituinte do MRAF, Reis (2005) elaborou um fluxograma apresentando os componentes da mistura e os cuidados a serem observados. O autor ressalta que para um bom desempenho da técnica do MRAF é necessário um correto controle tecnológico de qualidade. A Figura 2.13 ilustra o fluxograma comentado.

Figura 2.13 - Componentes da mistura de MRAF e cuidados a serem observados



Fonte: Reis (2005).

Segundo a ABEDA (2010) o consumo teórico de materiais pode ser estimado pela Tabela 2.13, sendo que as taxas apresentadas fornecem apenas uma orientação referente às espessuras previamente definidas sobre uma superfície lisa e uniforme.

Tabela 2.13 - Consumo teórico de materiais para o MRAF

FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DNIT 035/2005 - ES	I	II	III
Espessura acabada (mm)	4 a 15	6 a 20	12 a 37
Mistura seca de agregados (kg/m ²)	5 a 19	8 a 16	15 a 30
Emulsão asfáltica com polímeros (kg/m ²)	0,5 a 1,5	0,9 a 2,0	1,5 a 3,0

Fonte: ABEDA (2010).

2.4.2.3 Projeto e dosagem do MRAF

Na elaboração do projeto de dosagem de microrrevestimento asfáltico é muito importante avaliar as condições estruturais do pavimento para que os mesmos não apresentem problemas estruturais. A fim de definir a espessura e a faixa granulométrica do MRAF a ser aplicado, é fundamental conhecer o máximo de informações possíveis da rodovia existente, nível de desgaste, deterioração, fissuras, deformações permanentes e outras características (REIS, 2005).

Os procedimentos adotados no projeto de dosagem têm como finalidade determinar a composição dos materiais do MRAF e assegurar a compatibilidade entre eles, tendo em vista que não se garante uma mistura com características físico-químicas adequadas somente pela utilização de materiais de boa qualidade (CERATTI; REIS, 2011).

A adequação dos materiais aos critérios técnicos requeridos aos constituintes do revestimento é desejável em qualquer projeto rodoviário. A incompatibilidade dos materiais com a emulsão asfáltica deve ser observada, pois acarreta em problemas como redução do tempo de cura da mistura, sendo necessário o uso de aditivos que devido ao custo elevado pode inviabilizar o emprego da técnica (CASTRO, 2011; FHWA, 2004).

De acordo com Ceratti e Reis (2011), os procedimentos de dosagem do MRAF são empíricos e envolvem ensaios de laboratório e observações em campo com o objetivo de realizar um inventário da superfície (observar o grau de regularidade superficial, desgaste, deformações, trincas, fissuras etc, a fim de definir a espessura e faixa granulométrica de projeto), determinação das condições climáticas (observar época do ano, precipitações, temperatura do pavimento) e informações referentes ao tráfego local (identificar o tipo e a natureza do tráfego a que o MRAF será submetido).

De maneira geral, Ceratti e Reis (2011) afirmam que o projeto de dosagem de MRAF deve apresentar as proporções de agregados, fíler, água, emulsão (RC1C-E) e aditivos (se necessário), baseados no peso seco do agregado. Entretanto, caso seja necessário, pode-se realizar em obra algum eventual ajuste quanto à quantidade dos componentes envolvidos desde que observadas às tolerâncias previstas em projeto.

Ceratti e Reis (2011) e Santos e Reis (1999) indicam uma sequência de atividades a serem realizadas durante o projeto de dosagem do MRAF:

- a) seleção e caracterização dos materiais;
- b) seleção da faixa granulométrica de projeto;
- c) determinação da graduação individual e da composição dos agregados;

- d) avaliação da consistência da mistura (ensaio do cone);
- e) determinação do tempo mínimo de misturação;
- f) determinação do teor de aditivo regulador de ruptura, se previsto no projeto;
- g) realização de ensaios mecânicos para a determinação do teor ótimo de ligante:
 - determinação da perda por abrasão úmida (WTAT);
 - determinação do excesso de asfalto e adesão de areia (LWT);
- h) realização de ensaio mecânico para a determinação dos tempos de ruptura e cura da mistura:
 - determinação da coesão úmida (MCT);
- i) ensaio de desempenho do sistema:
 - determinação da adesividade (WST).

O programa experimental de dosagem do MRAF consiste na realização das atividades citadas no parágrafo anterior. As normas NBR 14948 (2003) e a ISSA A-143 (2010) orientam quanto à realização de ensaios e parâmetros a serem observados na determinação da dosagem do MRAF. Os ensaios indicados pelas referidas normas encontram-se na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Ensaios de compatibilidade e dosagem de MRAF

ENSAIO	NORMAS	ESPECIFICAÇÃO
Tempo mínimo de misturação (25°C)	TB-113 (1990) NBR-14758 (2001)	120 seg. (mínimo)
Determinação da adesividade de misturas	TB-114 (1990) NBR-14757 (2001)	Área coberta (90% mínimo)
Desgaste por abrasão úmida (WTAT)	TB-100 (1990) NBR-14746 (2001)	Após 1 hora de imersão: 538 g/m ² Após 6 dias de imersão: 807 g/m ²
Determinação da coesão da mistura	TB-139 (1990) NBR-14798 (2002)	30 min após moldagem: 12 kg.cm 1 hora após moldagem (liberação para o tráfego): 20 kg.cm
Determinação da adesão de areia pela máquina LWT	TB-109 (1990) NBR-14841 (2002)	538 g/m ² máximo

Fonte: Adaptado de Castro (2011).

Visando obter um bom desempenho da mistura, a ISSA A-143 (2010), Santos e Reis (1999) e a especificação DNIT 035/2005-ES indicam valores a serem observados quanto ao asfalto residual, fíler mineral e quantidade de polímero. As especificações sugeridas constam na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 - Parâmetros a serem observados na dosagem do MRAF

MATERIAIS	ESPECIFICAÇÃO		
Asfalto residual - ISSA A-143 (2010)	5,5% a 9,5% em peso em relação ao agregado (9,0% a 15% de emulsão)		
Asfalto residual - DNIT-ES 035 (2005)	Faixa I	Faixa II	Faixa III
	7,5 – 13,5%	6,5 – 12%	5,5 – 7,5%
Fíler mineral	0 a 3% em peso em relação ao agregado		
Conteúdo de Polímero	Porcentual mínimo de 3% sobre o teor residual de asfalto		
Aditivos	Quantidade para possibilitar a consistência da mistura - Projeto		
Água	Quantidade para possibilitar a consistência da mistura - Projeto		

Fonte: Adaptado de ISSA A-143 (2010), Santos e Reis (1999) e DNIT-ES 35 (2005).

A descrição dos ensaios constituintes do procedimento de dosagem será apresentada no capítulo referente à metodologia de pesquisa (ver capítulo 3).

2.4.2.4 Etapas construtivas do MRAF

De acordo com a especificação do DNIT 035/2005-ES, a aplicação do MRAF com emulsão polimérica deve ser feita com velocidade uniforme, a mais reduzida possível e se processa com bastante simplicidade. Entretanto, a especificação citada recomenda observar com atenção a consistência da massa através do controle de alimentação de água, de modo a obter uma consistência uniforme.

A especificação do DER/CE, DERT-ES-P 20/00, recomenda que seja observada uma sinalização eficiente para o caso onde a aplicação do MRAF seja feita em rodovias com tráfego, para isso sugere que o tráfego seja desviado da faixa a ser trabalhada (meia pista), em uma extensão mínima de 300m. Outro cuidado é inspecionar a faixa e assinalar qualquer trinca, fissura, ou outros pequenos defeitos do pavimento, os quais deverão ser corrigidos antes da aplicação do MRAF.

Segundo Ceratti e Reis (2011), antes da aplicação do MRAF alguns procedimentos devem ser observados como:

- a) avaliar corretamente as condições estruturais e funcionais do pavimento, bem como desgaste da superfície a ser tratada;
- b) limpar previamente a superfície a ser tratada com vassouras mecânicas e/ou jatos de ar comprimido;
- c) executar eventuais serviços de tapa-buracos e/ou defeitos existentes;
- d) demarcar e selar fissuras e trincas de baixa severidade, de origem não estrutural, com abertura até 6 mm, tratando-as com um sela-trincas ou com

emulsão asfáltica elastomérica apropriada, removendo qualquer produto selante antigo;

e) aplicar pintura de ligação para os casos onde é necessária. Geralmente a pintura de ligação não é requerida, porém sua utilização sobre pavimentos desgastados e envelhecidos/oxidados é recomendada, devendo-se esperar um tempo de cura mínimo de 0,5 a 2h para posterior aplicação de MRAF.

Reis (2005) recomenda que após a correção dos defeitos como selagem de fissuras, trincas, e pequenas deformações, os elementos indesejáveis que comprometam o desempenho da mistura devem ser retirados. A preocupação quanto à correta aplicação do MRAF não abrange somente o aspecto nacional. A FHWA (2004) relata uma série de procedimentos a serem observados quanto à utilização de MRAF, sendo que os mesmos foram obtidos através de estudos realizados em diversos estados americanos nos anos de 1991 e 1992.

Conforme a FHWA (2004) o microrrevestimento não deve ser aplicado em temperaturas inferiores a 10°C, se estiver chovendo ou caso tenha uma previsão de temperaturas inferiores a 0°C nas próximas 24h seguintes a aplicação. Podendo surgir falhas ou trincas quando aplicado nesse tipo de situação.

No caso de temperaturas altas ou se a umidade do ar estiver muito baixa, a ruptura da emulsão pode acontecer antecipada, ocasionando problemas como a retenção da água e retardando a cura interna. Nesse tipo de situação a formulação da emulsão deve ser ajustada ou deve-se utilizar um aditivo de controle do tempo de ruptura (FHWA, 2004).

Para casos onde a temperatura da pista é superior a 45°C, o pavimento deve ser previamente umedecido de forma a evitar a ruptura prematura da emulsão ao entrar em contato com a superfície existente. A ruptura prévia da emulsão dificulta o espalhamento da massa sobre a superfície prejudicando a aderência sobre o revestimento existente (CERATTI; REIS, 2011; CASTRO, 2011). A Figura 2.14 ilustra alguns dos procedimentos citados.

Figura 2.14 - Procedimentos para a preparação da superfície a ser aplicada o MRAF



Fonte: Castro (2011).

Uma vez preparada a superfície para a aplicação do MRAF, a mistura asfáltica é aplicada através de uma usina móvel apoiada sobre um chassi de caminhão, provida de silos de agregados, fíler, fibras, tanques individuais de emulsão asfáltica, água e aditivo, além de dispositivo misturador, caixa de distribuição e nivelamento, visando o espalhamento contínuo da mistura. A Figura 2.15 ilustra um modelo de usina móvel de MRAF.

Figura 2.15 - Usina móvel de MRAF



Fonte: Castro (2011).

De uma maneira geral, Santos e Reis (1999) enumeram as etapas de fabricação da mistura pela usina móvel da seguinte forma:

- a) entrada no misturador das proporções definidas em projeto de agregados, fíler, fibras, água e aditivo;
- b) homogeneização da mistura sem adição de ligante;
- c) adição da emulsão modificada por polímeros;
- d) mistura e homogeneização da massa asfáltica de MRAF;
- e) descarga da mistura na caixa espalhadora.

Na distribuição do MRAF deve-se observar o sistema misturador e de distribuição da usina de forma a ambos funcionarem de forma contínua e homogênea, espalhando a massa asfáltica sobre a superfície de maneira uniforme, cuja largura deve ser regulada de acordo com a faixa de rolamento. Dessa forma, a taxa de aplicação de MRAF feita pela usina varia em função da graduação dos agregados, da espessura e do estado da superfície, situando-se em geral entre 10 e 30 Kg/m² (CERATTI; REIS, 2011).

Observando as diferentes recomendações quanto às faixas granulométricas de construção do MRAF, verificam-se indicações divergentes quanto aos valores das taxas típicas a serem aplicadas em campo. A Tabela 2.16 lista os valores sugeridos pela NBR 14948 (2003), DNIT-ES 35 (2005), ISSA A 143 (2010) e DERT-ES-P 20/00.

Tabela 2.16 - Taxas de aplicação típicas de MRAF

Faixa Granulométrica	Usos Gerais	Espessura (mm)	Valores típicos (kg/m ²)
Faixa A (NBR)	Vias de média intensidade de tráfego e aeroportos Tráfego em vias urbanas, residência e aeroportos.	-	5,0 - 11,0
Faixa I (DNIT)		4 - 15	5,0 - 19,0
Faixa I (DER/CE)		-	5,0 - 18,0
Tipo II (ISSA)		-	5,4 - 10,8
Faixa B (NBR)	Vias de média a elevada intensidade de tráfego	-	8,0 - 18,0
Faixa II (DNIT)		6 - 20	8,0 - 16,0
Faixa II (DER/CE)		-	8,0 - 16,0
Tipo III (ISSA)		-	8,1 - 16,3
Faixa C (NBR)	Vias de média a elevada intensidade de tráfego	-	15,0 - 30,0
Faixa III (DNIT)		10 - 30	15,0 - 30,0

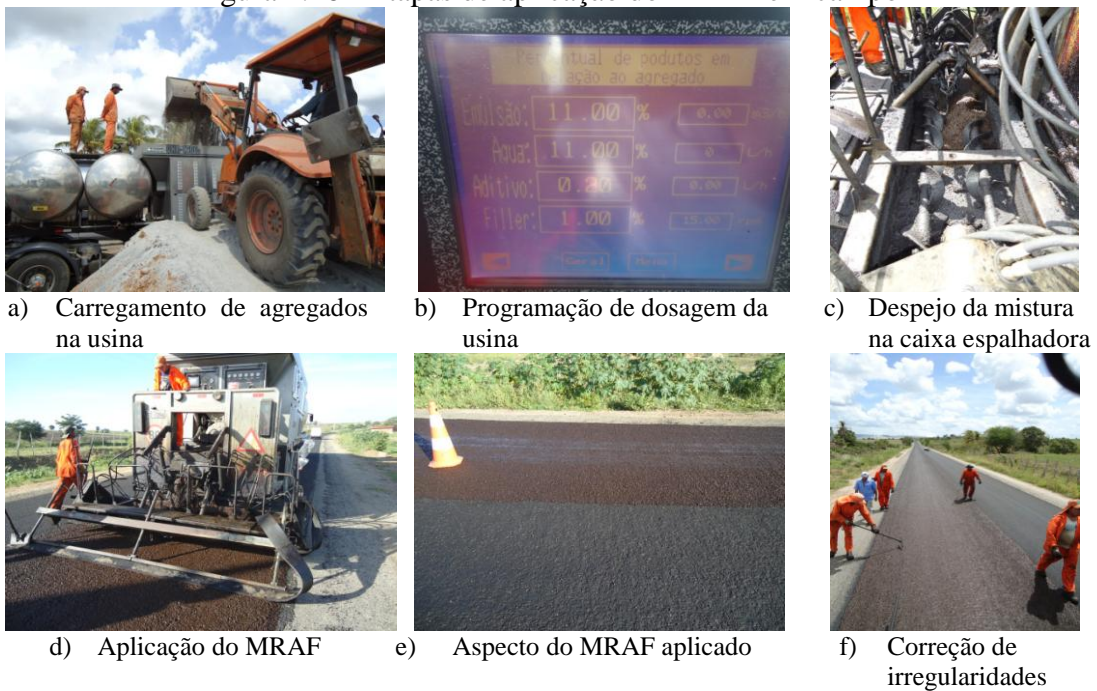
Fonte: Adaptado de Reis (2005).

De acordo com Ceratti e Reis (2011) para espessuras superiores a 6mm (Faixa I), 8mm (Faixa II) ou 13mm (Faixa III), a aplicação em duas camadas é recomendada. A primeira camada é denominada de regularização ou arraste, sendo aplicada para o

preenchimento dos pontos mais baixos e reestabelecimento do perfil transversal. A segunda camada, denominada de rolamento ou texturização, visa atender aos parâmetros de aderência e conforto.

Para Santos e Reis (1999), a espessura das camadas de aplicação de MRAF pode variar de 8 a 15mm, podendo chegar a 20mm em função do tamanho dos agregados utilizados. A aplicação pode ser realizada em uma única camada ou em uma dupla camada direta ou invertida, caso seja espalhada na forma invertida, a primeira deve conter agregados de tamanho inferior aos da segunda. A Figura 2.16 ilustra o processo de aplicação do MRAF em campo.

Figura 2.16 - Etapas de aplicação do MRAF em campo



Fonte: Adaptado de Castro (2011)

Uma vez aplicado o MRAF, se faz necessário aguardar o início de ruptura da emulsão e em seguida a cura da mistura para posterior liberação ao tráfego. Em média após 1h da realização da aplicação, uma equipe percorre o trecho recém-executado com o objetivo de verificar a ocorrência de desprendimento dos agregados ao trafegar sobre o mesmo (CASTRO, 2011).

2.4.3 *Cape Seal (CS)*

2.4.3.1 *Conceituação e aplicações do cape seal*

O *Cape Seal* é um revestimento asfáltico delgado pertencente ao grupo dos tratamentos de superfície. Consiste basicamente na junção de uma camada de tratamento superficial simples (TSS) e uma camada superior de microrrevestimento asfáltico (MRAF) de forma a melhorar a qualidade de rolamento, fechando os vazios do TSS e reunindo as propriedades desejáveis de ambos os revestimentos isoladamente.

Ao utilizar o TSS na 1ª camada, geralmente entre 9 e 13 mm de espessura, o *cape seal* possibilita ao revestimento características como reabilitação e flexibilidade em pavimentos com trincas não ativas. A selagem do TSS com o MRAF (2ª camada) favorece a impermeabilização e rugosidade ideal para garantir a segurança e conforto à circulação dos usuários da rodovia (ABEDA, 2010).

A combinação dessas características proporciona uma solução econômica, uniformizando e protegendo a superfície, possibilitando uma conservação, reabilitação ou construção de um pavimento mais eficiente. A utilização do *cape seal* é indicada para reabilitação de pavimentos sujeito a tráfego médio ou pesado e/ou na construção de novas rodovias e vias urbanas (ABEDA, 2010). A Figura 2.17 ilustra o esquema construtivo do *cape seal*.

Figura 2.17 - Revestimento *cape seal*



a) Esquema construtivo do *cape seal*

b) Interface TSS/*Cape seal*

Fonte: Autor (2013).

Morian (2011) define o *cape seal* como uma aplicação de TSS coberta por uma camada de lama asfáltica, geralmente aplicada quando a solução isolada da lama asfáltica não é suficiente, mas ainda não se verifica a necessidade pela utilização de uma camada asfáltica mais onerosa. O autor apresenta como desvantagem da utilização do *cape seal*, o fato do

mesmo requerer na sua construção os equipamentos individuais para cada tratamento (TSP e lama asfáltica), além de um tempo maior para construção da técnica.

A aplicação da técnica da lama asfáltica sobre TSS é citada previamente à utilização do MRAF, quando historicamente atuava como forma de reabilitação, aumento da qualidade e prorrogação da vida útil da superfície do pavimento, além de ser um procedimento econômico, preventivo e corretivo (LEE, 1978).

De maneira geral, o revestimento do tipo *cape seal*, quando bem construído, proporciona uma superfície densa e de boa resistência à derrapagem com longa vida de serviço. Ao utilizar lama asfáltica ou microrrevestimento asfáltico sobre o TSS, eliminam-se os problemas de agregados soltos e se reduz o ruído do tráfego (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

A questão econômica envolvida na decisão pela melhor alternativa de tratamento de superfície, visando a atender os requisitos de projeto, requer uma análise das características locais e não pode ser observada isoladamente.

O estudo técnico concebido através da construção de um trecho experimental realizado por Oliveira, David e Ceratti (2004), no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, apresenta como resultado uma vantagem econômica de 23% quando empregado o revestimento *cape seal* (TSS/lama asfáltica) em relação a um TSD/capa selante. No caso de um *cape seal* (TSS/MRAF de 7mm) em relação ao TSD/capa selante, os custos foram mais próximos, entretanto ainda mais baixos. Os custos dos serviços tiveram como base os preços vigentes na época (maio/2004) e foram fornecidos pela equipe de economia rodoviária do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER/RS).

Para Solaimanian e Kennedy (1998), a utilização de *cape seal* como tratamento de superfície se apresenta mais oneroso do que um revestimento do tipo TSS, no entanto o *cape seal* apresenta melhor relação benefício/custo, tendo em vista o ganho considerável na vida útil do pavimento. A utilização da técnica do *cape seal* apresenta diversas vantagens listadas por vários estudiosos do tema. A ABEDA (2010) lista as principais vantagens para diferentes critérios conforme apresentado na Tabela 2.17.

Tabela 2.17 - Vantagens da técnica do *cape seal*

DURABILIDADE	A inserção do MRAF ou Lama asfáltica nos interstícios dos vazios do TSS proporciona a criação de uma barreira física, criando uma vedação densa da mistura, com no máximo 2 a 3% de vazios. A baixa permeabilidade a água e ao ar proporciona um aumento de durabilidade.
RESISTÊNCIA A DERRAPAGEM	O <i>cape seal</i> é resistente à derrapagem, pois o MRAF apresenta rugosidade ideal a fim de garantir segurança e conforto no rolamento.
REDUÇÃO DE RUÍDO	O <i>cape seal</i> apresenta menor nível de ruído que o TSD.
ACABAMENTO UNIFORME	A maior uniformidade de acabamento do revestimento <i>cape seal</i> em relação ao tratamento superficial deve-se as diferentes formas de confecção dos revestimentos. O MRAF é fabricado por mistura em uma usina móvel.
MAIOR EFICIÊNCIA DA SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	O <i>cape seal</i> é um melhor substrato para a sinalização horizontal do que o TSD, pois proporciona uma maior retrorefletividade e devido ao seu curto tempo de liberação ao tráfego a sinalização é realizada mais rapidamente.
ECONOMIA	O emprego do <i>cape seal</i> (TSS + MRAF) apresenta custo semelhante ao TSD com capa selante, podendo ter vantagens compensadoras no desempenho técnico.

Fonte: ABEDA (2010).

Além dos aspectos apresentados na Tabela 2.17, o *cape seal* apresenta como vantagens o excelente aspecto visual e o fato de ser totalmente receptivo a outra intervenção que se faça necessário, devido a boa interface para futuras restaurações.

2.4.3.2 Considerações sobre o emprego do *cape seal* no cenário internacional

Conforme Fonseca, Giovanetti e Massaranduba (2004), a teoria mais apropriada para o surgimento dessa nova técnica teria ocorrido da necessidade de revitalização e inibição da degradação da camada de rolamento. A solução imaginada se daria através da aplicação de misturas densas, visando o preenchimento dos vazios ocasionado pelo desprendimento dos agregados do TSS. De acordo com esses autores, vários países reivindicam para si a origem da técnica do *cape seal*, principalmente países onde o principal revestimento utilizado é o tratamento superficial construído sobre base granular, tais como Nova Zelândia, África do Sul e Austrália.

Segundo a ABEDA (2010), o princípio da aplicação do que atualmente denomina-se de *cape seal* começou em 1950 na África do Sul, na província de Cape, utilizando um pré-misturado a quente com pó de pedra e asfalto sobre uma camada de TSS com agregado de 19mm (3/4”), concebido inicialmente somente para construções novas com Volume Diário Médio (VDM) de até 300 veículos pesados por dia.

Com o tempo, a África do Sul realizou melhorias na técnica que no ano de 1957 levaram a uma metodologia de aplicação de *cape seal* em dois processos. Um processo consistia na aplicação de uma camada de TSS (13mm) revestida por uma camada de lama asfáltica, enquanto o outro processo utilizava uma camada de TSS (19mm) revestida por duas

camadas de lama asfáltica, sendo a determinação do tamanho do agregado realizada em função do nível de tráfego (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Na Austrália, utilizou-se lama asfáltica sobre o TSS no início dos anos 60, assim como na África do Sul, sendo inicialmente concebida para rodovias novas. Na prática Australiana a lama asfáltica era aplicada sobre uma camada de TSS para melhorar o rolamento e incrementar a durabilidade. Mais recentemente o processo tem sido utilizado de maneira indireta, substituindo a lama asfáltica pelo microrrevestimento asfáltico como camada de reabilitação sobre o TSS e como rejuvenescimento e preenchimento dos vazios (ABEDA, 2010; SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Nos Estados Unidos as primeiras aplicações de CS ocorreram no fim da década de 1970, mas segundo Solaimanian e Kennedy (1998) o revestimento do tipo *cape seal* não é amplamente praticado nos Estados Unidos, tendo os estados de Virgínia, Califórnia e Texas, como representantes entre os poucos estados que vem utilizando a técnica. Em 1984, alguns projetos envolvendo a aplicação de *cape seal* em estradas vicinais e áreas residenciais foram realizados no norte da Califórnia, nas cidades de Salinas e Sacramento.

No estado da Virgínia, Solaimanian e Kennedy (1998) relatam a existência de três projetos utilizando o *cape seal* em estradas montanhosas da região. Em um dos trechos os autores comentam que houve uma diferença de 30 dias entre a construção do tratamento superficial por penetração (TSP) e a aplicação do MRAF, neste caso problemas relacionados a uma perda de agregado considerável foi observada. Nos outros dois projetos, a diferença entre a aplicação do TSP e MRAF foi somente de três dias, apresentado um desempenho muito bom. Os autores ainda reforçam que nesses dois últimos projetos, o custo da construção do *cape seal* foi em torno de 50% do custo de uma mistura a quente tradicionalmente aplicada como camada de sobreposição (38mm).

No estado do Texas, a aplicação conjunta de TSS e MRAF surgiu em decorrência dos problemas relacionados à utilização das técnicas individualmente. Constataram-se problemas de trincas de reflexão que se desenvolveram rapidamente em áreas onde o MRAF foi aplicado (sobre pavimentos com trincas por fadiga ou do tipo couro de jacaré). Para o TSP, problemas relacionados à perda de agregado foram observados. Assim, os dois procedimentos foram combinados de forma a proporcionar os benefícios de ambos (melhor prevenção à reflexão de fissuras e menor permeabilidade do TSP, em conjunto com a retenção de agregados e resistência à derrapagem do MRAF), evitando as desvantagens de cada um isoladamente (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Solaimanian e Kennedy (1998) em um projeto financiado pelo *Texas Department of Transportation* (TxDOT) e em parceria com a *University of Texas at Austin* realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a técnica do *cape seal* como um processo alternativo para reabilitação de pavimentos. O projeto de pesquisa teve duração de um ano e percorreu muitos trechos onde o *cape seal* foi utilizado no estado do Texas, constatando sucessos e falhas na utilização da técnica. As principais falhas observadas nos pavimentos estudados estavam relacionadas com fissuras, exsudação e problemas de deformação superficial.

A escolha do estado do Texas como local de realização do estudo ocorreu pelo fato do mesmo estar entre os poucos estados americanos que usa o *cape seal* como manutenção preventiva ou estratégia de reabilitação, entretanto, a técnica é limitada a alguns de seus distritos. Embora alguns distritos tenham como prática comum à utilização de MRAF como reabilitação de uma camada antiga de tratamento superficial, desde o início dos anos 90 tem-se aplicado TSS e MRAF sequencialmente (uma camada de MRAF sobre uma camada nova de TSS) para o projeto de construção (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Solaimanian e Kennedy (1998) ressaltam que em alguns distritos do Texas, projetos originalmente de TSP e posteriormente revitalizados com o MRAF (TSP/MRAF) foram elaborados visando um ganho na vida útil dos pavimentos em torno de 3 a 5 anos. No entanto, a experiência da África do Sul tem mostrado que projetos de revestimento com *cape seal* tem apresentado boas condições de rolamento mesmo quando exposto ao tráfego pesado por 7 a 10 anos.

Como parte da pesquisa, Solaimanian e Kennedy (1998) realizaram uma série de experimentos em laboratórios, mais especificamente permeabilidade, cisalhamento e *loaded wheel test* (LWT). A avaliação laboratorial tinha como objetivo analisar os seguintes itens:

- a) resistência à deformação do *cape seal* em comparação ao microrrevestimento;
- b) ligação TSS/MRAF;
- c) resistência ao cisalhamento na interface TSS/MRAF com outras camadas;
- d) permeabilidade do MRAF em comparação a permeabilidade do TSS/MRAF.

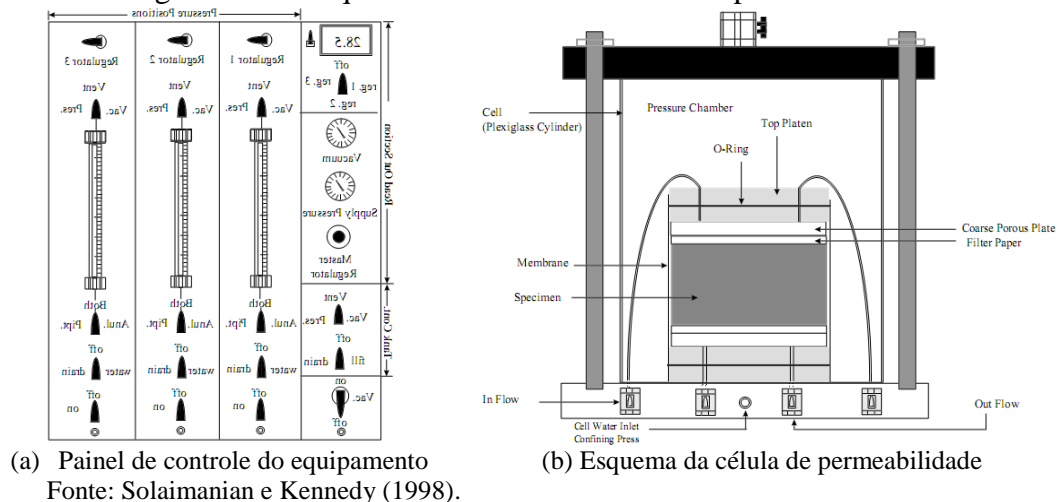
De acordo com Solaimanian e Kennedy (1998), o teste de permeabilidade de misturas asfálticas compactadas é importante para a questão do fluxo de ar e água no pavimento, devido aos danos causados especialmente nas camadas granulares, como também para o envelhecimento da mistura asfáltica promovido pelo ar.

A razão pela qual os autores resolveram estudar o comportamento da lama asfáltica e MRAF quanto à permeabilidade se deu devido à observação de altos níveis de

vazios em alguns casos, tendo em vista a técnica evitar problemas prematuros relacionados ao dano por umidade se utilizado individualmente. O risco de permeabilidade elevada é a segunda maior razão para a não utilização do MRAF sozinho, a primeira é o risco de reflexão de trincas.

As amostras utilizadas no ensaio de permeabilidade foram ensaiadas em laboratório e consistiram de corpos de prova de MRAF (Faixa II DNIT) com 18% de vazios, e de uma mistura a quente (HMAC – *Hot Mix Asphalt Concrete*) com um teor de vazios de 5 a 6%. Também foram utilizados corpos de prova extraídos do campo, consistindo de HMAC + Cape Seal e HMAC + Antigo TSS + MRAF, cujos teores de vazios não estavam disponíveis. No ensaio foi utilizado um permeômetro em célula e um fluxo de água controlado por painel. A Figura 2.18 ilustra o equipamento.

Figura 2.18 - Esquema ilustrativo do ensaio de permeabilidade



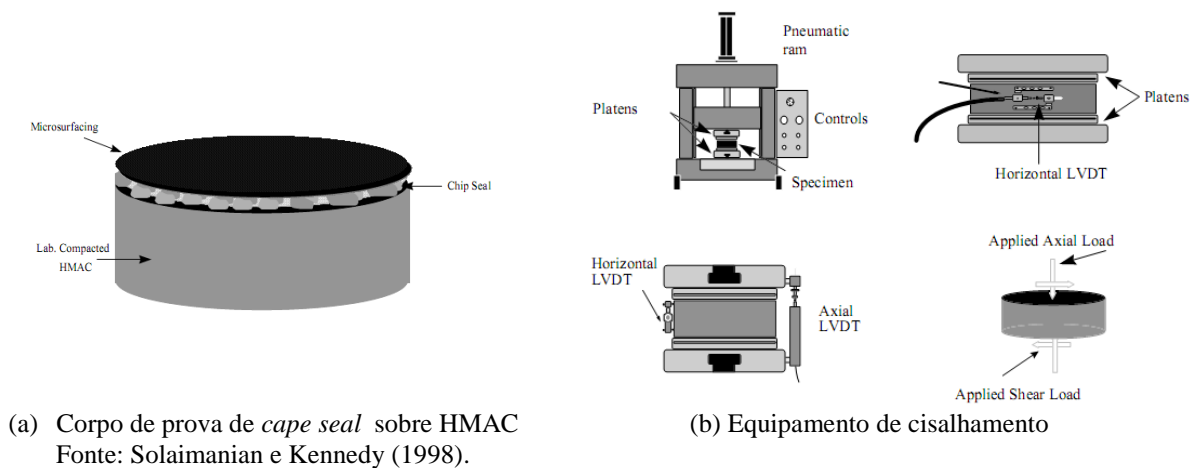
Os resultados obtidos pelos pesquisadores constataram que de maneira geral os corpos de prova de MRAF preparados em laboratório, mesmo com teor de vazios bem maiores que os da mistura a quente, tiveram valores de permeabilidade menores do que os corpos de prova HMAC, sendo os menores valores de permeabilidade verificados para os corpos de prova de campo que tinham uma camada de *cape seal*.

Os testes de cisalhamento realizado por Solaimanian e Kennedy (1998) tinham como principal razão de estudo avaliar a força de ligação entre o TSS e a camada inferior de HMAC, bem como o TSS e a camada superior de MRAF. A camada de *cape seal* (TSS/MRAF) foi moldada em cima de uma camada de HMAC construída em laboratório.

O equipamento de teste utilizado foi capaz de aplicar cisalhamento e carregamento vertical para a amostra ensaiada, através de dois mecanismos de aplicação das

cargas que atuam simultaneamente, possibilitando também testes dinâmicos e estáticos. Utilizaram-se dois *Linear Variable Differential Transducers (LVDTs)* para medir deformações em ambas as direções. Durante o teste, a altura do corpo de prova foi mantida constante através do atuador vertical, enquanto uma carga de cisalhamento foi aplicada ao mesmo. A Figura 2.19 ilustra esquematicamente o modelo ensaiado e o equipamento utilizado.

Figura 2.19 - Esquema ilustrativo do ensaio de cisalhamento



Após a realização dos testes as interfaces entre a camada de HMAC e TSS, bem como a interface entre a camada de TSS e MRAF (*cape seal*) foram investigadas. Algumas das falhas foram atribuídas ao movimento do MRAF com relação ao TSS. No entanto, a maior parte do movimento aconteceu devido ao deslocamento associado do TSS/MRAF, ou seja na ligação entre o TSS e a camada de HMAC.

Quanto ao teste de LWT, os pesquisadores Solaimanian e Kennedy (1998) tinham como objetivo verificar a exsudação e deformação permanente do *cape seal* em comparação a utilização isolada do MRAF. O ensaio LWT é concebido para verificar o teor máximo de ligante, podendo também determinar a magnitude da deformação plástica na mistura.

Através dos ensaios os autores verificaram que os corpos de prova de MRAF sem a camada inferior de TSS apresentaram excelente comportamento, sem sinais de exsudação ou deformação permanente. Já para o *cape seal*, os autores concluíram que o ensaio não se mostrou adequado. Foram observadas falhas e problemas de deformação permanente, sendo que os autores constataram que os problemas não estavam relacionados ao *cape seal*, mas sim a instabilidade do corpo de prova na realização do ensaio. Os testes mostraram também a importância de uma boa ligação entre o TSS e a camada abaixo do pavimento, indicando que

mesmo nos casos onde se tem uma ótima ligação entre o TSS e o MRAF, se faz necessário uma forte ligação entre o TSS e a camada inferior.

A pesquisa realizada por Solaimanian e Kennedy (1998) apresentou resultados pontuais sobre a avaliação do *cape seal* quanto aos parâmetros de permeabilidade, cisalhamento e os principais defeitos na sua utilização. Baseado na observação de trechos construídos em campo e através dos ensaios realizados em laboratório, os autores elaboraram um conjunto de diretrizes visando melhorar a aplicação da técnica.

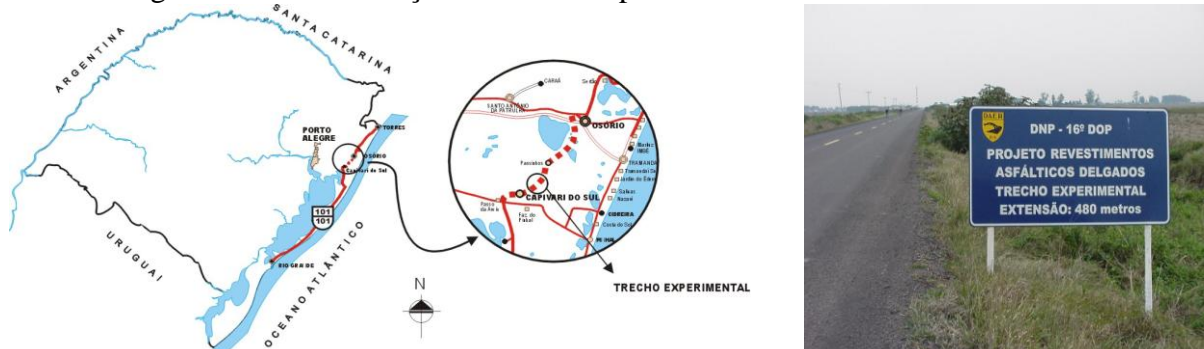
2.4.3.3 Considerações sobre o emprego do *cape seal* no Brasil

A aplicação de *cape seal* no Brasil tem sido constatada de maneira isolada em aplicações pontuais, apesar das diversas vantagens apresentadas. Verifica-se a existência de poucos estudos técnicos que relatem as suas características quanto aos aspectos de desempenho em campo.

Para o caso brasileiro, a ABEDA (2010) apresenta como marco inicial a execução do trecho experimental na BR 101 (RST/101) entre Osório e Capivari, executado pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) no início de 2002. Posteriormente, a técnica foi adotada na Rodovia Presidente Castelo Branco em São Paulo.

De acordo com Oliveira, David e Ceratti (2004), o estudo do trecho experimental da RST/101 foi idealizado como uma alternativa técnica, visando analisar uma solução que proporcionasse um melhor acabamento e aumento da durabilidade do revestimento estudado em relação aos tratamentos superficiais, tipo de revestimento adotado em cerca de 1/3 da malha pavimentada das rodovias do Rio Grande do Sul. A Figura 2.20 ilustra a localização do trecho experimental executado.

Figura 2.20 - Localização do trecho experimental executado na RST/101



Fonte: Oliveira, David e Ceratti (2004).

O principal objetivo do estudo foi verificar o comportamento do *cape seal* em campo, comparativamente a um revestimento em tratamento superficial duplo com capa selante durante um determinado período de tráfego. Além dessa análise, pretendia-se verificar também o comportamento do *cape seal* constituído de TSS/MRAF e um *cape seal* constituído de TSS/lama asfáltica.

Visando a realização de estudos comparativos, o trecho experimental foi dividido em dois segmentos de 240m. A Tabela 2.18 apresenta os tipos de revestimentos executados e as características das camadas granulares. A pavimentação do trecho experimental ocorreu no mês de janeiro de 2002.

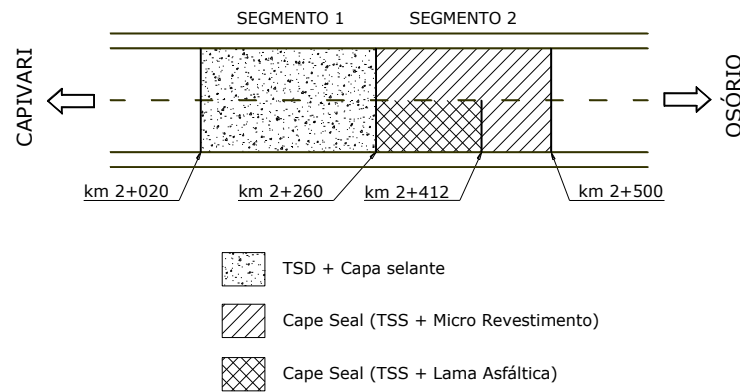
Tabela 2.18 - Estrutura do trecho executado na RST/101

CAMADAS	Segmento 1 km 2+020 ao km 2+260	Segmento 2 km 2+260 ao km 2+500
Revestimento	TSD com capa selante	<i>cape seal</i> - LD (TSS+lama asfáltica) <i>cape seal</i> - LE (TSS+microrrevestimento asfáltico)
Base	Brita graduada - 14 cm	brita graduada - 14 cm
Sub-base	Macadame seco - 18 cm	macadame seco - 18 cm
Subleito	Solo arenoso - $ISC \geq 12\%$	solo arenoso - $ISC \geq 12\%$

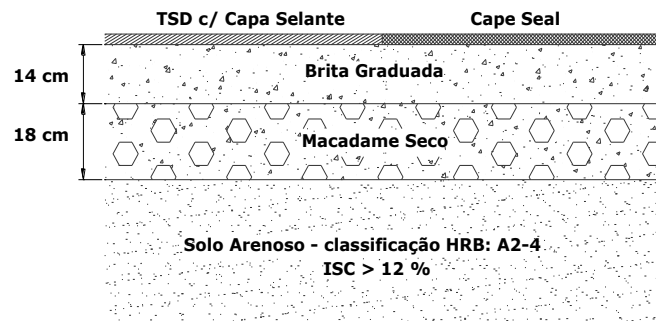
Fonte: Oliveira, David e Ceratti (2004).

A Figura 2.21 ilustra de forma esquemática a divisão do trecho experimental em estudo nos segmentos acompanhados.

Figura 2.21 - Esquema ilustrativo do trecho experimental executado na RST/101



a) Esquema ilustrativo dos segmentos (Vista superior)



b) Esquema ilustrativo do pavimento (Corte transversal)

Fonte: Oliveira, David e Ceratti (2004).

No segmento 1, revestimento em TSD com capa selante, o mesmo foi executado por penetração invertida em três camadas, por espalhamento sucessivo de ligante e agregado. Antes da aplicação da capa selante, o TSD sofreu varredura mecânica a fim de remover o material solto e garantir aderência da capa selante ao TSD (OLIVEIRA; DAVID; CERATTI, 2004).

Para o segmento 2, o revestimento *cape seal* foi executado em duas camadas, a primeira de TSS (liberada ao tráfego após um período mínimo de 48 horas), e a segunda de microrrevestimento asfáltico ou lama asfáltica (aplicada após sete dias de tráfego). Na meia pista, lado esquerdo, aplicou-se um microrrevestimento, faixa II (DNIT 035/2005 – ES) sobre o TSS, empregando emulsão asfáltica modificada com 3% de polímero SBS e mantendo as mesmas características da camada de lama asfáltica no referente à granulometria, teor de emulsão asfáltica e procedimentos construtivos (OLIVEIRA; DAVID; CERATTI, 2004). A Figura 2.22 ilustra a etapas de execução dos trechos e o aspecto visual dos mesmos após serem executados.

Figura 2.22 - Etapas de execução do trecho experimental executado na RST/101



Fonte: Oliveira, David e Ceratti (2004).

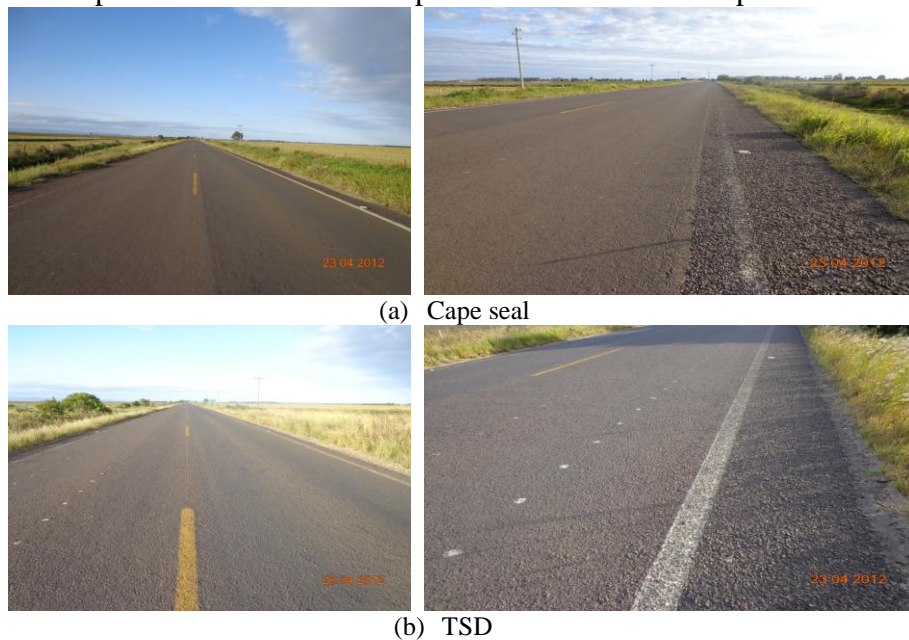
No monitoramento do trecho foi feita uma série de ensaios e medições periódicas como: contagem do tráfego, deflexões, avaliação visual do estado da superfície, irregularidade longitudinal, drenabilidade, mancha de areia e atrito superficial. Essas medições tinham como objetivo verificar o comportamento do trecho ao longo do tempo e da atuação das cargas e condições climáticas locais.

Entre 2002 e setembro de 2004, e com um tráfego atuante da ordem de $6,7 \times 10^5$, verificou-se através do monitoramento que os revestimentos apresentavam um bom estado de superfície. Ambos os segmentos apresentaram Índice de Gravidade Global (IGG) < 10 e valores médios das flechas nas trilhas de rodas menores que 5,0 mm. Quanto aos valores de resistência à derrapagem, ambos se encontravam dentro do limite aceitável com relação à segurança. Nos ensaios de mancha de areia e drenabilidade, verificou-se uma textura muito rugosa para o TSD e uma textura de média a rugosa para o *cape seal*, entretanto dentro dos limites aceitáveis. Ainda com relação ao ensaio de mancha de areia, observou-se uma tendência ao desgaste do material fino do MRAF ou da lama asfáltica, no entanto os autores alegaram que para o período de observação analisado os dados ainda não eram conclusivos (OLIVEIRA; DAVID; CERATTI, 2004).

De forma geral, os pesquisadores concluíram que para o período estudado os resultados da avaliação comportamental dos revestimentos apresentaram-se satisfatórios, e que os custos e as facilidades construtivas envolvidas no processo sugerem uma utilização promissora desse tipo de revestimento, tanto para rodovias como para vias urbanas.

Segundo informações adquiridas através de contato por e-mail em abril de 2012 com o engenheiro José Augusto de Oliveira (um dos autores do estudo realizado na RST/101 em 2002), no aspecto relacionado ao estado de superfície, o trecho executado ainda se encontra em condições muito boas. A Figura 2.23 ilustra o estado da superfície dos dois segmentos para a data de abril de 2012, constatando a boa condição de serviço da rodovia mesmo após 10 anos de passagem do tráfego real.

Figura 2.23 - Aspecto visual do trecho experimental da RST/101 após 10 anos de tráfego



Fonte: Eng. José Augusto de Oliveira (2012)

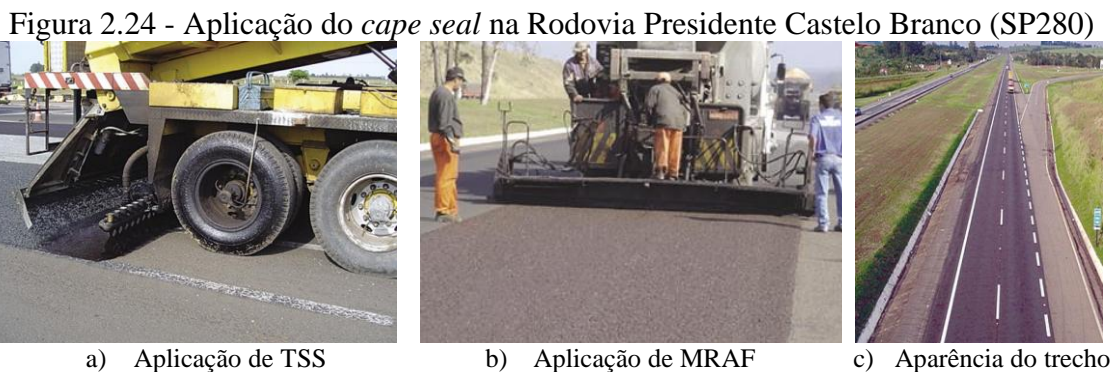
O engenheiro José Augusto de Oliveira considera o *cape seal* uma solução de intervenção e revitalização de pavimentos muito boa, além de ser uma solução adequada para uso como camada de rolamento de pavimentos novos, como foi o caso do trecho experimental da RST/101. Ainda de acordo com esse engenheiro, a técnica foi utilizada novamente, como alternativa de restauração em uma rodovia estadual do RS no ano de 2008, consistindo de aproximadamente 100 km de *cape seal*, e vem sendo aplicada por concessionárias do Paraná e São Paulo, como camada esbelta de rolamento, em rodovias de pista dupla e tráfego muitas vezes elevado.

No estado de São Paulo, as obras de recuperação realizadas na Rodovia Presidente Castelo Branco (SP280) marcaram o início da execução em larga escala de *cape seal* no Brasil. A técnica vem se consagrando como uma excelente alternativa de rejuvenescimento e manutenção de pavimentos, proporcionando melhor textura, maior aderência, impermeabilizando o substrato e aumentando a vida útil (FONSECA; 2005a). De acordo com

Fonseca, Giovanetti e Massaranduba (2004), a concessionária responsável pela aplicação do *cape seal* na Rodovia Castelo Branco, já havia executado mais de 500.000m² em outros projetos com resultados bastante satisfatórios.

Fonseca (2005b) ressalta que no início da construção da rodovia Castelo Branco se observou a necessidade de se adaptar o *cape seal* às condições dos agregados e do clima brasileiro, observando a necessidade de se desenvolver emulsões polimerizadas com características específicas para essa técnica, diferente das tradicionais utilizadas para TSP e MRAF.

Fonseca (2005a) comenta que a técnica do *cape seal* foi aplicada para a rodovia Castelo Branco como alternativa a solução inicialmente pensada que consistia de um TSD com emulsão modificada por polímeros. Devido ao bom resultado do *cape seal*, a técnica foi adotada como padrão para a restauração da rodovia e elogiada pelos técnicos que fazem a fiscalização das concessões no estado de São Paulo. A Figura 2.24 ilustra a aplicação do *cape seal* na rodovia Castelo Branco.



Fonte: Fonseca (2005a, 2005b).

Desde o início da aplicação da técnica que ocorreu em 2004 pela empresa concessionária da rodovia Castelo Branco, até o ano de 2006, já haviam sido aplicados mais de 1,5 milhões de m² de *cape seal* como solução de recuperação de estradas, obtendo total sucesso. Em outras rodovias como a SP255, cerca de 100.000 m² foram aplicados. Diante dos resultados apresentados, o *cape seal* tem sido adotado por outras concessionárias do estado de São Paulo (FONSECA, 2006).

No estado do Ceará, observa-se uma menor cultura pela utilização do *cape seal*, possivelmente, devido ao fato do TSD ter se consolidado como revestimento preferido da região. Outro fator também pode ser o menor uso da técnica do MRAF quando comparado aos outros estados da região Sul, Sudeste e do próprio Nordeste como Paraíba, Piauí e Rio Grande do Norte.

Castro (2011) relata, através informações obtidas com engenheiros rodoviários, situações onde o MRAF foi aplicado sobre uma camada antiga de TSD no estado da Paraíba, na tentativa de se obter um reforço na rigidez do pavimento. Apesar de o MRAF ser lançado sobre uma camada de TSD, a concepção do revestimento pode ser pensada como um revestimento do tipo *cape seal*. A Figura 2.25 Ilustra a execução do trecho comentado.

Figura 2.25 - Aplicação de MRAF sobre TSD no interior da Paraíba



Fonte: Castro (2011).

2.4.3.4 *Materiais e procedimentos de dosagem do cape seal*

Tendo em vista a concepção do *cape seal* consistir basicamente da sobreposição de uma camada de TSS por lama asfáltica ou MRAF, a determinação quanto aos materiais empregados no *cape seal* consiste basicamente na observação dos materiais definidos pelas especificações individuais de cada tipo de revestimento. Assim, observa-se que as especificações quanto ao tipo e características dos materiais constituintes do *cape seal* podem ser obtidas seguindo as recomendações da ISSA, DNIT, ABNT e DER/CE.

Quanto aos agregados, Fonseca, Giovanetti e Massaranduba (2004), comentam que as suas funções básicas se resumem em absorver e transmitir as cargas de roda à camada adjacente e criar um bom coeficiente de atrito. Para tanto, é necessário que os parâmetros de índice de forma, sanidade, boa graduação, boa adesividade e resistência à abrasão sejam respeitados. Logo, na escolha dos agregados, os parâmetros relacionados quanto à seleção dos mesmos devem ser observados nas respectivas especificações quanto ao uso de TSS, MRAF ou lama asfáltica (ABEDA, 2010; SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

A ABEDA (2010) ressalta a relação de vazios como outro fator de grande relevância, sendo obtida através das medições de *average least dimension* (ALD - média da menor dimensão do agregado) e da faixa granulométrica do agregado aplicado. Essas relações permitem uma sobreposição e ajuste entre as camadas de lama ou MRAF no TSS.

É recomendável que os agregados a serem utilizados sejam limpos e isentos de poeira, de forma a evitar a perda de resistência que pode surgir com problemas de ligação entre MRAF e TSS, bem como entre o TSS e a emulsão aplicada sobre o substrato (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Quanto ao ligante asfáltico a ser utilizado no *cape seal*, Fonseca, Giovanetti e Massaranduba (2004) recomendam o uso de emulsões asfálticas catiônicas dos tipos RL, RR, LARC (lama ruptura controlada) com ou sem polímero. A ABEDA (2010) indica a utilização de emulsão elastomérica do tipo RR2C-E para o TSS, devendo a emulsão possuir uma grande adesividade aos agregados, viscosidade que envolva bem o agregado e não escorra, e com tempo de ruptura e cura adequados para posterior aplicação do MRAF.

As especificações de serviço referente ao TSS recomendam a utilização de cimentos asfálticos (CAP-150/200) com ou sem polímeros e emulsões asfálticas tipo RR2C. Solaimanian e Kennedy (1998) também recomendam para a construção do *cape seal* as mesmas emulsões e ligantes adotadas na construção do TSS.

Para o MRAF, a ABEDA (2010) recomenda a utilização da emulsão elastomérica de ruptura controlada (RC1C-E), devendo proporcionar uma fluidez adequada ao MRAF visando o preenchimento uniforme dos vazios do TSS. A escolha pelas emulsões modificadas por polímeros elastoméricos proporciona um ganho nas propriedades adesivas e coesivas do TSS, além de maior resistência ao desgaste e atrito do MRAF.

Assim como na determinação dos materiais constituintes do *cape seal*, a determinação dos projetos de TSS e MRAF devem seguir os mesmos procedimentos de dosagem consagrados na literatura. Para o TSS, vários são os métodos de cálculo de taxas tanto de agregado como de emulsão. No caso do MRAF recomenda-se o procedimento de dosagem conforme recomendações da ISSA A-143 (2010) e/ou Ceratti e Reis (2011). No caso do *cape seal* as taxas assumem uma condição específica e são balizadas pelo sucesso das experiências anteriores (FONSECA; GIOVANETTI; MASSARANDUBA, 2004).

Com relação ao consumo teórico dos materiais utilizados na execução do *cape seal*, a ABEDA (2010) apresenta alguns valores indicativos que podem ser visualizados na Tabela 2.19.

Tabela 2.19 - Consumo teórico de materiais do *cape seal*

TRATAMENTO SUPERFICIAL SIMPLES		MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO	
MATERIAL	QUANTIDADE	MATERIAL	QUANTIDADE
Pedrisco 3/8"	7,0 kg/m ²	Pó de pedra	70%
		Pedrisco 3/8"	30%
		Cimento Portland ou Cal CH-I	1,0%
Emulsão RR2C ou RR2C-E	1,0 l/m ²	Água	8,0%
		Aditivo controlador de ruptura	Zero a 0,5%
		Emulsão RC1C-E	10,4%

Fonte: ABEDA (2010).

2.4.3.5 Etapas construtivas do *cape seal*

A construção do *cape seal* deve ser executada de forma cuidadosa, tendo em vista envolver a aplicação de duas camadas de revestimento (TSS e MRAF). Deverá haver uma organização clara e eficaz entre o responsável pela aplicação do TSS e do MRAF, lembrando que no *cape seal* as camadas trabalham de forma integrada e não devem ser tratadas separadamente (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Para se ter certeza quanto à qualidade do *cape seal* como revestimento de reabilitação ou como camada de rolamento de pavimentos novos, se faz necessário a exigência de bons materiais e mão de obra qualificada. É fundamental a observação de três componentes básicos de qualquer construção bem sucedida: seleção de materiais adequados, elaboração de um projeto de alta qualidade e técnicas de construção adequadas (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

A metodologia construtiva do *cape seal* se baseia essencialmente em duas etapas. A primeira consiste na execução da camada de TSS e a segunda pela aplicação da lama asfáltica ou MRAF de forma a preencher totalmente os vazios. Os projetos mais recentes vêm dando preferência à utilização do MRAF como segunda camada devido às vantagens que o mesmo proporciona na sua aplicação.

Fonseca, Giovanetti e Massaranduba (2004) recomendam que a execução do *cape seal* respeite alguns requisitos básicos que devem ser observados em função da finalidade envolvida na sua aplicação. Para casos de tratamentos de superfícies asfálticas já existentes (revitalização, reperfilagem, restauração, etc.) devem ser observados os seguintes pontos:

- a) tratamento da camada subjacente;
- b) limpeza;
- c) intervenção adequada e recomposição nos pontos onde existem: deformação, bombeamento, trilha de rodas, exsudação, etc.;

- d) reperfilamento com fresagem se necessário da camada a ser tratada.

No caso de implantação do *cape seal* em bases estabilizadas e como camada de rolamento de pavimentos novos, deve-se realizar a aplicação da imprimação impermeabilizante. Previamente a aplicação do TSS, deve-se executar uma varredura da pista imprimada ou pintada, de forma a eliminar todas as partículas de pó.

Conforme relatado em alguns trabalhos técnicos existentes sobre a execução do *cape seal*, observa-se como recomendações recorrentes a observação da cura do TSS com exposição ao tráfego por um período de 7 a 10 dias, para posterior aplicação do MRAF e/ou lama asfáltica. Solaimanian e Kennedy (1998) recomendam a exposição ao tráfego de 2 a 7 dias antes da aplicação do MRAF.

Nos casos onde ocorram problemas com o TSS eles devem ser resolvidos anteriormente à aplicação do MRAF. Problemas significantes de ondulação ou corrugação e exsudação têm sido constatados em situações onde ocorreu perda de agregado do TSS e o mesmo foi coberto com MRAF sem correção prévia (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

Antes da aplicação da camada de MRAF ou lama asfáltica, deve-se limpar toda a superfície do TSS por varrimento, de forma a remover as partículas soltas e outros materiais estranhos, garantindo maior aderência entre as duas camadas. Após a limpeza da rodovia, aplica-se o MRAF ou lama asfáltica e observa-se o processo de cura da emulsão asfáltica. Uma vez curada, a rodovia pode ser reaberta ao tráfego. A Figura 2.26 ilustra o processo construtivo do *cape seal*.

Figura 2.26 - Esquema ilustrativo de execução do *cape seal*.



(a) Aplicação de TSS

(b) Aplicação de MRAF

(c) *Cape seal* executado

Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

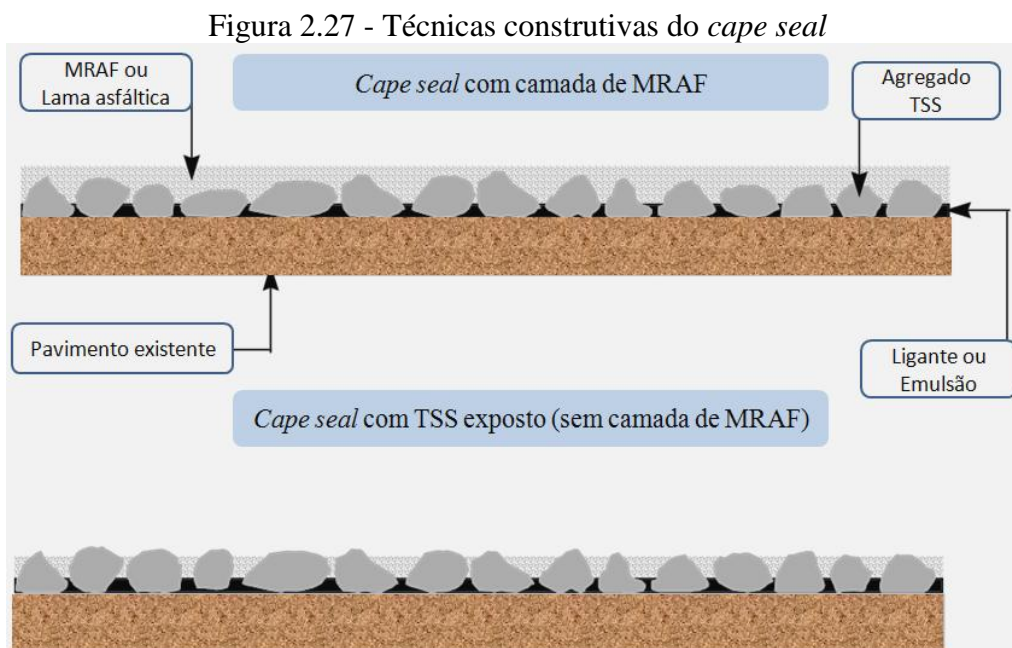
Segundo Solaimanian e Kennedy (1998) a aplicação da taxa de MRAF ou lama asfáltica pode ser feita de duas maneiras diferentes:

- a) aplicar uma taxa baixa o suficiente para somente completar os vazios entre os agregados da camada de TSS, dessa forma a taxa de MRAF ou lama

asfáltica aplicada é somente para preencher os vazios, sem formar uma camada sobre o TSS. Essa forma de aplicação resulta em um revestimento com o topo dos agregados do TSS exposto e um tratamento mais antiderrapante;

- b) aplicar uma taxa visando formar uma camada de MRAF ou lama asfáltica no topo do TSS, nesse caso é recomendável que a taxa seja alta o suficiente para criar uma fina camada, entretanto sem excesso.

De acordo com Solaimanian e Kennedy (1998) não existe uma preferência quanto à forma de aplicação do MRAF, entretanto recomenda-se que o MRAF seja aplicado a uma taxa baixa o suficiente para preencher os vazios ou apenas criar uma camada fina sobre o TSS. Em ambos os casos, o MRAF deve ter fluidez suficiente para preencher os vazios do TSS, proporcionando uma maior integração entre o MRAF e TSS de forma a evitar deslizamento entre a interface dos dois revestimentos. A Figura 2.27 ilustra o comentado.



Fonte: Adaptado de Solaimanian e Kennedy (1998).

Nos casos onde a permeabilidade é uma grande preocupação, após o período de cura pode-se utilizar um rolo pneumático de forma a compactar a lama asfáltica e tornar a superfície menos permeável (SOLAIMANIAN; KENNEDY, 1998).

2.5 Considerações sobre o agregado siderúrgico e sua aplicação na pavimentação

A utilização de fontes não renováveis está sendo cada vez mais desencorajada no ramo da pavimentação. Percebe-se ao longo dos anos uma crescente vertente sustentável nas diversas áreas da engenharia. Resíduos como a escória de aciaria (também chamada de agregado siderúrgico - AS), gerada na produção do aço, vem demonstrando ao longo dos anos uma possibilidade competitiva quanto à substituição do agregado mineral (brita) usualmente empregado nas obras rodoviárias (CAVALCANTE; PEREIRA; BARROSO, 2011).

A geração do agregado siderúrgico está intimamente ligada à produção do aço. De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr), em seu relatório de sustentabilidade de 2012, a produção de aço bruto no Brasil vem crescendo ao longo do últimos três anos, chegando em 2011 a uma marca de 35,2 milhões de toneladas de aço produzidas, colocando o Brasil entre os dez maiores produtores de aço do mundo. Esse crescimento vem se mantendo também para a América Latina e no geral da produção mundial.

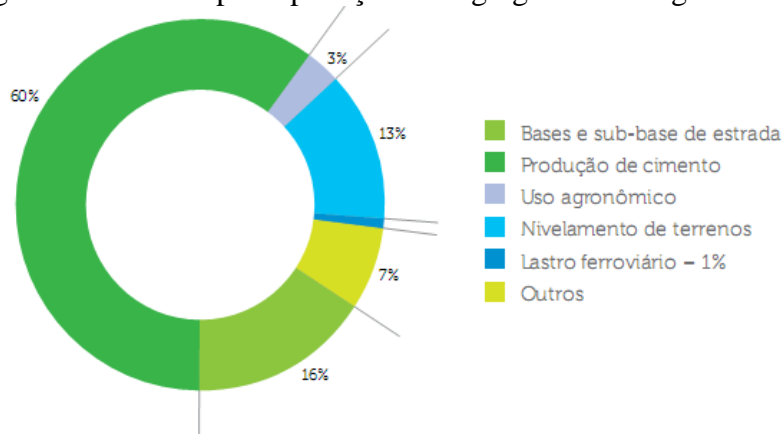
Conforme o IABr (2012), para cada tonelada de aço bruto produzido, 600kg de coprodutos e resíduos são gerados, chegando em 2011 a um total mundial de 19,2 milhões de toneladas. Atualmente, 80% do total de coprodutos e resíduos são aproveitados, seja internamente pelas empresas ou por terceiros.

Existem diversos rejeitos siderúrgicos oriundos do processo industrial do beneficiamento do aço. Dentre eles, podem-se citar a escória de alto forno, pó de alto forno, lama de alto forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria LD (Linz-Donawitz), lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (GEYER, 2001).

Os agregados siderúrgicos (escórias) representam aproximadamente 60% dos coprodutos gerados na produção do aço, são obtidos através da fusão do minério e são formados por uma mistura de óxidos metálicos e outros materiais, tendo diversas aplicações para diferentes indústrias como, a utilização em estradas, produção de cimento, dentre outras.

Segundo os últimos relatórios de sustentabilidade divulgados pelo IABr, observa-se que a participação percentual da aplicação do agregado siderúrgico em bases e sub-bases de estradas vem diminuindo ao longo dos anos. Os valores divulgados atestam que o percentual aplicado foi de 31% em 2007, 22% em 2008, 23% em 2009 e 16% em 2011. A Figura 2.28 ilustra as principais aplicações do agregado siderúrgico em 2011.

Figura 2.28 - Principais aplicações do agregado siderúrgico em 2011



Fonte: Adaptado de IABr (2012).

A diminuição da aplicação do AS na área de pavimentação pode estar relacionado ao fato do seu uso ser pensado somente como material granular de camada de base e sub-base. A utilização dos agregados siderúrgicos em camadas de revestimentos (TSP, microrrevestimento, concreto asfáltico, etc) tende a valorizar a sua aplicação e consequentemente aumentar a demanda de material para a área rodoviária.

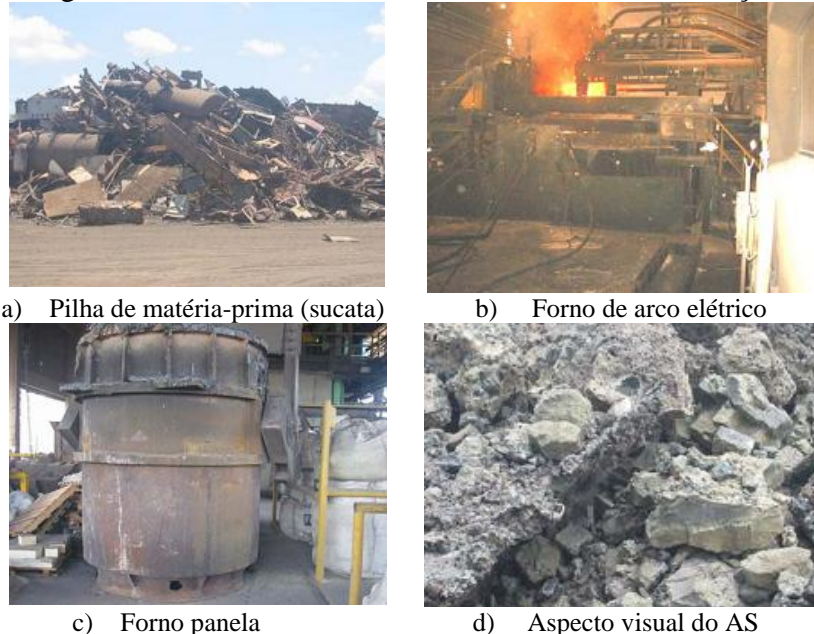
Segundo Cavalcante, Pereira e Barroso (2011) a produção de resíduo siderúrgico no estado do Ceará é estimada em torno de 15% da produção anual de aço, representando aproximadamente 120 mil toneladas, uma produção considerada pequena quando comparada com a nacional. Entretanto, a expectativa é que a produção no estado chegue aos 9 milhões de toneladas com a implantação da nova usina siderúrgica na Região Metropolitana de Fortaleza, assim a produção de agregado siderúrgico aumentaria consideravelmente.

Rocha (2011) comenta que as propriedades físicas e químicas da escória de aciaria (e do agregado dela resultante) dependem do processo de fabricação do aço, do grau metalúrgico do aço produzido e do processamento da própria escória após vazamento. Logo, isso faz com que as propriedades do agregado siderúrgico gerado sejam diretamente relacionadas ao processo e ao forno onde é produzido, sendo assim o AS muda muito para cada estado ou região onde ele é produzido. Os agregados siderúrgicos são produzidos em larga escala de duas formas: alto forno ou aciaria. O AS de alto forno é resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa (obtido diretamente do alto forno, em geral com alto teor de carbono e várias impurezas) e o AS de aciaria é resultante da produção do aço e obtido de fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão da sucata em aço (Rocha, 2011; Castelo Branco, 2004).

As escórias de aciaria são resíduos advindos da indústria siderúrgica, provenientes da fusão de metais ou redução de minérios, visando obter o ferro gusa líquido e

posteriormente o aço (TAVARES *et al.*, 2011). A principal matéria-prima para a produção do aço no estado do Ceará é a sucata ferrosa com a utilização de forno elétrico. A Figura 2.29 ilustra os fornos utilizados no beneficiamento do aço.

Figura 2.29 - Fornos utilizados no beneficiamento do aço



a) Pilha de matéria-prima (sucata)

b) Forno de arco elétrico

c) Forno panela

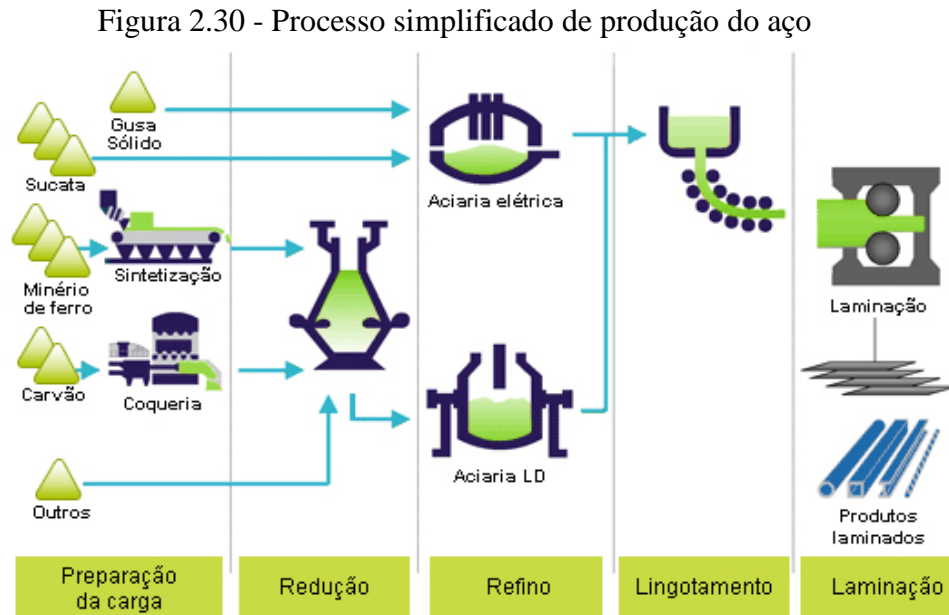
d) Aspecto visual do AS

Fonte: Castelo Branco (2004).

De acordo com o IABr, o aço é uma liga de ferro e carbono, o ferro é encontrado em toda a crosta terrestre, fortemente associado ao oxigênio e a sílica. O carbono é relativamente abundante na natureza, utiliza-se na siderurgia carvão mineral, e em alguns casos, carvão vegetal. As etapas de produção do aço segundo o IABr podem ser resumidas da seguinte forma:

- a) preparação da carga: antes de serem levados ao alto forno, o minério de ferro e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. O minério é transformado em pelotas e o carvão é destilado, para obtenção do coque, dele se obtendo ainda subprodutos carboquímicos;
- b) redução: no processo de redução, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica, etc., formam a escória que é matéria-prima para a fabricação de cimento;
- c) refino: o ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio ou elétricos;

d) laminação: o aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras, etc. A Figura 2.30 ilustra o processo simplificado de produção.



Fonte: Instituto Aço Brasil (IABr).

Segundo Rohde (2002) na produção do aço basicamente existem três processos, caracterizados pelo uso de diferentes fornos: o Siemens-Martin (Open Heart - OH), o conversor a oxigênio (Linz e Donawitz - LD ou Blast Oxygen Furnace - BOF) e o forno elétrico a arco (Eletric Arc Furnace - EAF). Entretanto, os mais utilizados mundialmente são o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos e o de refino de ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio, sendo que o do tipo Siemens-Martin está em declínio, não ocorrendo no Brasil.

A Figura 2.31 apresenta o aspecto visual dos agregados produzidos pelos fornos do tipo EAF e LD. Observa-se que a escória produzida pelo forno EAF apresenta uma coloração mais escura, com grãos “porosos” e “lisos”, enquanto que a escória LD apresenta coloração mais clara e grãos “lisos” (TAVARES, 2012).

Figura 2.31 - Exemplo de AS produzido em forno elétrico (EAF) e a oxigênio (LD)



Fonte: Tavares (2012).

O uso das escórias de aciaria têm sido estudado e aplicado ao longo dos anos nas camadas granulares dos pavimentos. Vários trabalhos nacionais e internacionais como os de Silva (1991), Rohde (2002), Parente, Boavista e Soares (2003), Santos Neto (2007), Yildirim e Prezzi (2009), Cavalcante, Pereira e Barroso (2011), dentre outros, vem abordando esse tema e validando a utilização do agregado siderúrgico para bases e sub-bases de pavimentos. Silva e Mendonça (2001) relatam que no ano de 1986 foi realizada a primeira construção com escória de aciaria em larga escala no Brasil, sendo executado mais de 100 km de base e sub-base no Espírito Santo.

Silva (1991) verificou a aplicabilidade do uso de escória de aciaria em diversas camadas do pavimento, independentemente da granulometria e da capacidade de expansão da escória, para tanto, utilizou diferentes proporções de escória estabilizada granulometricamente com e sem argila. O autor propôs algumas seções tipo a depender da capacidade do subleito, obtendo resultados favoráveis à utilização do rejeito como material de sub-base, base e revestimento.

Rohde (2002) avaliou o uso da escória de aciaria elétrica nas camadas de sub-base e base de pavimentos. Devido às características mecânicas da escória utilizada, foi necessária a correção granulométrica da mesma, enquadrando-a na faixa C do DNIT. Como resultado, a escória apresentou módulos de resiliência superiores aos materiais tradicionais, resultando em pavimentos mais esbeltos e econômicos. A pesquisa concluiu que a escória de aciaria elétrica pode ser usada em camadas granulares seja com necessidade de correção granulométrica ou com uso de aditivos.

Parente, Boavista e Soares (2003) realizaram testes comparativos em misturas solo-escória em dois diferentes teores de escória: 50 e 70%. Os mesmos percentuais foram utilizados em misturas solo-brita, obtendo-se curvas granulométricas coincidentes e enquadrando-as na Faixa D do DNIT para material de base granular. A pesquisa teve como

objetivo estudar o comportamento mecânico das misturas através dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e CBR. Os resultados obtidos apresentaram maiores valores de massa específica seca máxima e menores valores de umidade para as mistura solo-escória. Quanto ao ensaio de CBR, os valores obtidos nas misturas de solo-escória foram, em média, o dobro dos valores das misturas de solo-brita. Analisando o resultado do MR, as misturas solo-escória apresentaram valor superior ao da mistura solo-brita sob qualquer nível de tensão desvio.

Santos Neto (2007) realizou estudo semelhante ao de Parente, Boavista e Soares (2003), no entanto com uma mistura de solo-escória de 50% em comparação a uma mistura solo-brita de mesma proporção. Os ensaios mecânicos de CBR e MR realizados também constaram resultados melhores para a mistura solo-escória.

Yildirim e Prezzi (2009) observando o grande potencial dos Estados Unidos na geração de escória, bem como os problemas relacionados ao controle e estoque desse rejeito, estudaram as propriedades desse material quanto ao seu potencial de uso na estabilização de subleitos e construção de aterros. Para isso, realizaram testes em escórias produzidas em forno elétrico (EAF) e a oxigênio (BOF), analisando aspectos mineralógicos, morfológicos e mecânicos, além do efeito da granulometria. O estudo concluiu, através dos parâmetros obtidos em laboratório, que os materiais podem ser melhor explorado em projetos de engenharia, no entanto, o impacto ambiental deve ser cuidadosamente observado.

Cavalcante, Pereira e Barroso (2011) estudaram em laboratório o emprego da escória de aciaria nas camadas de base e revestimento de um pavimento. Para a camada de base foram estudadas duas misturas solo-escória com teores de escória de 40 e 50%. Na camada de revestimento avaliou-se comparativamente um TSD construído com escória de aciaria e outro de agregado mineral, convencionalmente adotado para este tipo de serviço. Os resultados obtidos confirmaram a viabilidade da escória quanto à sua utilização em camadas granulares e revestimentos do tipo TSD.

Quanto à aplicação deste tipo de agregado na camada de revestimento podem-se citar alguns trabalhos como o de Noureldin e McDaniel (1989), Silva (1991), Hunt e Boyle (2000), Silva e Mendonça (2001), Castelo Branco (2004), Silva (2010), Pedrosa (2010) e Tavares (2012).

Noureldin e McDaniel (1989) avaliaram a aplicação de escória de aciaria em diferentes teores em misturas asfálticas para revestimento submetido a alto volume de tráfego. Como principais resultados os autores constataram que o uso de escória de aciaria acarreta em um revestimento com boa condição de superfície, resistência à derrapagem e altos valores de

estabilidade Marshall. Quanto à expansibilidade da escória, sugerem que a mesma seja combatida com a utilização de um maior teor de cimento e ainda recomendam a substituição dos finos da escória por finos de agregados naturais para diminuir o alto peso específico.

Hunt e Boyle (2000) avaliaram a utilização da escória de aciaria em um trecho experimental construído em Oregon, Estados Unidos. No trecho foi executada uma mistura asfáltica contendo 30% de escória como agregado no revestimento e analisado durante cinco anos. Os resultados observados evidenciaram que o desempenho do trecho foi satisfatório, tendo em vista o pavimento não apresentar trincamento ou diminuição da resistência à derrapagem.

Silva e Mendonça (2001) apresentaram uma dosagem Marshall de um revestimento executado no estado do Espírito Santo, Brasil, consistindo de uma mistura asfáltica do tipo CBUQ utilizando 97% de escória de aciaria, fíler calcário e CAP 20. O trabalho reforçou a utilização do agregado siderúrgico nos pavimentos brasileiros devido às condições técnicas do material e a preservação dos agregados naturais.

Castelo Branco (2004) também estudou uma mistura asfáltica do tipo CBUQ, utilizando CAP 50/60, DOPE, escória de aciaria e areia de campo. Em comparação, trabalhou com uma mistura de referencia consistindo de brita de origem granítica, areia de campo, pó de pedra, fíler mineral e o mesmo CAP, porém sem DOPE. As misturas foram analisadas mecanicamente e se concluiu a viabilidade técnica do emprego da escória em revestimentos. Com relação ao uso do DOPE, observou-se irrelevante o seu uso.

Silva (2010) dosou segundo a metodologia Marshall misturas betuminosas do tipo CBUQ, adequando-as a faixa C do DNIT e utilizando a brita graduada e escória de aciaria em diferentes proporções, como agregados graúdos e miúdos e o rejeito de minério de ferro como fíler. As misturas foram analisadas mecanicamente e consideradas satisfatórias.

Pedrosa (2010) também estudou a utilização da escória de aciaria em misturas asfálticas do tipo CBUQ, em comparação com o mesmo tipo de mistura confeccionada de material gnáissico. Os resultados mostraram que a mistura produzida com escória de aciaria possui qualidade técnica, apresentando maior estabilidade, menor fluência, e maior módulo de resiliencia. Entretanto, demanda um maior teor de ligante que o agregado gnáissico, resultado também constatado em trabalhos de outros autores. O autor sugere que observando os resultados obtidos através de uma análise econômica, pode-se chegar a uma área regional ao redor dos pontos de estocagem onde a utilização da escória pode ser viável.

Tavares (2012) em sua pesquisa analisou uma mistura asfáltica do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*), dosada segundo os princípios da dosagem *Superpave*, com um

agregado siderúrgico proveniente de um forno do tipo a oxigênio e dois ligantes (CAP 30/45 e asfalto-boracha). O esqueleto pétreo foi definido usando o método Bailey e os finos do agregado siderúrgico foram substituídos por finos de um agregado natural devido a apresentarem alta absorção. De forma geral, a mistura consistindo de SMA e asfalto-borracha apresentou melhor desempenho do que a mistura com CAP 30/45.

A utilização do agregado siderúrgico na pavimentação segue as recomendações determinadas pela DNER-EM 262/94 e consiste em:

- a) potencial de expansão de no máximo 3%, determinado pelo Método PTM 130 (Pennsylvania Testing Method);
- b) isenção de impurezas orgânicas, de contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto;
- c) composição granulométrica deve manter-se na proporção de 40% na faixa de 12,7mm (1/2") e 60% na faixa de 12,7mm a 50,8mm de abertura nominal e deve atender à granulometria do projeto. Quando aplicada em revestimento, a granulometria deve ser função de estudo em laboratório para atendimento das características exigidas em projeto;
- d) absorção de água: 1,0% a 2,0% em peso;
- e) massa específica: 3,0 a 3,5g/cm³;
- f) massa unitária: 1,5 a 1,7kg/dm³;
- g) desgaste Los Angeles: $\leq 25\%$ para sub-base, base e revestimento;
- h) durabilidade ao sulfato de sódio: máximo de 5,0%, em 5 ciclos.

Ressalte-se que o uso do agregado siderúrgico nos tratamentos de superfície ainda requer uma maior investigação de suas características e potencialidade. De acordo com Cavalcante, Pereira e Barroso (2011) existe uma grande carência de pesquisa visando a utilização do AS no tratamento superficial. Poucos trabalhos como o de Khan e Wahhab (1998), Loiola (2009), Pereira (2010) e Rocha (2011) procuraram investigar o AS como material granular de revestimentos esbeltos. Dessa forma, observa-se um potencial de pesquisa envolvendo esse tipo de agregado para aplicação em revestimentos do tipo CS como proposto no presente trabalho.

Khan e Wahhab (1998) estudaram em laboratório o uso de escória misturada com agregado calcário visando melhorar as propriedades da lama asfáltica na região Oriental da Arábia Saudita. De maneira geral, os autores concluíram que os agregados quando

combinados apresentavam melhor comportamento do que separadamente, devido a problemas particulares no seu uso. As misturas com apenas agregados calcários apresentaram alta abrasão e as com somente escória apresentaram trincamento. A mistura de melhor resultado apresentou um teor de emulsão catiônica de 15%, entretanto, os autores indicam a possibilidade de aplicação em campo com valores entre 9 e 11% visando aplicações econômicas.

Loiola (2009) teve em seu trabalho o pioneirismo de estudar o desempenho do agregado mineral e siderúrgico aplicado com emulsões convencionais e modificadas por polímero em revestimento do tipo tratamento superficial duplo. Para isso moldou em laboratório e em campo corpos de prova dos materiais estudados e submeteu aos ensaios de WTAT, Mancha de Areia e Pendulo Britânico, concluindo através dos resultados observados que os materiais testados se mostram adequados a confecção de TSD.

Pereira (2010) realizou seu estudo em continuidade ao trabalho de Loiola (2009), utilizando os mesmos agregados e apenas um tipo de emulsão asfáltica (RR-2C). Os agregados foram analisados na confecção de revestimentos do tipo TSS, TSD e TST. O autor concluiu que para os revestimentos do tipo TSD e TST, o agregado siderúrgico apresentou melhor resultado quando submetido ao ensaio de WTAT do que o agregado mineral.

Rocha (2011) avaliou através de ensaios em laboratório e com um trecho experimental a aplicabilidade técnica e econômica do agregado siderúrgico aplicado na construção de um revestimento do tipo TSD. Os resultados observados indicaram um bom desempenho funcional, com ausência de fissuras, trincas, desagregações e exsudação do TSD executado com agregado siderúrgico. Do ponto de vista econômico, o autor ressalta que o custo global é função do tipo da obra, mas para o estudo realizado, a utilização do AS resultou em uma economia bastante significativa quando comparada ao agregado mineral.

Segundo a ASTM D 1139 (2004) as especificações de escória de alto forno para utilização em tratamento superficial deve seguir os seguintes parâmetros:

- a) massa unitária mínima: $1,12\text{kg/dm}^3$;
- b) durabilidade ao sulfato de sódio menor do que 12%, em 5 ciclos;
- c) durabilidade ao sulfato de magnésio menor do que 18%, em 5 ciclos;
- d) desgaste Los Angeles: $\leq 40\%$;
- e) contaminação com argila e partículas friáveis máxima com 3% em massa;
- f) superfícies dos agregados alongados retidos na peneira de 9,5mm:
 - até 10% da massa na primeira camada do tratamento superficial duplo;
 - sem exigência para segunda camada do tratamento superficial duplo.

Comparando as especificações do DNIT e da ASTM, percebe-se que as mesmas divergem em alguns pontos. A especificação internacional é mais flexível quanto a permitir escórias com menores densidades, não limita a densidade máxima, permite maior perda nos ensaios de durabilidade e abrasão Los Angeles (ROCHA, 2011).

2.6 Considerações finais

No presente capítulo realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os temas estudados. Pontos considerados relevantes na compreensão da pesquisa como, a situação da malha rodoviária nacional, conceituação de pavimento rodoviário e dos tratamentos de superfície foram abordados. Ressaltaram-se aspectos quanto à importância individual dos diferentes tipos de tratamentos e da função que esse tipo de revestimento representa como camada de rolamento, na manutenção e recuperação de rodovias.

Como foco do trabalho, decidiu-se investigar através de uma revisão bibliográfica os aspectos mais relevantes quanto à aplicação do *cape seal* e seu estado da arte. Para isso, foi realizada uma discussão sobre os revestimentos do tipo tratamento superficial por penetração e microrrevestimento asfáltico a frio, apresentando suas características principais, materiais, processo de dosagem e estudos já realizados.

Dentro da linha de sustentabilidade e uso de materiais alternativos na engenharia, o presente capítulo também procurou realizar uma breve revisão quanto à produção e aplicação do agregado siderúrgico na área rodoviária.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais e a metodologia empregada nesta pesquisa. Ressalta-se que parte da metodologia desenvolvida é considerada como resultado original do trabalho, tendo em vista seu aspecto inovador para aplicação em revestimento do tipo CS.

Inicialmente, serão apresentados os materiais utilizados para confecção dos corpos de prova de TSD, MRAF e CS. Posteriormente, serão descritas as quatro etapas desenvolvidas durante a fase experimental. Os critérios adotados para escolha dos materiais consistiram na observação de aspectos como disponibilidade, qualidade do material e a utilização dos mesmos em obras rodoviárias da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

A metodologia de pesquisa desenvolvida constou da consulta de diversas fontes bibliográficas, bem como da realização de vários experimentos. Para melhor compreensão do leitor, dividiu-se a parte de laboratório em quatro procedimentos experimentais que conduzem o desenvolvimento da pesquisa desde a caracterização dos materiais envolvidos, moldagem e dosagem dos corpos de prova, até a realização de ensaios de desempenho e avaliação dos pavimentos testados.

As etapas metodológicas abordadas no desenvolvimento do trabalho podem ser resumidas da seguinte forma:

- a) revisão bibliográfica contemplando os tratamentos de superfície, com enfoque no TSS, TSD e MRAF;
- b) revisão bibliográfica visando conhecer o estado da arte da técnica do *cape seal* e sua aplicação na área de pavimentação. Estudou-se também a utilização de agregados siderúrgicos como material alternativo na área em questão;
- c) realização do Primeiro Procedimento Experimental que consistiu da coleta e caracterização dos materiais empregados na pesquisa (agregado mineral, agregado siderúrgico e ligantes);
- d) realização do Segundo Procedimento Experimental que consistiu da dosagem e fabricação em laboratório de revestimentos do tipo TSD e MRAF utilizando agregado mineral e o agregado siderúrgico. Nessa etapa foi também executada

- uma avaliação comparativa entre resultados obtidos utilizando alguns ensaios como o *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) e o *Loaded Wheel Test* (LWT);
- e) realização do Terceiro Procedimento Experimental que consistiu da avaliação do TSD e do *cape seal* fabricados com agregado mineral e siderúrgico, quando submetidos ao ensaio de WTAT e ao ensaio de coesão para o MRAF. Esse procedimento visou avaliar o desgaste sofrido dos teores de projeto encontrados na fase de dosagem;
- f) realização do Quarto Procedimento Experimental que consistiu da construção de placas de TSD e *cape seal*, utilizando agregados mineral e siderúrgico. Essas placas foram ensaiadas através de simuladores de tráfego de laboratório, comparando-as em termos de deformação, desgaste e avaliação da microtextura e macrotextura;
- g) análise e discussão dos resultados;
- h) redação da dissertação de mestrado.

A Figura 3.1 ilustra os quatro procedimentos experimentais anteriormente citados de forma resumida.

Figura 3.1 - Ilustração do programa experimental da pesquisa



Fonte: Autor (2013).

3.2 Materiais utilizados na pesquisa

3.2.1 Agregado mineral (AM)

Os agregados minerais utilizados na pesquisa foram três tipos de britas de granulometria diferentes (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra), porém todas extraídas da mesma pedreira localizada no município de Caucaia na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). A Figura 3.2 ilustra a localização da pedreira no município de Caucaia. Já a Figura 3.3 mostra o aspecto visual dos agregados minerais coletados.

Figura 3.2 - Localização da pedreira no município de Caucaia.
REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA



Fonte: Adaptado do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE.

Figura 3.3 - Aspecto visual dos agregados minerais utilizados na pesquisa



a) Brita 3/4"

b) Brita 3/8"

c) Pó de pedra

Fonte: Autor (2013).

Tendo em vista o tratamento superficial por penetração e o microrrevestimento asfáltico utilizarem faixas granulométricas específicas, decidiu-se pela caracterização

individual dos agregados para posterior composição das faixas granulométricas a serem utilizadas nas camadas do TSP e MRAF.

De acordo com Bessa, Castelo Branco e Soares (2011), os agregados da referida pedreira são gnaisse e o processo de exploração é feito através de explosivos ou dinamites e processado em duas fases, ocorrendo a primeira no britador por mandíbula, enquanto a segunda ocorre no britador giroscópico ou cônico. Posteriormente, procede-se ao armazenamento e o controle de qualidade que consiste da realização dos ensaios de granulometria e densidade dos agregados. A Figura 3.4 ilustra a pedreira e algumas etapas da produção dos agregados empregados na presente pesquisa.

Figura 3.4 - Etapas de produção do agregado mineral empregados na pesquisa



Fonte: Autor (2013).

3.2.2 Agregado siderúrgico (AS)

O agregado siderúrgico vem ao longo dos anos ocupando espaço no setor da pavimentação e sendo usado em diferentes tipos de revestimentos. No presente trabalho, optou-se pela utilização do agregado siderúrgico produzido pela Gerdau Cearense S.A. Essa empresa está localizada a 20km da cidade de Fortaleza, no município de Maracanaú

pertencente à RMF. A Figura 3.5 ilustra a localização do município de Maracanaú na RMF, bem como a empresa onde o AS é produzido.



Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE.

De acordo com Loiola (2009), o agregado siderúrgico produzido em Maracanaú é britado e separado nas graduações 1", 3" e 8" para posterior comercialização. O material é estocado em pilhas a céu aberto o que provoca uma pré-expansão do mesmo. O material utilizado na pesquisa pertence à graduação do tipo 1" e está ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Agregado siderúrgico utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2013).

3.2.3 Emulsão asfáltica

As emulsões asfálticas utilizadas na pesquisa foram: (i) a emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida (RR-2C) indicada para tratamento superficial e (ii) a emulsão

asfáltica de ruptura controlada modificada por polímeros (RC1C-E) empregada em obras de microrrevestimentos asfáltico a frio.

Ambas as emulsões são fabricadas e comercializadas pela empresa Asfaltos Nordeste que se encontra sediada no município de Maracanaú. A Figura 3.7 ilustra os tanques de armazenamento e a coleta das emulsões (RR-2C e RC1C-E) cedidas pela empresa para a realização da presente pesquisa.

Figura 3.7 - Tanques de armazenamento e coleta das emulsões asfálticas



a) Tanques de armazenamento

b) Coleta de emulsão

Fonte: (a) Castro (2011); (b) Pereira (2010).

3.2.4 Aditivo químico

O aditivo químico utilizado tem como finalidade retardar o tempo de ruptura da emulsão asfáltica do tipo RC1C-E empregada nas misturas de MRAF. Os aditivos apresentam, na sua constituição, agentes tensoativos catiônicos compatíveis com os emulsificantes utilizados na formulação da emulsão RC1C-E e sua aplicação é feita em conjunto com a água usada na mistura de MRAF.

A empresa não fornece maiores detalhes quanto à composição e produção do aditivo, entretanto, quanto ao rendimento do aditivo em campo, a mesma estima que um litro de aditivo seja utilizado para cada 200kg de agregado.

3.2.5 Cimento portland

Utilizou-se o cimento Portland do tipo CP-II (Cimento Portland Composto) como filler nas misturas de microrrevestimento asfáltico, seguindo as indicações estabelecidas nas especificações de serviço do MRAF.

3.3 Primeiro procedimento experimental - Coleta e caracterização dos materiais empregados na pesquisa

O primeiro procedimento experimental consistiu da realização da coleta e da caracterização dos materiais empregados na pesquisa (agregado mineral, agregado siderúrgico e emulsões asfálticas). Os ensaios realizados nos materiais tiveram como objetivo a verificação do enquadramento dos mesmos quanto aos parâmetros requeridos nas especificações para uso em pavimentação. A Figura 3.8 ilustra os materiais e a sequência de atividades realizadas no referido procedimento.

Figura 3.8 - Materiais estudados no primeiro procedimento experimental



Fonte: Autor (2013).

3.3.1 Ensaios realizados no agregado mineral (AM)

Apesar de serem agregados da mesma fonte (pedreira), a caracterização de cada fração de agregado (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra) foi realizada de forma individual, tendo em vista os diferentes fins que cabe a cada granulometria na composição do revestimento *cape seal*.

A Tabela 3.1 - Ensaios de caracterização do AM (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra) foi elaborada como forma de sintetizar e melhor apresentar os diferentes ensaios de caracterização realizados nos agregados. Para alguns tipos de agregados não foi necessária a realização de todos os ensaios, tendo em vista a granulometria e finalidade do mesmo na construção do revestimento *cape seal*.

Tabela 3.1 - Ensaios de caracterização do AM (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra)

Ensaios	Norma	Agregado mineral		
		Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
Granulometria	DNER-ME 083/98	X	X	X
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	X	X	-
Desgaste Los Angeles	DNER-ME 035/98	X	X	-
Absorção (agregado graúdo)	DNER-ME 081/98	X	X	-
Densidade (agregado graúdo)	DNER-ME 081/98	X	X	-
Densidade (agregado miúdo)	DNER-ME 084/95	-	-	X
Equivalente de areia	DNER-ME 054/94	-	-	X
Azul de metileno	NBR 14949/2003	-	-	X
Durabilidade	DNER-ME 089/94	X	X	X
Adesividade a ligante betuminoso	DNER-ME 078/94	X	-	-

Fonte: Autor (2013).

Para uma melhor compreensão dos ensaios realizados, os mesmos são descritos, resumidamente, nos itens de *a* a *i* dos parágrafos que se seguem.

a) Granulometria (DNER- ME 083/98 - Agregados, Análise Granulométrica) - O ensaio determina a composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos por peneiramento. A Figura 3.9 ilustra as peneiras utilizadas no ensaio.

Figura 3.9 - Ensaio de granulometria



Fonte: Autor (2013).

b) Índice de Forma (DNER-ME 086/94 - Agregados, Determinação do Índice de Forma) - O ensaio determina a quantidade de partículas de agregados lamelares ou achatadas que podem ser fragmentadas pela ação do tráfego. A Figura 3.10 ilustra algumas etapas de execução do ensaio.

Figura 3.10 - Ensaio de índice de forma



Fonte: Autor (2013).

c) Desgaste Los Angeles (DNER-ME 035/98 - Agregados, Determinação da Abrasão Los Angeles) - Esse ensaio determina a resistência do agregado diante de quebras, degradação e desintegração por ação do tráfego. A Figura 3.11 ilustra o equipamento de Abrasão Los Angeles empregado na pesquisa.

Figura 3.11- Equipamento de abrasão Los Angeles



Fonte: Autor (2013).

d) Absorção e Densidade (DNER-ME 081/98 - Agregados, Determinação da Absorção e Densidade do Agregado Graúdo) - O ensaio fixa o procedimento para a determinação da absorção, densidade aparente e densidade real do agregado graúdo. A Figura 3.12 ilustra o processo de imersão dos agregados durante a realização do ensaio.

Figura 3.12 - Imersão dos agregados para os ensaios de absorção e densidade



Fonte: Autor (2013).

e) Densidade do Agregado Miúdo (DNER-ME 084/95 - Agregado Miúdo, Determinação da Densidade Real) - Esse ensaio fixa o procedimento para a determinação da densidade real do agregado miúdo. A Figura 3.13 ilustra o ensaio de densidade.

Figura 3.13 - Ensaio de densidade do agregado miúdo



Fonte: Autor (2013).

f) Equivalente de Areia (DNER-ME 054/97 - Equivalente de Areia) - Esse ensaio determina a qualidade dos agregados miúdos (limpeza) pela presença de argila/silte. A Figura 3.14 ilustra o andamento do ensaio de equivalente de areia.

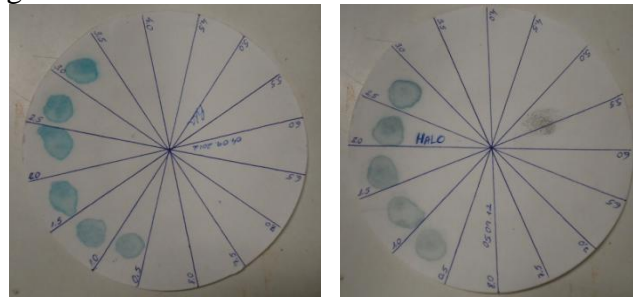
Figura 3.14 - Ensaio de equivalente de areia



Fonte: Autor (2013).

g) Azul de Metileno (NBR 14949/2003 - Microrrevestimento Asfáltico - Caracterização da Fração Fina por Meio da Absorção de Azul de Metileno) - Esse ensaio determina a reatividade da fração fina dos agregados para ajustes na velocidade de ruptura/cura da emulsão asfáltica. A Figura 3.15 ilustra o papel de filtro onde a solução de azul de metileno é depositada para aquisição do resultado do ensaio.

Figura 3.15 - Resultado do ensaio de azul de metileno



a) Pó de pedra

b) AS

Fonte: Autor (2013).

h) Durabilidade (DNER-ME 089/94 - Agregados, Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Solução de Sulfato de Sódio ou de Magnésio) - Esse método determina a resistência dos agregados à desintegração química por meio da simulação das intempéries (chuva, sol, etc.). A Figura 3.16 ilustra a etapa de secagem da amostra.

Figura 3.16 - Ensaio de durabilidade



Fonte: Autor (2013).

i) Adesividade (DNER-ME 078/94 - Agregados, Adesividade a Ligante Betuminoso) - Esse ensaio determina a propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso. A Figura 3.17 ilustra os agregados sendo ensaiados.

Figura 3.17 - Ensaio de adesividade ao ligante betuminoso



c) Brita $\frac{3}{4}$ "

d) AS

Fonte: Autor (2013).

3.3.2 Ensaios realizados no agregado siderúrgico (AS)

Para o agregado siderúrgico realizaram-se os mesmos ensaios executados no agregado mineral. Entretanto, a utilização do AS requer alguns parâmetros adicionais que viabilizem a sua aplicação nas camadas do pavimento, tendo em vista se tratar de um resíduo sólido. Assim, além dos ensaios anteriormente citados no item 3.3.1, se faz necessária à realização de ensaios de lixiviação, solubilização e verificação do potencial de expansão do AS.

Os ensaios adicionais foram realizados conforme requeridos pela especificação de material do DNIT (DNER-EM 262/94 - Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários). Essa norma técnica apresenta os requisitos gerais e específicos concernentes ao emprego de escórias de aciaria em camada de pavimento visando a aceitação ou rejeição do produto. A Tabela 3.2 ilustra os ensaios realizados no agregado siderúrgico.

Tabela 3.2 - Ensaios de caracterização do agregado siderúrgico

Ensaio	Norma
Granulometria	DNER-ME 083/98
Índice de Forma	DNER-ME 086/94
Desgaste Los Angeles	DNER-ME 035/98
Absorção (agregado graúdo)	DNER-ME 081/98
Densidade (agregado graúdo)	DNER-ME 081/98
Densidade (agregado miúdo)	DNER-ME 084/95
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97
Azul de metileno	NBR 14949/2003
Durabilidade	DNER-ME 089/94
Adesividade a ligante betuminoso	DNER-ME 078/94
Expansão	DNIT-ME 113/2009 (Adaptado do Método PTM 130)
Lixiviação	NBR 10005/2004
Solubilização	NBR 10006/2004

Fonte: Autor (2013).

O ensaio de expansão do agregado siderúrgico foi realizado seguindo o método PTM-130 do Departamento de Transportes da Pensilvânia. O DNIT apresenta através do método de ensaio (DNIT-ME 113/2009 - Agregado Artificial, Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria) uma versão em português do procedimento.

O método de ensaio descreve a determinação do potencial de expansão da escória de aciaria quando compactada e testada em laboratório. Na realização do ensaio são moldados três corpos de prova com umidades próximas à umidade ótima (o primeiro no ramo seco, o segundo na umidade ótima e o terceiro no ramo úmido). Os corpos de prova são submersos

por um período de sete dias e mais sete dias no estado de saturação, sendo que o processo da expansão foi acompanhado através de leituras diárias do extensômetro. A Figura 3.18 ilustra o ensaio sendo realizado.

Figura 3.18 - Ensaio de expansão do agregado siderúrgico



a) Corpo de prova na estufa

b) Detalhe do extensômetro

Fonte: Autor (2013).

Observando o aspecto ambiental envolvido na utilização do agregado siderúrgico, busca-se realizar através dos ensaios de solubilização e lixiviação uma investigação sobre os riscos de danos ambientais possíveis de serem causados pelo uso do AS. O ensaio de solubilização visa verificar a concentração de substâncias solúveis em água presentes no material (solubilização) e foi realizado segundo a ABNT/NBR 10006/2004 (Solubilização de Resíduos – Procedimentos). Já o ensaio de lixiviação tem como objetivo identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação e foi realizado segundo a ABNT/NBR 10005/2004 (Lixiviação de Resíduos – Procedimentos).

3.3.3 *Ensaio realizados nas emulsões asfálticas*

Os ensaios de caracterização e validação das emulsões asfálticas utilizadas na pesquisa (RR-2C e RC1C-E) foram realizados pela empresa fabricante das emulsões e fornecidos pela mesma através do certificado de ensaio. A Tabela 3.3 lista os ensaios e a respectiva norma utilizada para sua realização.

Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização das emulsões asfálticas (RR-2C e RC1C-E)

Ensaio	Norma
Determinação da viscosidade Saybolt Furol	ABNT NBR 14491/00
Determinação da sedimentação	DNER ME 006/00
Carga da partícula	ABNT NBR 6567/00
Determinação do resíduo por evaporação	ABNT NBR 14376/07
Determinação da peneiração	ABNT NBR 14393/99
Determinação do pH	ABNT NBR 6299/99
Determinação da Desemulsibilidade	DNER - ME 063/94
Recuperação elástica	DNER - ME 382/99
Determinação da penetração	DNER - ME 003/99
Determinação da ductilidade	ABNT IBP P-MB-167
Ponto de amolecimento	ABNT NBR 6560/08

Fonte: Autor (2013).

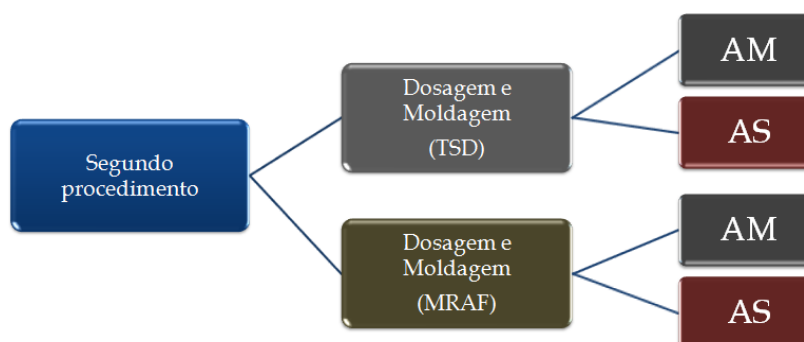
3.4 Segundo procedimento experimental - Dosagem e fabricação em laboratório de corpos de prova de TSD e MRAF

O segundo procedimento experimental consistiu na dosagem e fabricação em laboratório de revestimentos do tipo TSD e MRAF utilizando o agregado mineral (AM) e o agregado siderúrgico (AS).

Nesse procedimento são apresentadas as formulações e atividades envolvidas na determinação da taxa de agregado e ligante utilizado no TSP, abordando a metodologia inicialmente concebida por Loiola (2009) e adaptada por Pereira (2010). Destaque-se que a metodologia aqui aplicada foi aperfeiçoada, a partir da análise dos dois trabalhos citados anteriormente, quanto à moldagem dos corpos de prova de TSP.

Nessa etapa foram também definidas as faixas granulométricas aplicadas ao TSS e TSD, assim como a determinação da composição das misturas de MRAF e a avaliação comparativa dos resultados obtidos utilizando os ensaios de *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) e *Loaded Wheel Test* (LWT). A Figura 3.19 ilustra esquematicamente as etapas do segundo procedimento experimental.

Figura 3.19 - Ilustração do segundo procedimento experimental



Fonte: Autor (2013).

3.4.1 Confeção dos corpos de prova de TSD com agregados mineral e siderúrgico

De forma a facilitar o entendimento das atividades envolvidas durante a confecção dos corpos de prova de TSD, com ambos os agregados (AM e AS), dividiu-se o presente tópico em duas partes referentes inicialmente a dosagem e, posteriormente, a moldagem dos corpos de prova.

3.4.1.1 Dosagem dos corpos de prova de TSD

Na realização dos experimentos, decidiu-se trabalhar com o método de dosagem de tratamento superficial proposto pelo DER/CE. Assim, dentre as três combinações sugeridas pela especificação DERT-ES-P 11/00, optou-se por trabalhar com a combinação das classes II – III que apresenta como material da 1ª camada $D_1 = 16\text{mm}$ e $d_1 = 10\text{mm}$ ($5/8'' - 3/8''$) e para a 2ª camada $D_2 = 10\text{mm}$ e $d_2 = 6,3\text{mm}$ ($3/8'' - 1/4''$) para um tráfego com um número N (número de repetições de um eixo padrão de 8,2t durante o período de vida útil do projeto) entre 10^6 a $2,5 \times 10^6$.

De acordo com a especificação do DER/CE, uma vez determinada a classe granulométrica para o TSD, calcula-se a taxa de agregado (Tag) em litro/m^2 que é função dos valores do diâmetro superior e inferior da camada a ser calculada. Posteriormente, a taxa de agregado obtida foi conferida utilizando o método da bandeja e transformada em volume pela determinação da massa específica solta, conforme sugerido pela especificação DERT-ES-P 11/00, obtendo-se, assim, a taxa de agregado a espalhar em volume.

A taxa de ligante (RR-2C) a ser aplicada no TSD foi também determinada pelo método do DER/CE seguindo os procedimentos observados na sua especificação. O seu cálculo é feito observando o valor inicialmente determinado pelo cálculo da Tag, onde se

obtem a taxa de emulsão asfáltica total a ser aplicada e o percentual da mesma na aplicação da 1ª e 2ª camadas.

Os valores obtidos para as taxas dos agregados seguindo o procedimento realizado pela especificação do DER/CE foram denominados de taxas iniciais de projeto, sendo adotados como valores base na determinação inicial das taxas. Posteriormente, através do ensaio de determinação da taxa de agregado através do método da bandeja, obteve-se a taxa real de agregado para ambos os materiais a serem utilizados na confecção dos corpos de prova de TSD.

Optou-se pela utilização das taxas de agregados obtidas pelo método da bandeja, tendo em vista a possibilidade que o mesmo oferece em simular uma taxa de maneira mais próxima daquela aplicada em campo, diferentemente da especificação do DER/CE que não faz distinção entre diferentes tipos de agregados, por exemplo, o agregado mineral e siderúrgico com formas e características bem diferentes. A Figura 3.20 ilustra a determinação da taxa de agregado pelo método da bandeja para ambos os agregados estudados na presente pesquisa.

Figura 3.20 - Determinação da taxa de agregado pelo método da bandeja



a) Agregado mineral

b) Agregado siderúrgico

Fonte: Autor (2013).

Ressalte-se que para a determinação da taxa real de ligante utilizou-se a metodologia do DER/CE, entretanto, usando na expressão de cálculo a taxa de agregado a espalhar determinada pelo método da bandeja.

3.4.1.2 *Moldagem dos corpos de prova de TSD*

Conforme mencionado anteriormente, o processo de moldagem dos corpos de prova de TSD foi baseado na metodologia desenvolvida por Loiola (2009) e posteriormente adaptada por Pereira (2010). A metodologia aplicada no presente trabalho teve alguns pontos

modificados, tendo em vista a necessidade de uma melhor aproximação das condições de execução no campo e a necessidade contínua de melhoria dos procedimentos laboratoriais.

As taxas de agregados e ligantes definidas no processo de dosagem foram calculadas em função da área do corpo de prova a ser moldado, também denominado por Loiola (2009) e Pereira (2010) como manta de TSP.

A moldagem dos corpos de prova segundo Pereira (2010) obedece a uma série de passos que tenta aproximar, no laboratório, a situação real da construção de um revestimento do tipo TSS ou TSD no campo.

A ideia inicial de Loiola (2009) era usar o molde do ensaio de WTAT, empregado na dosagem de MRAF, e adaptá-lo aos revestimentos do tipo TSP. Para isso, a moldagem do corpo de prova foi feita em uma manta asfáltica, sendo o TSP moldado dentro do aro metálico do ensaio de WTAT. Alguns autores como Duque Neto (2004) e Gondim (2008) adaptaram, também, o ensaio de WTAT para aplicação em outras finalidades; no caso dessas duas pesquisas para avaliação das camadas de base com o emprego do solo-emulsão.

De acordo com Pereira (2010), a confecção das mantas de TSP consiste basicamente na determinação das taxas de ligante e agregado a serem utilizadas para cada manta, sempre com a compactação do conjunto a cada nova aplicação de ligante-agregado. Posteriormente, as mantas são submetidas ao ensaio de WTAT, de forma a avaliar o desgaste sofrido pelo TS devido à abrasão proporcionada pelo ensaio.

A metodologia desenvolvida por Pereira (2010) tinha como diferença básica da inicialmente proposta por Loiola (2009) a forma de compactação dos agregados no processo de confecção das mantas. No procedimento desenvolvido por Loiola (2009), a compactação se dava pela aplicação da força do operador em um tubo metálico de aproximadamente 2” que rolava sobre a manta asfáltica sem um controle adequado da carga aplicada.

No procedimento proposto por Pereira (2010), o tubo foi substituído por um balde metálico preenchido com concreto, pesando cerca de 55kg, que ao rolar sobre as mantas de TSP produzia um esforço de compactação que simulava o esforço aplicado por um rolo compactador em campo. O principal intuito da retirada da variável força do operador, aplicada anteriormente pelo tubo proposto por Loiola (2009), foi a utilização somente do peso próprio do compactador. A Figura 3.21 ilustra o processo de compactação desenvolvido por Loiola (2009) e aperfeiçoado por Pereira (2010).

Figura 3.21 - Compactação das mantas de TSP segundo Loiola (2009) e Pereira (2010)



a) Compactação segundo Loiola (2009)

b) Compactador proposto por Pereira (2010)

c) Compactação segundo Pereira (2010)

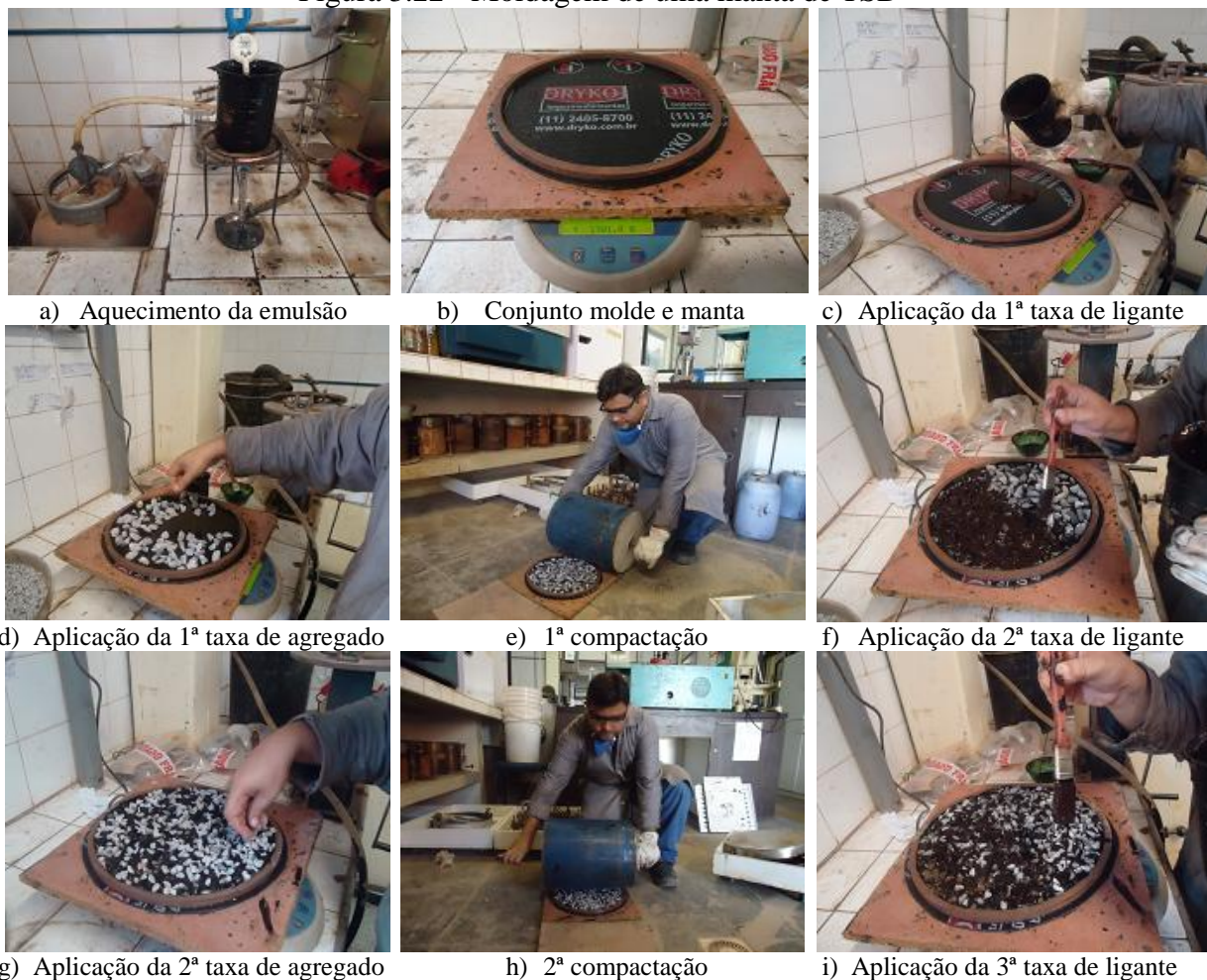
Fonte: Pereira (2010).

Apresenta-se a seguir o procedimento laboratorial adaptado de Pereira (2010) para a confecção de uma manta do tipo TSD. A mesma metodologia pode ser adotada para um revestimento do tipo TSS ou TST. As etapas para a confecção de uma manta do tipo TSD são:

- a) pesa-se o conjunto formado por bandeja, manta asfáltica e anel metálico;
- b) aplica-se a 1ª taxa de ligante;
- c) aplica-se a 1ª taxa de agregado;
- d) submete-se o conjunto a compactação de 10 passagens com um balde metálico preenchido com concreto (aproximadamente 55kg);
- e) aplica-se a 2ª taxa de ligante;
- f) aplica-se a 2ª taxa de agregado;
- g) submete-se o conjunto a compactação com 10 passagens do compactador;
- h) aplica-se a 3ª taxa de ligante que consiste de um banho de emulsão diluída em água na proporção de 1:1;
- i) remove-se o molde metálico e coloca-se o revestimento em uma estufa a 60°C por 24h (cura completa).

A Figura 3.22 ilustra a sequência de atividades realizadas por Pereira (2010) quanto à confecção dos corpos de prova de TSP, no caso específico a moldagem de um tratamento superficial duplo.

Figura 3.22 - Moldagem de uma manta de TSD



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

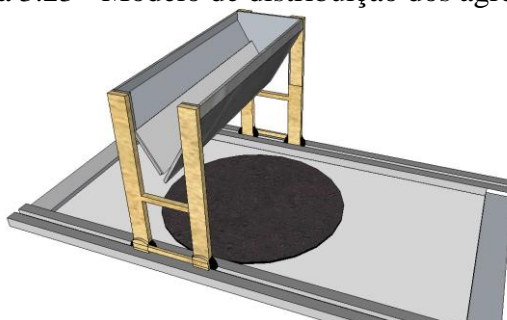
Segundo Pereira (2010), a metodologia proposta visou atingir os mesmos procedimentos utilizados em campo, observando os cuidados necessários à aplicação do ligante e dos agregados. A emulsão asfáltica RR-2C utilizada na moldagem dos corpos de prova foi aplicada a uma temperatura de 60°C.

Observa-se na Figura 3.22 que na moldagem dos corpos de provas a serem ensaiados, a distribuição dos agregados é feita de maneira manual, e de certa forma subjetiva, mesmo que se procure distribuir uniformemente o material na sua taxa específica para a área determinada. Diante desse fato, fixou-se como um dos objetivos durante a realização da pesquisa testar uma forma de distribuição dos agregados de maneira a minimizar a influência do operador e tornar o ensaio mais reprodutível.

Inicialmente, pensou-se em um equipamento capaz de distribuir os agregados uniformemente em função da taxa definida, simulando a passagem do distribuidor de agregados em campo. O equipamento consistiria de uma base retangular com área determinada e dimensões suficientes para o posicionamento da manta asfáltica. Sobre os

trilhos da base do equipamento seriam apoiados uma estrutura que comportaria os agregados contendo uma abertura de forma a regular a taxa de agregado, por metro quadrado, em função da velocidade de deslocamento do equipamento. A Figura 3.23 ilustra o projeto inicial do distribuidor de agregado idealizado.

Figura 3.23 - Modelo de distribuição dos agregados



Fonte: Autor (2013).

Na realização de testes iniciais com um modelo do equipamento, o mesmo não se mostrou adequado para distribuição dos agregados, tendo em vista apresentar problemas relacionados a não uniformidade de distribuição. A irregularidade quanto à distribuição do agregado era muitas vezes causada pelo travamento das partículas na abertura que impossibilitava a saída dos agregados, bem como à dificuldade de vibração do equipamento, que facilitasse a distribuição.

Diante das dificuldades observadas, elaborou-se um outro modelo de distribuidor, tomando como base a ideia de um carrinho de mão utilizado na construção civil. O projeto consistiu em adaptar a caixa do carrinho de mão com uma abertura regulável, de forma a controlar a taxa de agregado a ser aplicada em função da granulometria do material a ser distribuído sobre a manta. A Figura 3.24 ilustra o modelo do distribuidor idealizado.

Figura 3.24 - Carrinho distribuidor dos agregados e simulação da aplicação da taxa



a) Vista lateral do carrinho distribuidor



b) Vista superior (detalhe da abertura de queda dos agregados)



c) Aplicação da taxa de agregado da 1ª camada



d) Aplicação da taxa de agregado da 2ª camada

Fonte: Autor (2013).

Como observado na Figura 3.24, a aplicação da taxa de agregado é possibilitada através da abertura feita na caixa onde é depositado o material granular, sendo a mesma função do diâmetro máximo (D) do agregado a ser aplicada na camada. Também foi construída um trilho de madeira de forma a possibilitar o deslocamento do distribuidor sem o problema de travamento das rodas ocasionado pelo acúmulo do agregado, além de aumentar a altura de queda do mesmo.

A utilização do carrinho distribuidor trouxe vantagens quanto à aplicação dos agregados, pois ocorreu uma melhor uniformidade na distribuição dos mesmos, bem como um maior controle da taxa de aplicação e a não ocorrência de problemas de travamento de agregados na abertura, devido a possibilidade da vibração manual do carrinho na passagem sobre os trilhos.

A utilização do carrinho distribuidor ainda apresenta algumas dificuldades, como o controle da taxa de aplicação do agregado e a sobreposição dos mesmos quando em contato com a manta ou o molde metálico. Logo, de forma a evitar o surgimento de vazios na distribuição dos agregados sobre a manta, a metodologia desenvolvida na presente pesquisa recomenda que a passagem do carrinho distribuidor seja feita de forma a aplicar o agregado

em excesso e posteriormente retirar manualmente até atingir a taxa determinada. A verificação da taxa de agregado a ser aplicada na manta de TSP é feita observando a diferença de peso antes e depois da aplicação. Assim, é possível observar se a taxa real de agregado foi aplicada corretamente.

3.4.2 *Confecção dos corpos de prova de MRAF com agregados mineral e siderúrgico*

De forma a facilitar o entendimento das atividades envolvidas durante a confecção dos corpos de prova de MRAF, dividiu-se o presente tópico em duas partes. Inicialmente serão apresentados os processos de moldagem dos ensaios WTAT, LWT, coesão e cura pelo coesímetro (MCT). Posteriormente, serão apresentados e explicados os ensaios de dosagem e de avaliação da compatibilidade da mistura (WTAT, LWT e tempo de mistura). Ressalta-se que a metodologia aqui apresentada refere-se à utilização de ambos os agregados (AM e AS).

3.4.2.1 *Moldagem dos corpos de prova de MRAF*

Na realização do procedimento de dosagem e avaliação da compatibilidade do microrrevestimento asfáltico é necessária a moldagem de três corpos de prova para os ensaios de WTAT (NBR 14746/2001), LWT (NBR 14841/2002) e o ensaio de determinação e cura pelo coesímetro MCT (NBR 14798/2002). Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova são descritos a seguir e seguem as recomendações contidas nas respectivas normas e observações complementares verificadas na realização dos experimentos.

Na realização do ensaio de perda por abrasão úmida WTAT foi utilizado, na moldagem de um corpo de prova, aproximadamente 1400g de uma mistura contendo AM e cimento, enquadrado na Faixa II segundo a norma DNIT-ES 035/2005. Na confecção dos corpos de prova de AS foi utilizada, em torno de, 1900g de uma mistura contendo AS e cimento, também enquadrada na Faixa II do DNIT. A diferença dos valores em massa dos agregados na moldagem de um corpo de prova se deve a massa específica diferentes dos materiais. Sabe-se que os teores de emulsão, água e aditivo variam em função do projeto de dosagem.

O molde utilizado no ensaio de WTAT tem um diâmetro interno de 280mm e altura de 10mm. O procedimento de moldagem pode ser acompanhado nas etapas que estão resumidas nos itens de *a a f* que se seguem.

- a) adiciona-se o agregado e o cimento em um recipiente adequado. A pesagem da emulsão, água e aditivo é feita em percentual do teor de agregado mais cimento;
- b) realiza-se a mistura do agregado e cimento com a ajuda de uma colher;
- c) adiciona-se água, uma vez uniformizada a mistura dos agregados, e mistura-se novamente até a molhagem completa dos materiais (máximo 1min). No caso de utilização de aditivos, o mesmo deve ser adicionado previamente à quantidade de água;
- d) adiciona-se a quantidade ótima de emulsão e com a ajuda de uma colher realizam-se movimentos circulares a uma velocidade aproximada de 60 rotações por minuto (CASTRO, 2011);
- e) verte-se a mistura no molde, previamente posicionado sobre a manta asfáltica, e realiza-se o processo de regularização da superfície com um bastão de madeira com movimentos de vai e vem. Esses movimentos devem ser realizados de preferência uma única vez de forma a regularizar a superfície da amostra, procurando-se evitar a segregação do material;
- f) retira-se o molde metálico, após a moldagem, e coloca-se o corpo de prova na estufa até constância de peso.

A Figura 3.25 ilustra a sequência de atividades realizadas na moldagem de um corpo de prova de MRAF para a realização do ensaio de WTAT.

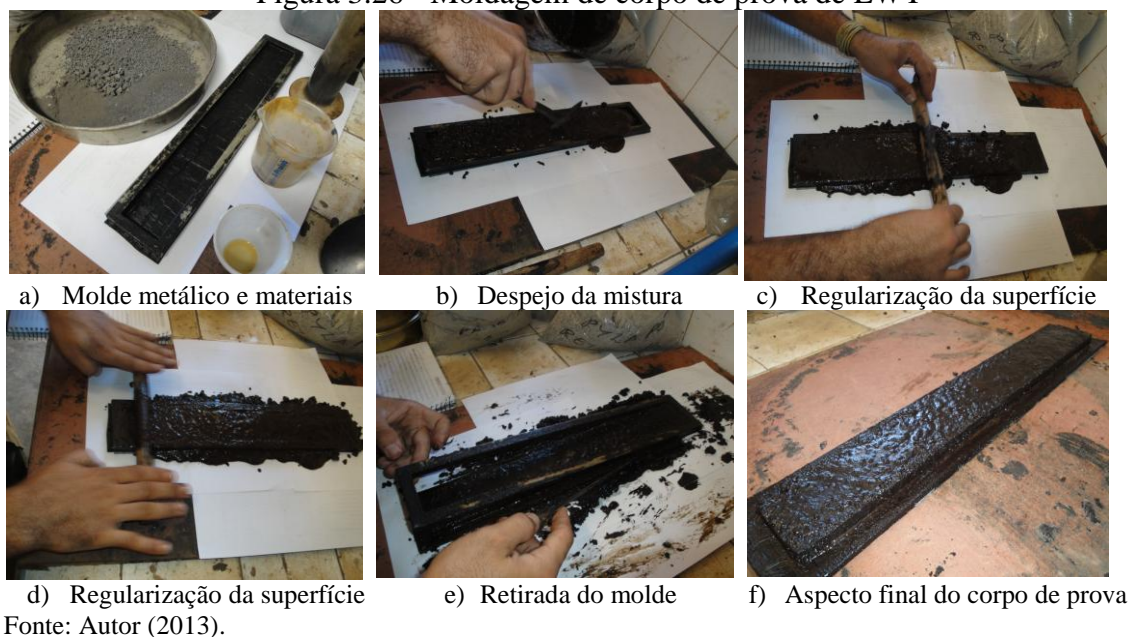
Figura 3.25 - Moldagem de corpo de prova de MRAF para o ensaio de WTAT



No ensaio de adesão de areia pelo equipamento LWT (NBR 14841/2002), utiliza-se outro molde de dimensões retangulares, ilustrado na Figura 3.26. Nesse tipo de ensaio é utilizada uma quantidade menor de material e a altura do molde é variável em função da dimensão máxima do agregado utilizado (25% acima).

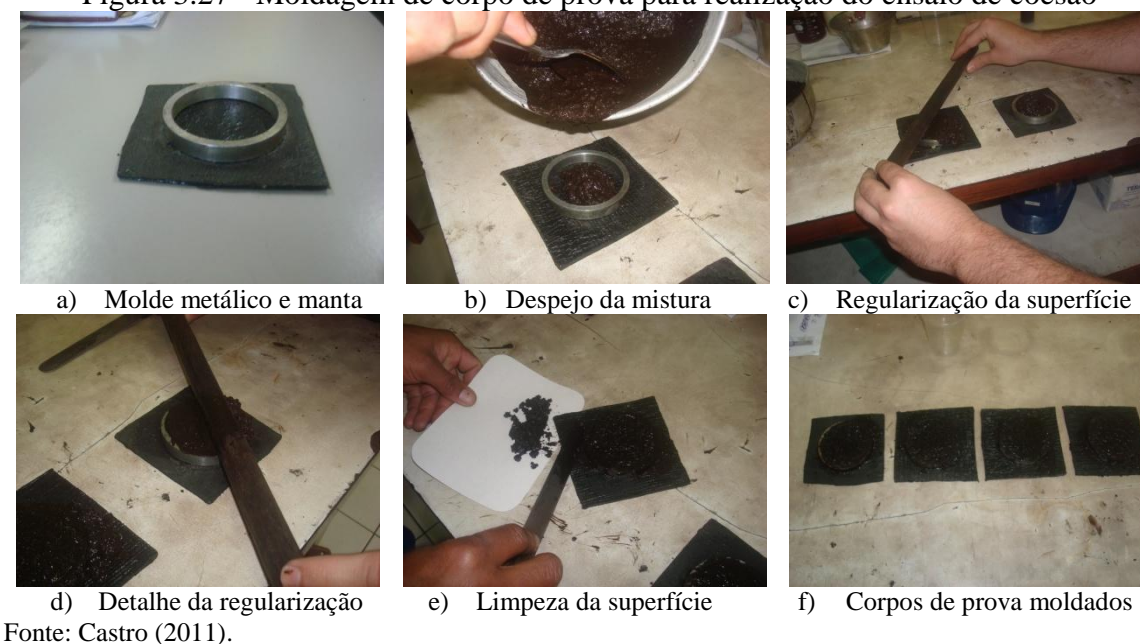
Os materiais e processo de mistura são os mesmos que os utilizados no ensaio de WTAT. A mistura é vertida sobre o molde e manta asfáltica, posteriormente realiza-se a regularização da superfície, retirada do molde e cura. A Figura 3.26 ilustra o processo de moldagem de um corpo de prova de LWT.

Figura 3.26 - Moldagem de corpo de prova de LWT



No ensaio de determinação da coesão da mistura (NBR 14798/2002), os materiais empregados e o processo de misturação foram os mesmos empregados anteriormente. Os moldes utilizados são anéis metálicos com alturas de 6mm e 10mm e diâmetro interno de 60mm. Assim como no ensaio de WTAT e LWT, a mistura é vertida no anel metálico, colocado sobre a manta asfáltica, e sua superfície é regularizada com a ajuda de um bastão de madeira, descartando o excesso. A Figura 3.27 ilustra a moldagem do corpo de prova do ensaio de coesão e cura pelo coesímetro.

Figura 3.27 - Moldagem de corpo de prova para realização do ensaio de coesão



3.4.2.2 *Dosagem dos corpos de prova de MRAF e ensaios de compatibilidade*

O projeto da mistura de microrrevestimento asfáltico consiste na seleção dos materiais adequados e determinação de seus teores na mistura, garantindo-se a compatibilidade entre os mesmos. O MRAF não apresenta um procedimento de dimensionamento estrutural da mistura por não apresentar capacidade estrutural, entretanto, os teores de aditivos e de água devem ser selecionados em função das condições executivas e de campo (VALE, 2003).

De acordo com Vale (2003), o projeto da mistura de MRAF consiste nas seguintes etapas:

- (i) seleção e teste dos componentes das misturas para verificação do atendimento às especificações;
- (ii) ensaios das misturas para determinação dos teores e características dos componentes principais (emulsão e agregado), conseqüentemente o teor de resíduo asfáltico, água, fíler e aditivo;
- (iii) ensaio de desempenho para avaliação do comportamento ao longo do tempo.

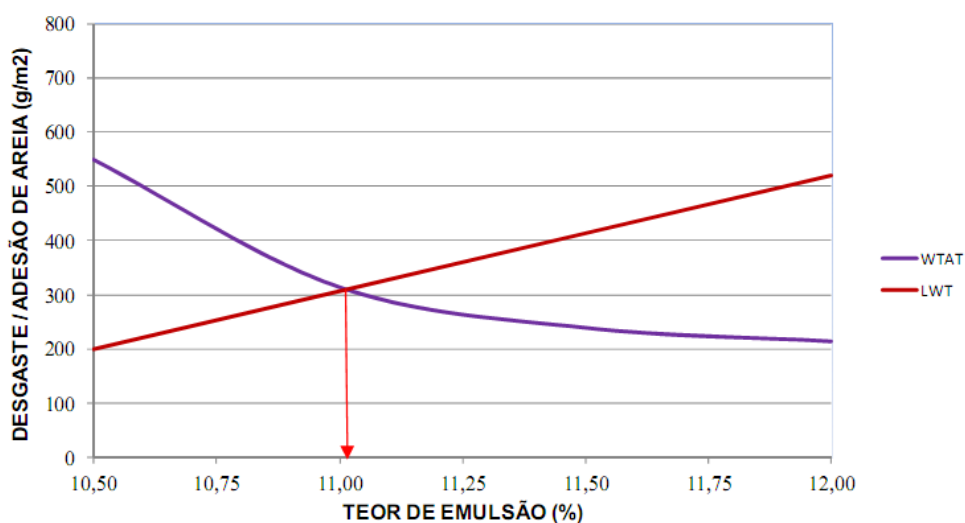
Na presente pesquisa, o procedimento de dosagem consistiu em definir teores de projeto de ligante (emulsão asfáltica RC1C-E) e aditivo, além da determinação da compatibilidade entre agregado e ligante. Quanto ao teor de água a ser empregado, decidiu-se pela determinação de um valor que garantisse a consistência adequada da mistura, tendo em vista a definição de um teor fixo de água ser arriscado para situações onde há variações climáticas.

Segundo Vale (2003), a determinação do teor ótimo de asfalto em um projeto de mistura pode ser feito de duas formas diferentes. O primeiro método consiste na realização de procedimentos preconizados pela ISSA. Já o segundo consiste na adoção de um procedimento Marshall modificado. O trabalho aqui desenvolvido seguiu o procedimento da ISSA (também recomendado pelo DNIT e ABNT) para a definição do teor de projeto da mistura, tendo em vista seguir a experiência local e de acordo com Castro (2011) ser o processo mais utilizado no estado do Ceará.

O procedimento de dosagem realizado na pesquisa consistiu na moldagem de corpos de prova com teores distintos de emulsão asfáltica (% em massa). Realizaram-se os ensaios de desgaste por abrasão úmida (WTAT) e adesão de areia (LWT), procurando-se

manter constante o conteúdo total de líquidos (teor de emulsão e teor de água) a fim de não alterar a consistência das amostras e influenciar nos resultados dos ensaios. A partir dos resultados obtidos, elabora-se um gráfico contendo as duas curvas WTAT e LWT superpostas, sendo que a interseção das duas curvas obtidas indica o teor ótimo de projeto a ser adotado. A Figura 3.28 ilustra as curvas WTAT e LWT e a definição do teor ótimo para o MRAF.

Figura 3.28 - Exemplo de definição de teor ótimo de emulsão
DEFINIÇÃO DO TEOR DE PROJETO



Fonte: Castro (2011).

O ensaio de perda por abrasão úmida *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) determina a resistência do revestimento à abrasão simulando a ação da água e do tráfego, retratando assim, os efeitos de um veículo fazendo curvas e freando sobre uma superfície úmida. A partir de sua realização, determina-se o teor mínimo de ligante para uma lama asfáltica ou para um microrrevestimento asfáltico, correspondendo ao valor máximo admitido para a perda de peso por abrasão.

O método de realização do ensaio pode ser resumido da seguinte forma: (1) prepara-se a mistura homogênea de agregados, emulsão asfáltica e água, podendo conter também cimento Portland, cal hidratada e/ou aditivos; (2) despeja-se a mistura em um molde e após a regularização de sua superfície, remove-se o molde e deixa secá-la a 60°C até se obter um peso constante e completa cura; (3) imerge-se a amostra em um banho de água a 25°C durante o período de 1h. Posteriormente, ela é desgastada com uma mangueira de borracha lastreada em movimentos rotativos durante cinco minutos e (4) lava-se a amostra

para remoção dos detritos e deixa secá-la a 60°C até atingir peso constante para nova pesagem.

A perda de peso devido aos esforços abrasivos do equipamento é medida pelo total de gramas perdidas ou em gramas perdidas por unidade de área desgastada (gramas por metro quadrado). As especificações brasileiras para MRAF admitem uma perda máxima de 538g/m² para amostras imersas em água durante uma hora.

A Figura 3.29 ilustra a sequência de etapas necessárias à confecção dos corpos de prova e a realização do ensaio de WTAT.



O ensaio denominado LWT é realizado em um equipamento que busca simular, em laboratório, a passagem do tráfego sobre um corpo de prova de lama asfáltica ou microrrevestimento. Através da realização desse ensaio é avaliado o efeito da compactação e as características de deformação do MRAF quando submetida ao movimento de uma roda de borracha sob condições de carga e número de ciclos fixos. O resultado do ensaio LWT é o teor de ligante máximo a ser utilizado na mistura.

Em resumo, o ensaio é realizado em um corpo de prova de 50mm de largura por 375mm de comprimento compactado com 1000 ciclos e carga de 56kg. Após a compactação o corpo é pesado e seco a 60°C até constância de peso. Adicionam-se 200g de areia padrão sobre a amostra submetendo o corpo de prova a mais 100 ciclos de carga. Após a areia solta ser retirada, realiza-se a pesagem e com o aumento de massa devido à adesão da areia evidencia-se uma maior exsudação do ligante na mistura. A taxa máxima admitida pelas especificações brasileiras indica um valor de 538g/m² para rodovias de tráfego pesado. A Figura 3.30 ilustra o ensaio sendo realizado.

Figura 3.30 - Etapas de execução do ensaio de LWT



Fonte: Autor (2013).

O ensaio de determinação do tempo mínimo de misturação é especificado pela NBR 14758/2001 que delimita um tempo de no mínimo 120 segundos para o rompimento da emulsão. A mistura, devido à combinação dos materiais, deve romper entre 120 e 300 segundos, iniciando sua cura em até 30 minutos, com expulsão de água clara e isenta de ligante asfáltico. Caso o tempo verificado seja menor que 120 segundos, deve-se acrescentar aditivo de forma a atingir o valor especificado.

Após a junção dos materiais e início da mistura, o MRAF inicialmente de características fluida, inicia um processo de enrijecimento e isto se deve ao rompimento da emulsão asfáltica. O tempo decorrente do início da mistura até a ruptura é definido como tempo mínimo de misturação. A Figura 3.31 ilustra o aspecto final da mistura após a realização do ensaio de tempo mínimo de misturação.

Figura 3.31 - Corpos de prova após o ensaio de tempo mínimo de misturação



Fonte: Castro (2011).

Ceratti e Reis (2011) argumentam que como o ensaio é realizado a 25°C em laboratório, os valores para o tempo mínimo de misturação devem ser de 180 a 300 segundos, com o objetivo de assegurar uma correta homogeneização.

Castro (2011), em conversas com técnicos e especialistas em MRAF, reforça que no estado do Ceará, que apresenta regiões de clima muito quente, aconselha-se que o tempo de mistura em laboratório seja de 240 segundos, garantindo assim um tempo adequado para o rompimento da emulsão em campo.

3.5 Terceiro procedimento experimental - Avaliação do desempenho dos corpos de prova de TSD e MRAF em laboratório

O terceiro procedimento experimental consistiu basicamente na tentativa de analisar o TSD e MRAF através do seu comportamento quanto ao ensaio de perda de massa por abrasão úmida WTAT. Para a realização do ensaio foram construídos corpos de prova de TSD e MRAF utilizando agregado mineral AM e agregado siderúrgico AS.

Nesse procedimento são apresentadas as atividades envolvidas na execução do ensaio de WTAT e as adaptações adotadas quanto à realização do mesmo em um revestimento do tipo TSD.

Inicialmente a ideia quanto à realização desse procedimento experimental consistia em analisar o comportamento de um revestimento *cape seal* comparativamente ao TSD, ambos confeccionados com AM e AS. Entretanto, observou-se que devido a forma construtiva do *cape seal* (primeira camada de TSS, seguida de uma segunda camada de MRAF), a variável a ser analisada (desgaste por abrasão) poderia ser obtida utilizando simplesmente um corpo de prova de MRAF, tendo em vista essa ser a camada superior e a que estaria em contato com a mangueira de borracha na realização do ensaio de WTAT.

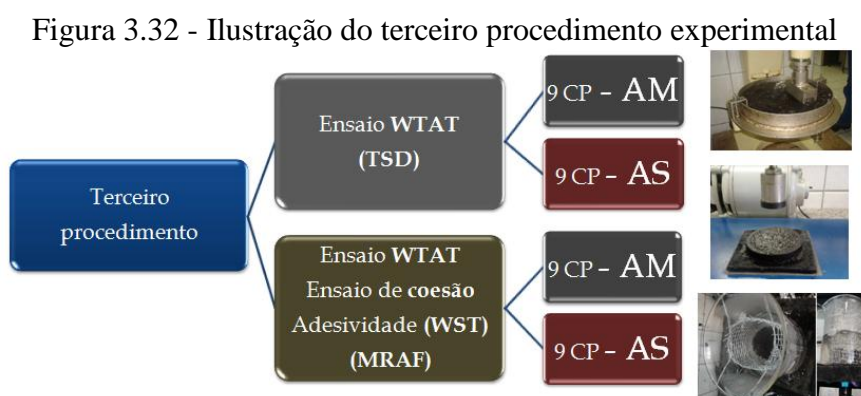
A hipótese foi considerada válida, tendo em vista que na realização do ensaio a carga aplicada pelo equipamento mais a mangueira é devida somente ao peso próprio e consiste basicamente na realização de movimentos circulares sobre a superfície úmida do MRAF, não exigindo assim esforço da camada inferior. Assim, acredita-se que os resultados obtidos para o desgaste sofrido pelos corpos de prova de *cape seal* podem ser estimados através dos resultados obtidos pelos corpos de prova de MRAF.

Observa-se também que a perda de massa sofrida pela realização do ensaio de WTAT acontece de formas diferentes no TSD e no MRAF, dependendo, assim, do tipo de revestimento estudado. Para um revestimento do tipo TSD, a perda de massa acontece principalmente devido ao arrancamento dos agregados pela mangueira de borracha, favorecida pela irregularidade da superfície. No caso do MRAF, a superfície praticamente plana faz com que a mangueira deslize sobre a mesma, ocasionando uma perda de massa devido ao atrito dos materiais.

Logo, esse ponto reforça a hipótese adotada nesta parte da metodologia quanto à avaliação do *cape seal*, a partir do uso dos corpos de prova de MRAF para avaliar o desgaste sofrido pelo ensaio de WTAT.

Visando analisar o desempenho e compatibilidade dos materiais do MRAF também foram determinados a coesão e as características da cura pelo coesímetro (NBR 14798/2002), que avaliam o tempo de liberação ao tráfego do revestimento, e o ensaio de determinação da adesividade de misturas (NBR 14757/2001), que verifica a resistência à ação da água na mistura após sua cura.

A Figura 3.32 ilustra esquematicamente o terceiro procedimento experimental do presente trabalho.



Fonte: Autor (2013).

3.5.1 *Análise de desempenho dos corpos de prova de TSD com agregado mineral e agregado siderúrgico*

Nesta etapa da pesquisa, utilizou-se o ensaio de WTAT como parâmetro de medida de desempenho dos revestimentos TSD quanto aos diferentes tipos de agregados, AM e AS, empregados no projeto. Utilizando-se a metodologia citada no segundo procedimento experimental foram moldados nove corpos de prova de TSD para cada agregado estudado (AM e AS), procurando-se manter as taxas calculadas em projeto.

O ensaio de WTAT, adaptado por Loiola (2009), e utilizado na presente pesquisa para avaliação das taxas de agregado e emulsão asfáltica em corpos de prova de TSD, contou com a utilização de uma manta asfáltica como molde na aplicação dos agregados e redução do tempo de imersão de 1h para 10 minutos. Essa mudança se deu devido a necessidade de maior velocidade na realização do ensaio e é justificada pela maior permeabilidade do TSD que precisa de menor tempo de imersão para saturação. Ensaio preliminares realizados nesta pesquisa apontam que os resultados de desgaste por abrasão não diferem significativamente em função do tempo de imersão.

Uma vez moldados os corpos de prova, conforme descrito no segundo procedimento experimental, as demais etapas da realização do ensaio consistem das seguintes atividades:

- a) remove-se o corpo de prova da estufa e deixa-o à temperatura ambiente por 1 hora para ser pesado e obter-se o peso antes do ensaio de desgaste (P_1);
- b) coloca-se o revestimento submerso em água por 10 minutos e em seguida submete-o ao ensaio WTAT por 5 minutos a uma rotação de 110 rpm;
- c) lava-se o revestimento da bandeja após o ciclo de abrasão úmida e deixa-o secar na estufa até atingir peso constante;
- d) pesa-se o material seco após o ensaio (P_2);
- e) calcula-se o desgaste (D), em %, através da Fórmula 3.1:

$$D = (P_1 - P_2) / P_3 \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

P_1 = massa do corpo de prova antes do desgaste (corpo de prova com a manta asfáltica);

P_2 = massa do corpo de prova depois do desgaste (corpo de prova com a manta asfáltica);

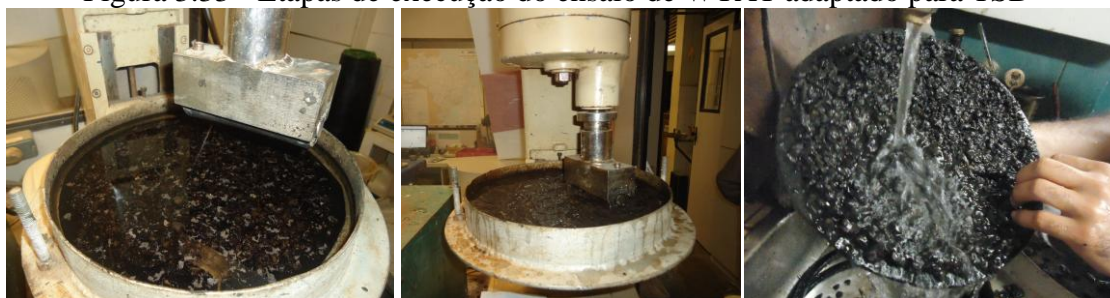
P_3 = massa somente de agregado e ligante inicialmente utilizada na moldagem do CP (P1 menos a massa da manta asfáltica).

Ressalta-se que na expressão inicial utilizada por Loiola (2009) e Pereira (2010), a maneira como o cálculo do desgaste foi realizado apresentava um erro, pois considerava-se o valor de P_3 igual a P_1 . Dessa forma, a massa inicial do corpo de prova estava sendo majorada, pois o P_1 considerado era igual a massa de agregado + ligante + manta asfáltica. Assim, a diferença de massa obtida pela ensaio de WTAT ($P_1 - P_2$), quando dividida pelo peso original resultava em um valor menor do que o desgaste real.

Logo, verifica-se na Fórmula 3.1, que o valor do P_3 corresponde somente a massa inicial de agregado e ligante utilizada na moldagem do corpo de prova antes da realização do ensaio de WTAT.

A Figura 3.33 ilustra algumas etapas da realização do ensaio WTAT adaptado para TSD.

Figura 3.33 - Etapas de execução do ensaio de WTAT adaptado para TSD



a) Corpo de prova submerso
 Fonte: Autor (2013).
 b) Ensaio WTAT
 c) Lavagem do corpo de prova

3.5.2 *Análise do desempenho dos corpos de prova de MRAF com agregado mineral e agregado siderúrgico*

A mistura a ser avaliada foi obtida através da determinação da composição dos seus materiais constituintes e definição do teor ótimo de emulsão asfáltica. Para tanto, utilizou-se o ensaio de perda por abrasão úmida WTAT, o ensaio de coesão e características da cura pelo coesímetro (NBR 14798/2002) e o ensaio de adesividade (NBR 14757/2001).

A utilização do ensaio de WTAT, como medida de desgaste das misturas de AM e AS, foi realizada mantendo-se constante o teor de emulsão asfáltica definida como teor ótimo de ligante. Foram confeccionados 9 corpos de prova visando obter parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e coeficiente de variação) que conferissem maior confiabilidade aos resultados dos ensaios apresentados.

Outra forma de avaliar o desempenho da mistura de MRAF foi através dos resultados do ensaio de coesão da mistura. O ensaio de coesão e características da cura pelo coesímetro tem como finalidade classificar e definir o tempo de cura e de liberação ao tráfego do MRAF. Outra aspecto importante obtido desse ensaio é a determinação do seu ponto máximo de coesão que visa otimizar a quantidade de fíler empregado na mistura (CERATTI; REIS, 2011).

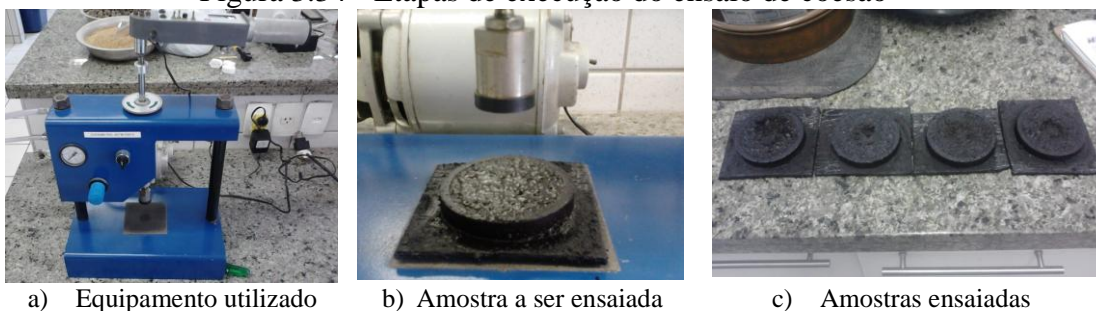
O procedimento laboratorial consistiu basicamente na medição de torques sucessivos no coesímetro em intervalos de 30, 60, 90, 120 e 150 minutos após o início do ensaio. O coesímetro consiste de um aparelho que aplica uma pressão de 200kPa no corpo de prova para a realização do ensaio e mede a resistência à torção de uma amostra quando submetida a uma pressão de 29lbs/in², equivalente a exercida pelo veículo (CERATTI; REIS, 2011).

A *International Slurry Surfacing Association* (ISSA) recomenda que uma mistura seja definida como de cura rápida quando o torque medido atinge no mínimo 12kg.cm, 30

minutos após ser moldada. Para um torque de no mínimo 20kg.cm, 60 minutos após ser moldada é classificada como de rápida liberação ao tráfego. O torque de 12kg.cm representa a coesão mínima necessária para a mistura atingir o limite de trabalhabilidade e ser considerada resistente a água. Já um torque de 20kg.cm representa a coesão mínima para abertura ao tráfego.

Ceratti e Reis (2011) ressaltam que os valores estabelecidos pelas normas brasileiras foram definidos pela ISSA para uma mistura de MRAF com 12,7mm de espessura, a temperatura de 24°C, e 50% de umidade relativa do ar. Assim, na prática deve-se estabelecer limites de tolerância dependendo das condições encontradas no local. A Figura 3.34 ilustra algumas etapas da realização do ensaio de coesão.

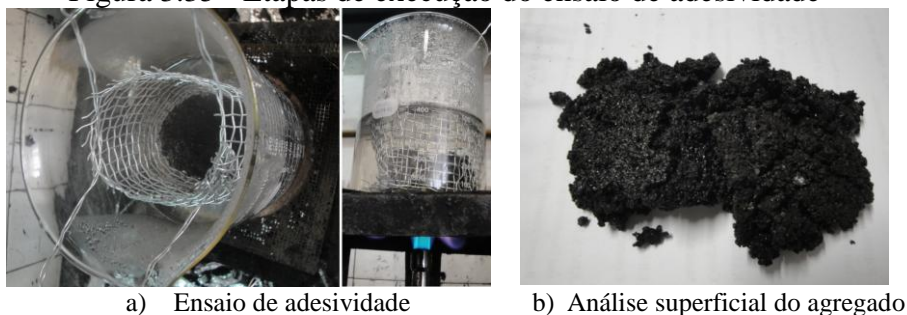
Figura 3.34 - Etapas de execução do ensaio de coesão



Fonte: Autor (2013).

O ensaio de adesividade da mistura determina a resistência à ação da água (adesividade) da mistura após sua cura. O ensaio consiste em submeter uma amostra de mistura curada na água em ebulição por três minutos. Após a retirada da água é feita uma análise superficial a fim de estimar a área descoberta pela película de asfalto, sendo o resultado expresso em porcentagem total da superfície do agregado. As normas brasileiras, baseadas nas recomendações da ISSA, recomendam um valor mínimo de 90% para o resultado ser considerado satisfatório (CERATTI; REIS, 2011). A Figura 3.35 mostra algumas etapas de execução do ensaio de adesividade.

Figura 3.35 - Etapas de execução do ensaio de adesividade



a) Ensaio de adesividade
Fonte: Autor (2013).

b) Análise superficial do agregado

3.6 Quarto procedimento experimental - Avaliação do desempenho do TSD e *cape seal* submetido ao simulador de tráfego

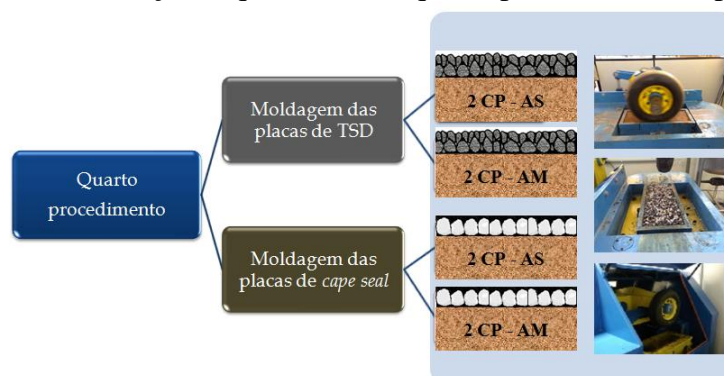
A realização do quarto procedimento experimental teve como objetivo a confecção de placas de TSD e *cape seal*, visando avaliar o desempenho das mesmas quando submetidas ao simulador de tráfego de laboratório, comparando-as em termos de deflexão, desgaste e avaliação da macrotextura e microtextura. Para a realização dos ensaios foram utilizados o agregado mineral AM e o agregado siderúrgico AS.

Neste procedimento são apresentadas as atividades envolvidas na confecção das placas de TSD e *cape seal*. Para tanto, dividiu-se este quarto procedimento em tópicos que melhor ilustram o desenvolvimento das atividades. Inicialmente apresenta-se a metodologia da moldagem das placas de solo-brita, simulando a camada de base do revestimento. Posteriormente, apresenta-se o cálculo das taxas de agregados e ligantes e a metodologia de moldagem dos revestimentos TSD e *cape seal* sobre as placas de solo-brita. Os procedimentos de moldagem foram baseados nas recomendações seguidas por Loiola (2009).

Para avaliação do TSD e do *cape seal*, através do simulador de tráfego, foram construídas placas com 10cm de altura, 18cm de largura e 50cm de comprimento, de ambos os revestimentos a serem ensaiadas por um eixo composto de dois pneumáticos que em contato permanente com os revestimentos aplicariam diferentes ciclos de passagens com intensidade constante de 75kg. Esse procedimento foi desenvolvido conjuntamente com os engenheiros Synardo Leonardo de Oliveira Pereira e Pedro Bastos de Castro visando avaliar diferentes revestimentos do grupo dos tratamentos de superfície.

A avaliação da macrotextura e microtextura nas placas de TSD e *cape seal* foi feita através dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico. A Figura 3.36 ilustra esquematicamente o quarto procedimento experimental.

Figura 3.36 - Ilustração esquemática do quarto procedimento experimental



Fonte: Autor (2013).

3.6.1 *Análise de desempenho do revestimento TSD em simuladores de tráfego de laboratório*

As atividades envolvidas na avaliação de desempenho do revestimento TSD consistiram da: (1) moldagem da base, simulada pela construção da camada de solo-brita e (2) confecção do revestimento TSD, seguindo a metodologia adotada para o preparo dos corpos de prova no segundo procedimento experimental, com taxas de agregados e emulsão recalculadas em função da dimensão da área da placa. Uma vez construídas, as placas foram submetidas ao simulador de tráfego.

3.6.1.1 *Moldagem das placas de TSD com agregados mineral e siderúrgico*

A moldagem das placas de solo-brita foi realizada utilizando uma mistura de 50% de solo da região de Maracanaú e 50% de brita $\frac{3}{4}$ ". O solo e a brita foram submetidos aos ensaios de caracterização usualmente empregados na construção de bases de pavimentos com solo-brita e forneceram resultados satisfatórios. A especificação técnica do DER de São Paulo (ET-DE-P00/006) foi utilizada como parâmetro de referência.

Na moldagem das placas de solo-brita adotou-se o seguinte procedimento:

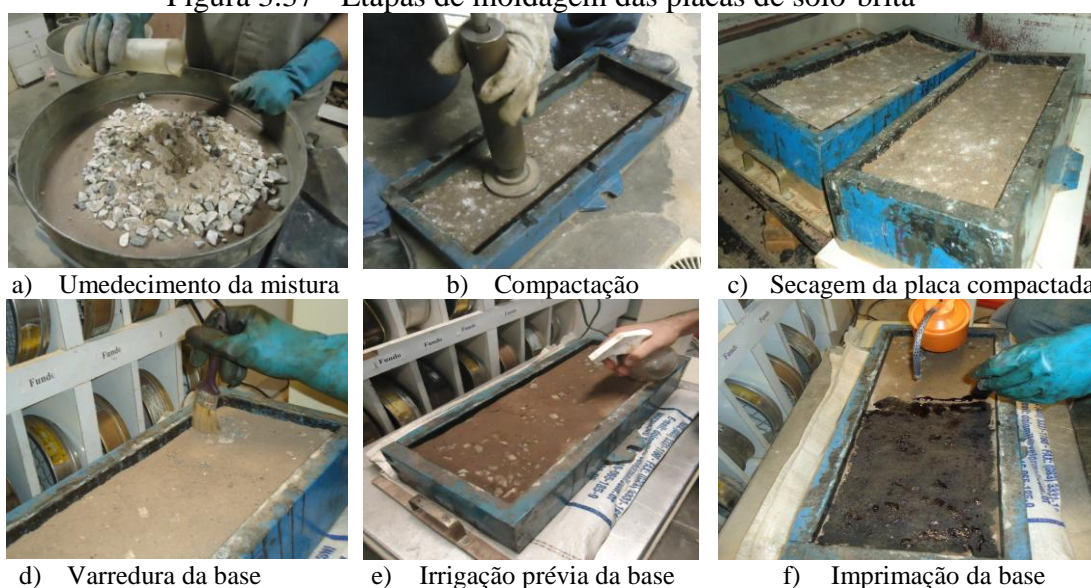
- a) preparação e separação do solo e da brita quanto à pesagem dos materiais, composição da mistura e teor de umidade adequado (teor de umidade ótima da mistura);
- b) moldagem das placas em quatro camadas de 2cm de altura cada, utilizando 4,2kg de mistura de solo-brita por camada, previamente umedecida na umidade

ótima e aplicando-se uma energia de compactação modificada, totalizando 236 golpes em cada camada e uma altura final de 8cm para a base;

- c) concluído o processo de compactação, realizou-se na placa o ensaio de densidade *in situ*, visando analisar o grau de compactação (GC) com o uso do frasco de areia. Esse procedimento foi realizado somente na primeira placa de solo-brita, tendo em vista verificar o GC requerido e as mesmas condições relacionadas à camada de base para todas as placas testadas;
- d) posteriormente, realizou-se a secagem das placas de solo-brita em estufa aquecida a 60°C durante um período de 24h;
- e) uma vez concluída a secagem, realizou-se a imprimação betuminosa segundo a metodologia desenvolvida por Rabêlo (2006) que consistiu nas etapas de: varredura da base, irrigação prévia e distribuição do ligante;
- f) após o término da imprimação, as placas foram novamente deixadas na estufa para cura a 60° durante um período de 24h.

Ressalta-se que a altura de 8cm da base compactada foi definida visando-se manter a mesma espessura quanto aos revestimentos TSD e *cape seal*. Dessa forma, ambas as placas quando concluídas apresentariam aproximadamente a mesma espessura de revestimento de 2cm, com uma altura final da placa de 10cm (base e revestimento). Procurou-se, assim, comparar-se os revestimentos considerando como sendo de mesma espessura. A Figura 3.37 ilustra as etapas envolvidas quanto à moldagem das placas de solo-brita.

Figura 3.37 - Etapas de moldagem das placas de solo-brita



Fonte: Autor (2013).

A confecção das placas procurou inicialmente seguir a metodologia desenvolvida por Loiola (2009), que foi utilizada como referencia para o estabelecimento da metodologia aqui desenvolvida, apesar das diversas modificações e adaptações executadas pelo autor da presente pesquisa.

No aspecto relacionado à avaliação da imprimação betuminosa sobre solos do estado do Ceará, alguns autores como Rabêlo (2006), Vasconcelos (2009) e Silva (2010) tem estudado o assunto. Outros trabalhos internacionais também se dedicaram a esse tema e de forma geral consideram como um bom resultado de uma imprimação betuminosa valores de penetração do ligante, na camada de base, entre 4 a 10mm.

A aplicação da imprimação foi feita adaptando-se a metodologia desenvolvida por Rabêlo (2006) em corpos de prova moldados em cilindro Marshall para placas retangulares a serem ensaiadas pelo simulador. Utilizou-se o asfalto diluído de cura média (CM-30), a uma temperatura de 50°C, com uma taxa de 1,0 L/m², que foi aplicada em toda a camada uniformemente e considerada satisfatória para um valor de penetração entre 4 e 10mm.

Uma vez concluída a moldagem das bases das placas com a mistura solo-brita e o processo de imprimação, definiu-se, quanto à construção do revestimento em TSD, utilizar as mesmas taxas de agregados e ligantes como realizado no segundo procedimento experimental.

Assim, dentre as três combinações sugeridas pela especificação DERT-ES-P 11/00, optou-se por trabalhar com a combinação das classes II – III que apresenta como material da 1ª camada D1 = 16mm e d1 = 10mm (5/8” – 3/8”) e para a 2ª camada D2 = 10 mm e d2 = 6,3 mm (3/8” – 1/4”), para um tráfego com um número N entre 10⁶ a 2,5 × 10⁶. Como as taxas de agregados e ligantes já haviam sido calculados anteriormente, para uma área qualquer, para a confecção das placas os valores foram modificados em função da área superficial da placa a ser revestida com o TSD.

Após a definição das taxas de agregados e ligantes, realizou-se a aplicação da emulsão asfáltica RR2-C a uma temperatura de 60°C. Logo na sequência foi feita a aplicação do agregado e a compactação do mesmo utilizando a mesa compactadora do simulador de laboratório. A mesa compactadora simula a passagem de um rolo compactador sobre o revestimento com uma determinada pressão e cuja especificação de serviço segue a norma francesa NF P 98-250-2 (AFNOR, 1991a) - *Preparation des Mélanges Hydrocarbonés*.

Segundo Bernucci *et al.* (2010), o número de passadas a ser aplicada em um tratamento superficial depende das características do rolo compressor, do substrato, do agregado e do ligante, sendo necessária uma inspeção visual subjetiva, do resultado da

compressão de um trecho-teste, para determinar o procedimento mais adequado de execução e o número ótimo de passadas do rolo.

Reforça-se ainda que na compactação de um tratamento superficial, pode-se considerar como número ótimo de passadas, aquele onde não se perceba mais o rearranjo significativo dos agregados, nem marcações feitas pelo rolo compressor, como também a limitação quanto à quebra de partículas devido a compressão (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A determinação da quantidade de passadas e carregamento aplicado nas placas foi feito através de observações em placas previamente ensaiadas, nas quais definiram-se valores de carregamento aplicados pelo pneumático de forma a não provocar quebra dos agregados e uma penetração e travamento adequado do revestimento a base.

Depois da realização de alguns testes, chegou-se ao seguinte procedimento de moldagem das placas com revestimento do tipo TSD:

- a) aplicação da 1ª taxa de ligante (RR2C) a 60°C;
- b) aplicação da 1ª taxa de agregado utilizando o carrinho distribuidor de agregados;
- c) retirada do excesso de agregado e verificação da taxa aplicada;
- d) compactação da 1ª camada realizada através de cinco passadas do pneumático com uma pressão de 200kg ao final das cinco passadas, a placa foi retirada e observou-se a ocorrência ou não de quebra dos agregados, depois repetiu-se o procedimento mais duas vezes, totalizando quinze passadas;
- e) aplicação da 2ª taxa de ligante (RR2C) a 60°C;
- f) aplicação da 2ª taxa de agregado;
- g) retirada do excesso e compactação da 2ª camada de agregado;
- h) aplicação da 3ª taxa de ligante que consiste de um banho de emulsão diluída em água na proporção de 1:1.

A utilização da placa metálica na compressão dos agregados (ver Figura 3.38) foi adotada visando distribuir melhor o carregamento aplicado pelo pneumático a toda área superficial da mesma. Tomou-se essa medida após a verificação de que a utilização do pneumático em contato direto com os agregados, poderia gerar arrancamento de material e assim influenciar nas taxas determinadas e na acomodação das partículas.

A Figura 3.38 ilustra a sequência das atividades realizadas na moldagem das placas que foram submetidas ao simulador de tráfego de laboratório.

Figura 3.38 - Etapas desenvolvidas na moldagem do revestimento TSD



Fonte: Autor (2013).

Após a confecção do revestimento e finalização da moldagem das placas, as mesmas foram deixadas curar em estufa a 60°C por 24h e em temperatura ambiente por mais 24h, para posterior realização do ensaio com o simulador de tráfego a temperatura ambiente. O ensaio foi realizado tendo como base a norma francesa NF P98-253-1 (AFNOR, 1991b) - *Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*.

3.6.1.2 Avaliação das Placas de TSD em Simulador de Tráfego

Os ensaios realizados nas placas de TSD tiveram como objetivo acompanhar os efeitos exercidos pelo carregamento simulado nos revestimentos testados. Outro aspecto observado foi a obtenção de parâmetros que permitissem uma análise comparativa entre o revestimento TSD e o *cape seal*, ambos testados nas mesmas condições. Os ensaios realizados consistiram na avaliação do desgaste superficial e desagregação (o material solto foi retirado e pesado), macrotextura (através do ensaio de mancha de areia - ASTM-E-303-93) e microtextura (através do ensaio de pêndulo britânico - ASTM E 965-96). Os ensaios de macrotextura e microtextura foram realizados antes e depois da aplicação do carregamento através do simulador de tráfego.

O ensaio realizado pelo simulador de tráfego de pequeno porte consistiu da aplicação de uma carga de 75kg na placa de TSD através de um pneumático. Na realização de cada ensaio foram utilizadas duas placas confeccionadas com taxas iguais. O procedimento do ensaio foi imaginado, baseando-se na avaliação de deformação permanente descrito na norma

francesa NF P98-253-1 (AFNOR, 1991b), que consiste basicamente na medição da profundidade de afundamento em posições previamente demarcadas sobre as placas com emprego de um molde.

Na definição do carregamento a ser aplicado foram realizados alguns testes em corpos de prova previamente confeccionados. A norma francesa NF P98-253-1, recomenda para uma mistura a quente que o carregamento aplicado pelo pneumático, durante a realização do ensaio, seja de 500kg. No entanto, em um ensaio realizado para o TSD com agregado mineral com este carregamento, o mesmo se apresentou praticamente deteriorado após a passagem dos 100 primeiros ciclos. Diante do resultado apresentado, decidiu-se por aplicar uma carga menor, 75kg, possibilitando assim o acompanhamento e a evolução do desgaste ao longo dos ciclos para um revestimento mais esbelto como é o caso dos TSs.

Devido à irregularidade superficial do revestimento TSD, não foi possível acompanhar a deformação permanente através de leituras que medissem o deslocamento vertical do revestimento. No entanto, avaliou-se visualmente o afundamento e desgaste sofrido pelas placas através de diferentes ciclos de passagem do simulador, visando, assim, acompanhar a evolução da deformação e desgaste sofrido pelo TSD em função do carregamento aplicado. Foi realizada uma avaliação superficial e pesagem dos agregados soltos para um carregamento de 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 7000 e 10000 ciclos. A Figura 3.39 ilustra algumas etapas do ensaio realizado.

Figura 3.39 - Placas de TSD de agregado mineral submetidas ao simulador de tráfego



a) Aspecto inicial das placas

b) Ensaio em andamento

c) Retirada dos agregados soltos

Fonte: Autor (2013).

O ensaio de mancha de areia foi realizado segundo a norma ASTM E 965-96 (2001) para analisar a macrotextura do revestimento. O método consiste em obter a profundidade média da textura superficial do pavimento, por meio de uma mancha de areia circular, sendo conhecido o volume exato de areia limpa, seca e com granulometria padrão, passante na peneira n°60 (0,177mm) e retida na peneira n°80 (0,250mm) (CERATTI ; REIS, 2011). A Figura 3.40 ilustra os materiais e o ensaio de mancha de areia.

Figura 3.40 - Execução do ensaio de mancha de areia



a) Materiais utilizados no ensaio b) Medição do diâmetro da mancha
 Fonte: Autor (2013).

O volume de areia determinado é espalhado sobre a superfície do revestimento com o auxílio de uma base de um pistão circular, movimentado em círculos, de modo a distribuí-la de forma homogênea. Na sequência, mede-se o diâmetro do círculo de areia em três direções distintas com o auxílio de uma régua e calcula-se a média das determinações (Bernucci *et al.*, 2010). A profundidade média da textura HS é definida pela Equação 3.2.

$$HS = 4.V/D^2.\pi \quad (3.2)$$

onde:

HS = altura média da mancha de areia;

V = volume de areia conhecido (25.000 mm³);

D = diâmetro médio da mancha (mm).

Segundo Ceratti e Reis (2011) a profundidade da macrotextura indica os canais entre os agregados que são capazes de promover a drenagem reduzindo a lâmina d'água entre a superfície de rolamento e os pneus, e conseqüentemente, o risco de hidroplanagem que existe sempre que o filme de água sobre o revestimento exibir uma espessura maior que 5mm e a velocidade do veículo for superior a 100km/h. A classificação da macrotextura é dada pela altura da mancha de areia e pode ser obtida através da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Classes de macrotextura

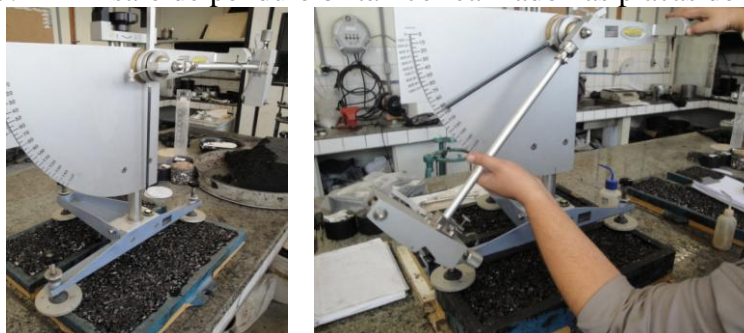
Classe	Altura média da mancha de areia (mm)
Muito fina ou muito fechada	HS ≤ 0,20
Fina ou fechada	0,20 ≤ HS ≤ 0,40
Média	0,40 ≤ HS ≤ 0,80
Grosseira ou aberta	0,80 ≤ HS ≤ 1,20
Muito grosseira ou muito aberta	HS > 1,20

Fonte: DNIT (2006).

O DNIT (2006) através de seu Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos sugere valores de macrotextura na faixa entre 0,6mm e 1,2mm de altura média da mancha de areia (textura média a grosseira). Acima de 1,2mm, a textura é considerada muito aberta, podendo causar desgaste excessivo nos pneus, maior consumo de combustível e maior ruído (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A avaliação da microtextura do revestimento foi feita através do ensaio conhecido como pêndulo britânico segundo a norma ASTM-E 303-93 (1998). O pêndulo britânico determina através de uma medida escalar o grau de escorregamento ou derrapagem presente na superfície de um pavimento, também chamado de coeficiente de atrito cinemático. Na realização do ensaio é utilizada uma placa de borracha que simulando um pneumático é liberada da extremidade de um pêndulo em queda livre, descrevendo um arco que tangencia e fricciona a superfície do revestimento (DNIT, 2006). A Figura 3.41 ilustra o ensaio.

Figura 3.41 - Ensaio de pêndulo britânico realizado nas placas de TSD



a) Calibração do pêndulo
Fonte: Autor (2013).

b) Realização da leitura

Conforme Ceratti e Reis (2011) as condições do ensaio de microtextura foram definidas de forma que os valores determinados no equipamento correspondessem ao valor de resistência à derrapagem (VRD) de um pneumático padrão derrapando sobre um pavimento a 48km/h. A Tabela 3.5 ilustra as classes de microtextura em função do valor do VRD.

Tabela 3.5 - Classes de microtextura

Classe	Valor de resistência à derrapagem
Perigosa	< 25
Muito lisa	$25 \leq \text{VRD} \leq 31$
Lisa	$32 \leq \text{VRD} \leq 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq \text{VRD} \leq 46$
Medianamente rugosa	$47 \leq \text{VRD} \leq 54$
Rugosa	$55 \leq \text{VRD} \leq 75$
Muito rugosa	$\text{VRD} > 75$

Fonte: DNIT (2006).

A especificação de serviço de concreto asfáltico (DNIT 031/2006-ES) recomenda que o valor do VRD seja maior ou igual a 45 quando empregado o pêndulo britânico. Para Bernucci *et al.* (2010), o valor mínimo deve ser de 47 visando assim garantir uma microtextura medianamente rugosa. De acordo com esses autores, a microtextura é uma característica muito importante para rompimento da película de água e promoção do contato pneu-pavimento para baixas velocidades de deslocamento, até cerca de 40 km/h.

De forma geral, podem-se resumir todas as etapas realizadas neste quarto procedimento experimental aplicado as placas de TSD através da seguinte sequência:

- a) compactação da base de solo-brita;
- b) confecção do revestimento TSD;
- c) avaliação da textura com o ensaio de mancha de areia e pêndulo antes de submeter as placas ao simulador;
- d) realização do ensaio com pares de placas no simulador;
- e) avaliação visual do desgaste para os diferentes ciclos do simulador;
- f) remoção e pesagem dos agregados soltos após cada ciclo do ensaio;
- g) avaliação da textura através do ensaio de mancha de areia e pêndulo após o término do carregamento.

A Figura 3.42 ilustra resumidamente algumas etapas realizadas no quarto procedimento experimental nas placas de TSD.

Figura 3.42 - Etapas desenvolvidas nas placas de TSD



Fonte: Autor (2013).

As etapas apresentadas na Figura 3.42, demandam um período médio de 9 dias, incluindo a moldagem das placas de TSD e realização de todos os ensaios.

3.6.2 *Análise de desempenho do revestimento cape seal em simuladores de tráfego*

As atividades envolvidas na avaliação de desempenho do revestimento *cape seal* foram realizadas seguindo os mesmos procedimentos executados na moldagem e avaliação das placas em TSD, descritos anteriormente no subitem 3.6.1. Os detalhes adicionais referentes ao processo de moldagem do revestimento *cape seal* serão melhor discutidos nos tópicos a seguir. Vale destacar que as placas de *cape seal* foram confeccionadas utilizando os agregados mineral e siderúrgico e posteriormente foram submetidas ao simulador de tráfego de laboratório.

3.6.2.1 *Moldagem das placas de cape seal com agregado mineral e siderúrgico*

Uma vez concluída a moldagem e imprimação da camada de base das placas com a mistura solo-brita, calculou-se, segundo a especificação DERT-ES-P 10/00, as taxas de agregado e ligante a serem utilizadas na confecção do TSS, primeira camada do revestimento *cape seal*. Dentre as classes sugeridas pela especificação DERT-ES-P 10/00, adotou-se a classe granulométrica II que apresenta agregados com as seguintes dimensões: $D_1 = 16\text{mm}$ e $d_1 = 10\text{mm}$ ($5/8'' - 3/8''$) para um tráfego com um número N entre $7,5 \times 10^4$ a $2,5 \times 10^5$.

Quanto à construção do MRAF, segunda camada do revestimento *cape seal*, a granulometria adotada foi a Faixa II do DNIT e o teor ótimo de emulsão RC1C-E foi definido para o MRAF no segundo procedimento experimental.

Posteriormente, construiu-se o revestimento em TSS seguindo a metodologia anteriormente comentada. Realizou-se a aplicação simultânea da emulsão asfáltica RR2C a uma temperatura de 60°C . Na sequência foi feita a aplicação do agregado e a compactação do mesmo utilizando a mesa compactadora. Logo após, aplicou-se o banho diluído e a placa foi deixada curar em estufa por um período de 24h a 60°C , sendo em seguida colocada na temperatura ambiente por mais 24h, para posterior aplicação do MRAF.

Conforme observado em alguns trabalhos técnicos, o período de tempo em que o TSS é construído e o MRAF é aplicado varia em um intervalo de 2 a 10 dias, com liberação do tráfego e correção de eventuais problemas que venham a surgir no TSS antes da aplicação do MRAF. Visando reduzir o período de tempo que envolve a construção das placas e

realização dos ensaios, decidiu-se na presente pesquisa adotar o intervalo de 2 dias entre a construção do TSS e aplicação do MRAF.

A justificativa para tal redução foi a observação visual das placas após 2 dias de cura a temperatura ambiente. Verificou-se que as mesmas apresentavam cura total da emulsão aplicada além de rigidez suficiente para aplicação do MRAF. Essa medida visou estimar em laboratório o comportamento do revestimento com uma liberação mais rápida ao tráfego.

A aplicação do microrrevestimento sobre o TSS se deu com a preparação separadamente da mistura de MRAF conforme descrito no segundo procedimento experimental. Os componentes da mistura de MRAF foram calculados de forma a se atingir um volume que preenchesse os vazios existentes entre o TSS e a altura final da placa, totalizando uma espessura final para o *cape seal* de aproximadamente 2cm.

A Figura 3.43 ilustra a sequência dos procedimentos realizados na fabricação do revestimento *cape seal* para ambos os agregados.

Figura 3.43 - Etapas desenvolvidas na moldagem do revestimento *cape seal*



Fonte: Autor (2013).

Após a confecção do revestimento *cape seal* e finalização da moldagem das placas, as mesmas foram deixadas curar em estufa por 24h a 60°C e em temperatura ambiente por mais 24h, para posterior realização do ensaio com o simulador de tráfego de laboratório a temperatura ambiente.

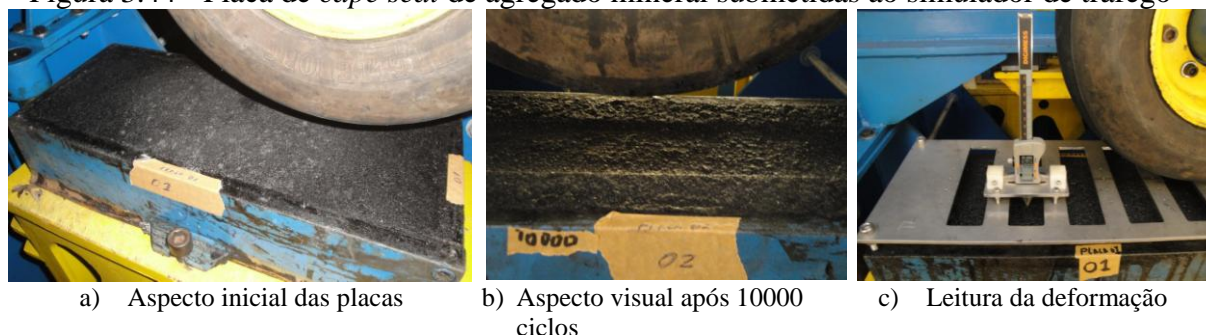
3.6.2.2 Avaliação das placas de *cape seal* em simulador de tráfego

Os ensaios realizados nas placas de *cape seal* têm como objetivo acompanhar os efeitos sofridos pelo carregamento simulado nos revestimentos testados. Outro aspecto observado foi a obtenção de parâmetros que permitisse uma análise comparativa entre o revestimento TSD e o *cape seal*, ambos testados nas mesmas condições.

Os ensaios realizados foram os mesmos realizados no revestimento de TSD e visaram avaliar o desgaste visual sofrido pelo *cape seal*, a macrotextura e microtextura do revestimento, além da deformação permanente sofrida pelo *cape seal* após a passagem do carregamento.

Além dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico executados no início e ao término do ensaio de simulação, realizou-se, de acordo com a norma francesa NF P98-253-1, a leitura do afundamento nas placas para os seguintes ciclos de carregamento: 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 7000, 10000, 15000, 20000 e 30000 ciclos. A Figura 3.44 ilustra algumas etapas do ensaio realizado.

Figura 3.44 - Placa de *cape seal* de agregado mineral submetidas ao simulador de tráfego



Fonte: Autor (2013).

Ceratti e Reis (2011) propõem que as características relacionadas à macrotextura e microtextura estabelecidos para o MRAF sigam os respectivos valores limites da especificação de serviço de concreto asfáltico (DNIT 031/2006-ES), conforme já vem sendo adotado em parte das concessões rodoviárias do país.

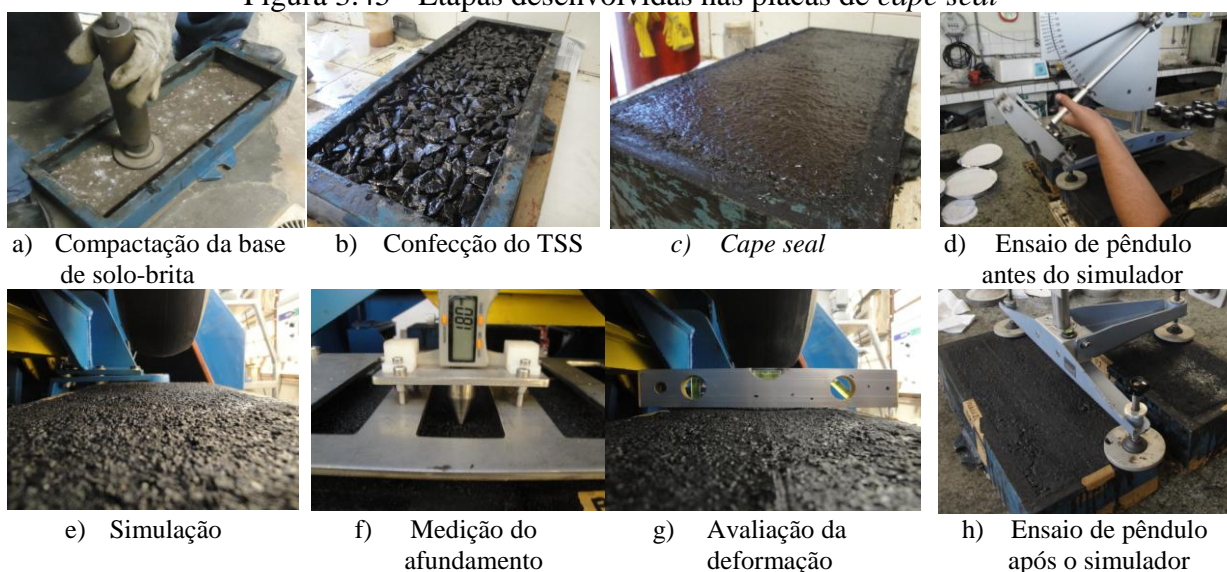
De forma geral, podem-se resumir todas as etapas realizadas neste quarto procedimento experimental aplicado as placas de *cape seal* através da seguinte sequência:

- a) compactação da base de solo-brita;
- b) confecção do revestimento TSS;
- c) pesagem da placa com o revestimento de TSS;

- d) confecção do revestimento MRAF sobre o TSS;
- e) pesagem da placa após confecção do revestimento *cape seal*;
- f) avaliação da textura com o ensaio de mancha de areia e pêndulo britânico antes de submetê-las ao simulador;
- g) realização do ensaio com pares de placas no simulador;
- h) medição dos valores de afundamento após determinados números de ciclos de carregamento aplicado;
- i) avaliação visual do desgaste após cada ciclo do ensaio;
- j) avaliação da textura com mancha de areia e pêndulo britânico após o término do ensaio de simulação.

A Figura 3.45 ilustra algumas das etapas observadas durante a realização desse procedimento.

Figura 3.45 - Etapas desenvolvidas nas placas de *cape seal*



Fonte: Autor (2013).

As etapas apresentadas na Figura 3.45 demandaram um período médio de 11 dias para a moldagem das placas de *cape seal* e a realização de todos os ensaios.

3.7 Considerações finais

O presente capítulo apresentou os materiais e a metodologia adotada na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais executados e suas etapas constituintes.

Foi detalhada a metodologia de caracterização dos materiais e a moldagem de corpos de prova de TSD e MRAF em laboratório. Também foram descritos os procedimentos de moldagem das placas de TSD e *cape seal*, a serem ensaiadas através do uso do simulador de tráfego de laboratório.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos a partir da realização dos quatro procedimentos experimentais descritos neste Capítulo 3.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos em ensaios realizados na presente pesquisa. A organização do capítulo foi definida visando uma melhor compreensão das atividades realizadas em laboratório e consiste na apresentação dos resultados dos quatro procedimentos experimentais idealizados e detalhados no Capítulo 3.

No final do capítulo apresenta-se também uma estimativa quanto ao custo envolvido na construção de um quilômetro de revestimento de TSD e *cape seal*. Essa incorporação teve como objetivo conhecer além do aspecto técnico avaliado na pesquisa, os parâmetros que envolvem os custos diretamente ligados a tomada de decisão sobre a implantação dos projetos de engenharia.

4.2 Resultados do primeiro procedimento experimental

Apresentam-se nesse item os resultados obtidos no primeiro procedimento experimental, organizados em função do tipo de ensaio realizado nos agregados. Os agregados analisados na pesquisa consistem de brita 3/4", brita 3/8", pó de pedra e agregado siderúrgico.

4.2.1 Resultados dos ensaios realizados nos agregados

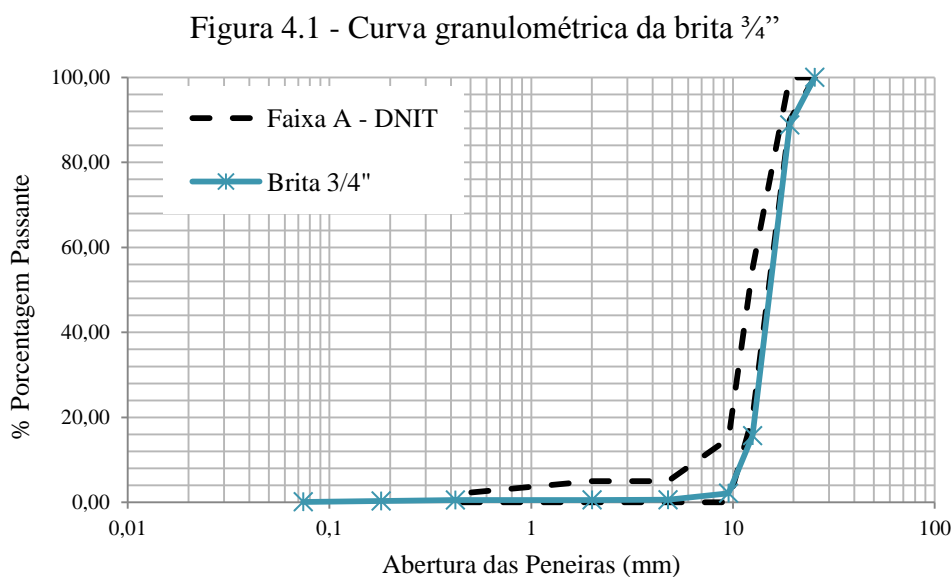
4.2.1.1 Ensaio de granulometria

Conforme mencionado no Capítulo 3, a determinação da faixa granulométrica do TSD foi definida visando enquadrar os agregados na combinação das classes II – III, sugerida pela especificação DERT-ES-P 11/00. Essa especificação apresenta como material da 1ª camada $D_1 = 16\text{mm}$ e $d_1 = 10\text{mm}$ ($5/8'' - 3/8''$) e para a 2ª camada $D_2 = 10\text{mm}$ e $d_2 = 6,3\text{mm}$ ($3/8'' - 1/4''$).

A escolha das faixas segundo a especificação do DER/CE foi determinada visando seguir a metodologia local quanto à dosagem do revestimento TSD. Dessa forma,

para a utilização da brita 3/4", fracionou-se a mesma de maneira a se obter a granulometria adequada para a 1ª camada do TSD conforme a especificação do DER/CE.

Ao observar a especificação do DNIT-ES 147/2010, verifica-se que a granulometria da brita 3/4" se enquadra no limite inferior da Faixa A do DNIT, como material de 1ª camada. A Figura 4.1 ilustra a curva granulométrica da brita 3/4".

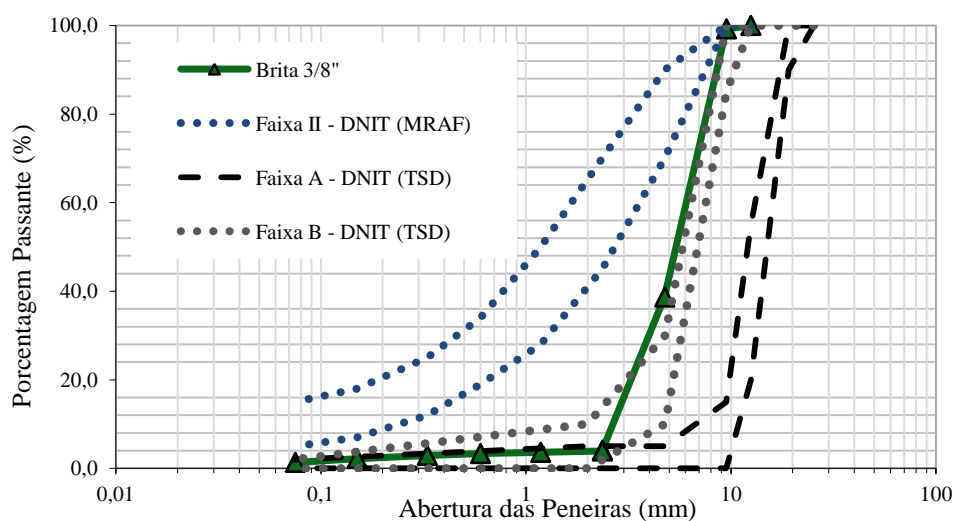


Fonte: Autor (2013).

Outro agregado mineral também utilizado na pesquisa foi a brita 3/8", cujo critério de especificação do material foi o mesmo definido quanto à brita 3/4", adotando-se assim a especificação do DER/CE (DERT-ES-P 11/00) e enquadrando o agregado como material a ser utilizado na 2ª camada da classe II – III para revestimentos do tipo TSD.

Pela especificação do DNIT (DNIT-ES 147/2010), a brita 3/8" praticamente se enquadrou na faixa B como material de 2ª camada quanto à sua utilização em TSD. A curva granulométrica da brita 3/8" pode ser visualizada na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita 3/8"

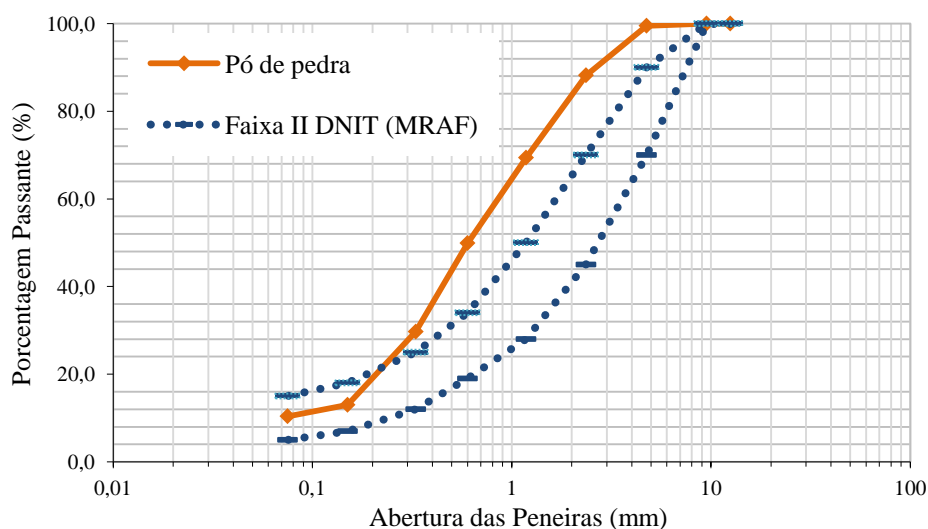


Fonte: Autor (2013).

A Faixa II do DNIT, ilustrada na Figura 4.2, foi adotada na pesquisa como curva granulométrica de projeto da mistura de MRAF, devendo a mistura ser enquadrada dentro dos limites especificados. A Faixa II é indicada para rodovias de tráfego pesado, sendo a mesma introduzida na Figura 4.2 devido à utilização da brita 3/8" como material a ser fracionado e utilizado na composição da faixa de projeto do MRAF.

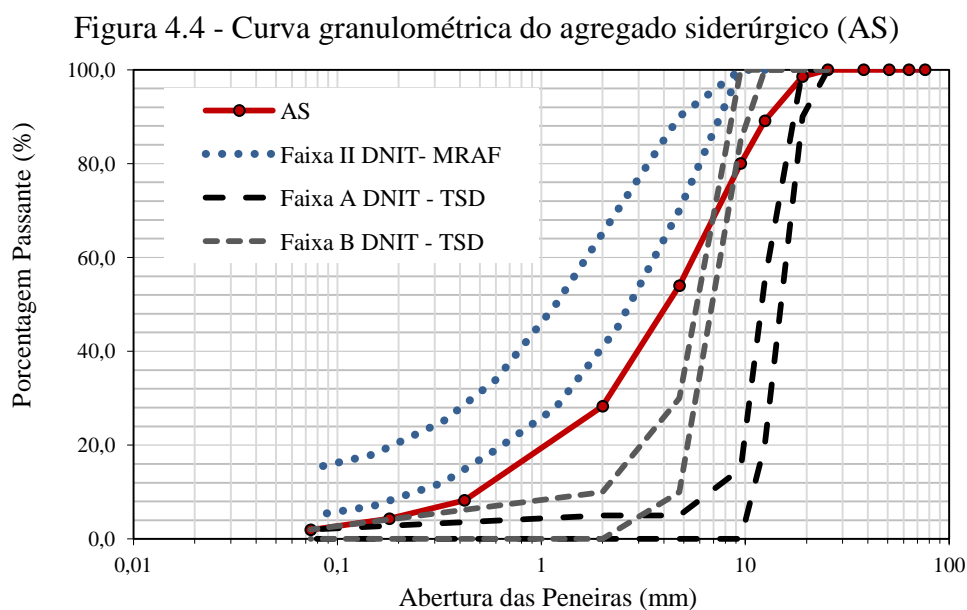
O terceiro agregado mineral utilizado na pesquisa consistiu de um pó de pedra, material empregado na dosagem do MRAF. A Figura 4.3 ilustra a curva granulométrica do pó de pedra e da Faixa II do DNIT.

Figura 4.3 - Curva granulométrica do Pó de pedra



Fonte: Autor (2013).

Adotando-se a Faixa II do DNIT como a faixa de projeto, a composição granulométrica do MRAF com agregado mineral foi obtida combinando-se uma fração da brita 3/8” e uma do pó de pedra, o que é detalhado no segundo procedimento experimental. Por fim, apresenta-se na Figura 4.4 a curva granulométrica do agregado siderúrgico utilizado na pesquisa nos revestimentos do tipo TSD, MRAF e cape seal.



Na Figura 4.4 observam-se também as faixas “A” e “B” do DNIT para uso em TSD, conforme à especificação DNIT-ES 147/2010. Entretanto, na construção dos corpos de prova de TSD com AS, adotou-se a mesma especificação do DER/CE quanto às faixas granulométricas referentes da 1ª e da 2ª camadas.

Na definição da curva granulométrica de projeto da mistura de MRAF com AS adotou-se a mesma Faixa II do DNIT utilizada para o agregado mineral.

4.2.1.2 Índice de forma

Na realização do ensaio de índice de forma, a norma DNER-ME 086/94 estabelece quatro graduações para os agregados. A brita 3/4” se enquadrou na graduação C, obtendo-se um valor de índice de forma de 0,87. A brita 3/8” se enquadrou na graduação D resultando em um valor de índice de forma de 0,69.

No agregado siderúrgico foram realizados ensaios de índice de forma nas graduações C e D da norma DNER-ME 086/94. A realização do ensaio em diferentes

gradações teve como objetivo analisar todas as frações da curva granulométrica do AS utilizada na construção do TSD e *cape seal*. O ensaio de índice de forma resultou no mesmo valor de 0,96 para as graduações C e D. A Tabela 4.1 resume os resultados obtidos para todos os agregados investigados.

Tabela 4.1 - Resultados do índice de forma dos agregados

AGREGADOS	GRADUAÇÃO	ÍNDICE	FINALIDADE
Brita 3/4"	C	0,87	1ª camada - TSD
Brita 3/8"	D	0,69	2ª camada - TSD
AS	C	0,96	1ª camada - TSD
	D	0,96	2ª camada - TSD

Fonte: Autor (2013).

O valor do índice de forma é definido entre 0 e 1, sendo que valores mais próximos de 0 indicam agregados lamelares e mais próximos de 1 indicam agregados do tipo cúbico. A utilização de agregados lamelares não é indicada devido a maior facilidade de fragmentação que pode ser oriunda do tráfego e/ou compactação.

As normas do DNIT (DNIT-ES 147/2010) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00) indicam um valor mínimo de 0,5 do índice de forma para utilização do agregado em TSD. Sendo assim, observou-se que os agregados estudados se enquadraram nas especificações de serviço e apresentaram um formato mais próximo do cúbico, tendo o agregado siderúrgico uma forma mais cúbica do que o agregado mineral.

4.2.1.3 Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles foi realizado de acordo com a norma do DNIT (DNER-ME 035/98) que estabelece o enquadramento da amostra a ser ensaiada nas graduações A, B, C, D, E, F ou G. A graduação usada para a brita 3/4" foi a B, onde o resultado obtido foi 37%. Para a brita 3/8", utilizou-se a graduação C, obtendo-se um valor de abrasão Los Angeles de 27%.

Quanto ao agregado siderúrgico, realizou-se o ensaio de Abrasão Los Angeles nas graduações B, C e D, visando analisar toda faixa granulométrica do AS utilizada na pesquisa. Os resultados obtidos foram 22, 17 e 23% para as graduações B, C e D, respectivamente. A Tabela 4.2 resume os resultados obtidos.

Tabela 4.2 - Resultado de abrasão dos agregados

AGREGADOS	GRADUAÇÃO	ABRASÃO (%)	FINALIDADE
Brita 3/4"	B	39	1ª camada - TSD
Brita 3/8"	C	27	2ª camada - TSD
AS	B	22	1ª camada - TSD
	C	17	2ª camada - TSD e MRAF
	D	23	MRAF

Fonte: Autor (2013).

As normas do DNIT (DNIT-ES 147/2010) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00) indicam que o valor de desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 40%. Assim, observou-se que os agregados minerais analisados se enquadraram nas especificações de serviço para as diferentes faixas granulométricas utilizadas. Para o agregado siderúrgico, a norma do DNIT (DNER-ME 262/94) limita o desgaste do AS, quando utilizado em revestimento, a um valor de 25%. Verificou-se que todos os agregados de origem siderúrgica se enquadraram nessa especificação.

Destaca-se também que em todas as diferentes graduações do agregado siderúrgico analisadas, o mesmo apresentou resultados de abrasão menores quando comparados ao agregado mineral.

4.2.1.4 Ensaio de absorção e densidade

Os ensaios de absorção e densidade aparente da brita 3/4" foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 081/98. Os valores obtidos para o ensaio de absorção e densidade aparente foram 0,6% e 2,70, respectivamente. Para a brita 3/8" os resultados de absorção e densidade aparente foram 1,2% e 2,66, respectivamente. Para o pó de pedra, o valor de densidade real encontrado foi de 2,79 g/cm³.

No agregado siderúrgico os ensaios de absorção, densidade aparente e densidade real foram 1,8%, 3,37 e 3,69 g/cm³, respectivamente.

As normas do DNIT (DNIT-ES 147/2010) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00) não determinam limites de absorção quanto à utilização de agregados minerais em TSD. Quanto ao limite de absorção de água para o agregado siderúrgico, a norma DNER-ME 262/94 limita aos valores de 1% mínimo e 2% máximo. Dessa forma, verifica-se que o agregado siderúrgico estudado se enquadrou na referida especificação. A Tabela 4.3 resume os resultados obtidos para os diferentes agregados ensaiados.

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de absorção e densidade dos agregados

AGREGADOS	ABSORÇÃO (%)	DENS. APARENTE	DENS. REAL	FINALIDADE
Brita 3/4"	0,6	2,70	-	1ª camada - TSD
Brita 3/8"	1,2	2,66	-	2ª camada - TSD
Pó de pedra	-	-	2,79	MRAF
AS	1,8	3,37	3,69	TSD e MRAF

Fonte: Autor (2013).

4.2.1.5 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 054/97 que visa determinar a qualidade dos agregados miúdos (limpeza) pela presença de argila e/ou silte.

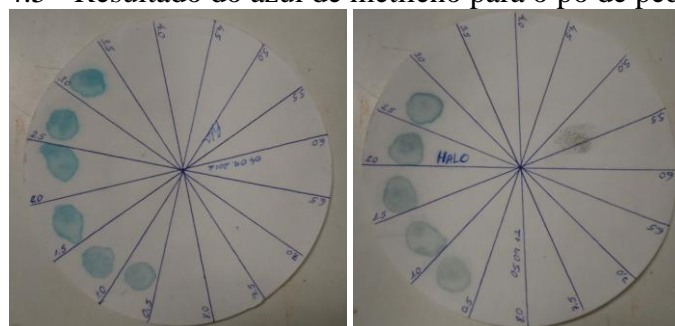
O ensaio foi realizado para o pó de pedra e para o AS resultando nos valores de equivalente de areia de 89 e 83%, respectivamente. A especificação do DNIT (DNIT-ES 035/2005) recomenda um valor de equivalente de areia igual ou superior a 60%. Logo, constatou-se que ambos os agregados se mostraram adequados à utilização em mistura de MRAF. A utilização de agregados com valores de equivalente de areia baixos são evitados devido a necessidade de uma maior quantidade de água da mistura e aumento do consumo de ligante.

4.2.1.6 Azul de Metileno

O ensaio de azul de metileno foi realizado de acordo com a NBR 14949/2003 e visou determinar a reatividade da fração fina dos agregados para ajustes na velocidade de ruptura/cura da emulsão asfáltica utilizada na mistura de MRAF. A referida norma limita os valores de azul de metileno a 7mg/g para agregados graníticos e 10mg/g para agregados basálticos.

O ensaio de azul de metileno foi realizado para o pó de pedra e AS, obtendo-se os valores de 2,5 e 2,0mg/g, respectivamente. Verificou-se que os resultados atenderam às recomendações impostas pela norma. A Figura 4.5 ilustra os resultados do ensaio de azul de metileno para os dois agregados.

Figura 4.5 - Resultado do azul de metileno para o pó de pedra e AS



(a) Pó de pedra

(b) AS

Fonte: Autor (2013).

De acordo com Castro (2011), o resultado do ensaio de azul de metileno deve ser observado com cuidado, tendo em vista que embora apresente resultado satisfatório não implicará necessariamente um tempo de ruptura de emulsão aceitável. Esse autor recomenda também a realização do ensaio do tempo mínimo de mistura (NBR 14758/2001).

A preocupação quanto à compatibilidade da fração fina e emulsão asfáltica advém da possibilidade de uso de aditivo, caso haja necessidade de prolongar o tempo de ruptura da emulsão. Em casos onde a quantidade de aditivo é significativa, pode-se chegar a conclusão da inviabilidade do uso do agregado pelo aumento considerável dos custos.

4.2.1.7 Ensaio de durabilidade

O ensaio de durabilidade foi realizado segundo a norma DNER-ME 089/94 para todos os agregados utilizados na pesquisa, visando determinar a resistência dos agregados à desintegração química por meio da simulação de intempéries.

A perda de massa foi definida como a porcentagem em peso de cada fração das amostras que após o ensaio passou na peneira na qual originalmente era retida. O resultado do ensaio de durabilidade para a brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra resultaram em 1,75%, 7,40% e 4,75%, respectivamente.

A realização do ensaio para o agregado siderúrgico foi feito com duas frações do AS. A primeira fração referente ao material graúdo com dimensão (19 - 9,5mm) resultou em um valor de 3,1%. Para a fração referente ao agregado miúdo (9,5 - 0,3mm), o resultado obtido foi de 2,35%. A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos em laboratório para os diferentes agregados ensaiados.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de durabilidade para os diferentes agregados

AGREGADOS	FAIXA GRANULOMÉTRICA	RESULTADO (%)	FINALIDADE
Brita 3/4"	19 - 9,5mm	1,75	1ª camada - TSD
Brita 3/8"	9,5 - 4,8mm	7,40	2ª camada - TSD
Pó de pedra	9,5 - 0,3mm	4,75	MRAF
AS	19 - 9,5mm	3,08	1ª camada - TSD
	9,5 - 0,3mm	2,35	2ª camada - TSD e MRAF

Fonte: Autor (2013).

As normas do DNIT (DNIT-ES 147/2010) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00) estabelecem o limite admissível para a perda de massa nos agregados de 12%. Caso haja uma perda superior a 12% com sulfato de sódio em cinco ciclos, a britagem da pedra deve ser impedida, inviabilizando assim seu uso em pavimentação. Para o agregado siderúrgico a norma DNER-EM 262/94 restringe a durabilidade ao sulfato de sódio, cinco ciclos, ao valor máximo de 5%.

Conforme observado na Tabela 4.4, verificou-se que, para as diferentes especificações, obtiveram-se resultados satisfatórios quanto à durabilidade dos materiais e o emprego destes na área de pavimentação.

4.2.1.8 Ensaio de adesividade a ligante betuminoso

O ensaio de adesividade a ligante betuminoso foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 078/94 para os agregados brita 3/4" e AS. Após a realização do ensaio, obteve-se o resultado de adesividade satisfatória para ambos os agregados, tendo em vista não ocorrer deslocamento da película de ligante. A Figura 4.6 ilustra o aspecto dos diferentes agregados após a realização do ensaio de adesividade.

Figura 4.6 - Ensaio de adesividade da brita 3/4" e do AS



(c) Brita 3/4"

(d) AS

Fonte: Autor (2013).

4.2.1.9 Expansão do AS

De acordo com a norma DNER-ME 262/94, o agregado siderúrgico utilizado com fins em pavimentação deve apresentar um máximo de expansão de 3% ou valor específico determinado em projeto. Entretanto, a norma não faz nenhuma limitação quanto ao período de tempo em que a expansão pode ocorrer.

O ensaio de expansão do agregado siderúrgico foi realizado seguindo o método PTM-130, do Departamento de Transportes da Pensilvânia. O DNIT apresenta, através do método de ensaio (DNIT-ME 113/2009), uma versão em português do procedimento. A realização do ensaio se deu em duas etapas. O primeiro corpo de prova foi ensaiado, aproximadamente, oito meses depois do início da coleta do AS, onde o mesmo havia sido estocado sobre uma lona impermeável e deixado curar a céu aberto. O segundo corpo de prova foi ensaiado quatorze meses após a coleta.

Essa metodologia de ensaio foi adotada em função das dificuldades observadas no laboratório quanto aos equipamentos necessários à realização do ensaio de expansão. No entanto, a forma como foi realizado os ensaios favoreceu a investigação da expansão ao longo do tempo.

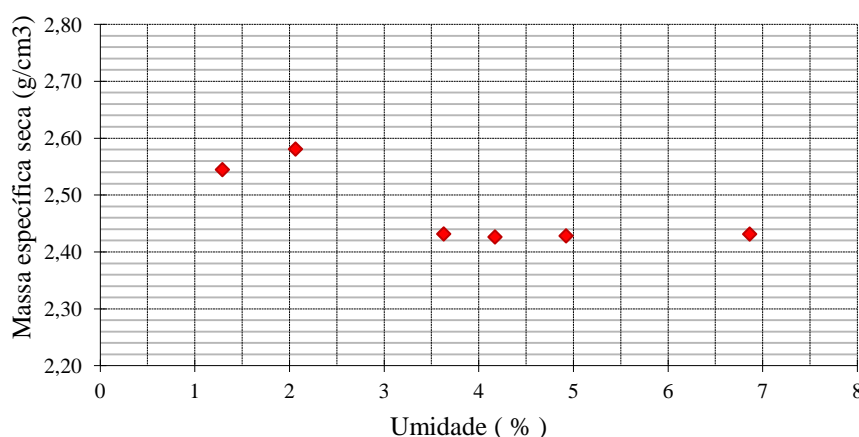
A realização do ensaio pede que sejam moldados corpos de prova com umidades próximas à ótima, sendo um no ramo seco, outro na umidade ótima e outro no ramo úmido. Uma vez na estufa, os corpos de prova são observados durante sete dias submersos e mais sete dias no estado de saturação.

A compactação do agregado siderúrgico, para obtenção da curva da massa específica seca em função da umidade, foi realizada de acordo com a norma DNER-ME 049/94 para um período de oito meses de cura. Na realização do ensaio, observou-se uma dificuldade em conseguir se determinar a curva de compactação para a identificação de um ramo ascendente e outro descendente. Diante das dificuldades encontradas, decidiu-se trabalhar apenas com dois pontos: o primeiro corpo de prova no ramo seco e o segundo na umidade ótima.

Essa dificuldade foi relatada por Rohde (2002) e Castelo Branco (2004) que trabalharam com escória de aciaria e encontraram dificuldades quanto à determinação de uma umidade ótima de trabalho. Dessa forma, realizou-se o processo de compactação três vezes, em vários teores de umidade, encontrando curvas cujos valores de massa específica oscilavam para valores altos ou baixos em função do aumento da umidade.

Depois de repetidos ensaios, chegou-se a um resultado de curva de compactação que pareceu razoável e que representou, na opinião do autor, melhor o ensaio realizado. A curva de compactação observada apresentou um ramo ascendente curto e para o ramo descendente, um formato aproximadamente constante, indicando pouca variação do valor de densidade em função da umidade utilizada. A Figura 4.7 ilustra a curva de compactação observada.

Figura 4.7 - Curva de compactação do AS para o ensaio de expansão



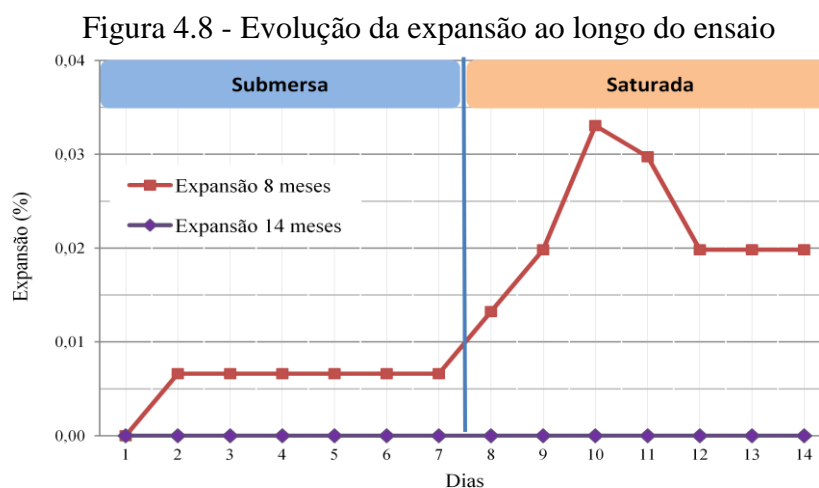
Fonte: Autor (2013).

Observando o comportamento da amostra durante a moldagem, acredita-se que a granulometria da mesma, assim como a falta de coesão dos finos presentes no agregado siderúrgico foram os responsáveis pelo aspecto dessa curva.

A umidade ótima de compactação do AS foi então definida através da observação da amostra durante o processo de moldagem do corpo de prova. Verificou-se que ela deve estar situada entre 2 e 3,5%. O valor adotado foi de 2,5%, pois representou a umidade de maior travamento das partículas do AS. Verificou-se, ainda, durante a mistura que para teores de água maiores que 3%, a amostra apresentava indícios de falta de coesão suficiente para moldagem e a não retenção da água na mistura, explicando assim, a pouca variação da massa específica em função desse teor de umidade.

O ensaio de expansão foi realizado durante um período de quatorze dias, sendo sete dias em condição saturada e os outros sete dias em condição submersa. O corpo de prova ensaiado aos oito meses foi moldado na umidade de 1,2% (ramo seco da curva de compactação) e o segundo corpo de prova de quatorze meses foi moldado na umidade de 3% (intervalo de umidade ótima).

Como comentado anteriormente, reforça-se que a metodologia adotada teve que ser adaptada em função da disponibilidade do laboratório durante o período dos ensaios. A não realização dos ensaios em todos os teores de umidade foi considerada válida, tendo em vista o agregado ensaiado já ter sido utilizado em pesquisas anteriores e ter apresentado expansão praticamente nula. No geral tem-se observado que o AS produzido na cidade de Maracanaú/CE, tem apresentado expansão baixa para todos os trabalhos até o presente momento, como indicam Castelo Branco (2004), Santos Neto (2007), Loiola (2009), Pereira (2010) e Cavalcante, Pereira e Barroso (2011). Os resultados obtidos no ensaio de expansão podem ser observados na Figura 4.8.



Fonte: Autor (2013).

O resultado final da expansão para o corpo de prova de 8 meses, resultou em um valor de 0,02%, muito abaixo do limite recomendado pela DNER-ME 262/94 que restringe a expansão a um valor máximo de 3%. Para o corpo de prova de 14 meses, não se observou nenhuma expansão. Dessa forma, verificou-se que quanto à limitação do agregado siderúrgico pelo parâmetro expansão, o mesmo se mostra adequado à utilização em pavimentos.

Analisando-se a Figura 4.8, percebe-se que a evolução da expansão foi praticamente constante durante o período submerso, apresentando valores crescentes no início da fase saturada voltando posteriormente a se estabilizar.

4.2.1.10 Ensaio de lixiviação e solubilização

Os ensaios de lixiviação e solubilização não foram realizados no material coletado devido aos problemas administrativos relativos a liberação de recursos para realização dos

ensaios ambientais. Entretanto, o agregado siderúrgico utilizado na presente pesquisa já foi objeto de estudo de outros autores, apresentando resultados favoráveis quanto à realização dos ensaios ambientais. A empresa fornecedora do AS também argumenta que realiza frequentemente esses ensaios e os seus resultados são satisfatórios.

Trabalhos como o de Castelo Branco (2004), Santos Neto (2007) e Loiola (2009), utilizaram o agregado siderúrgico da mesma empresa fornecedora da presente pesquisa. Observando os resultados apresentados por Loiola (2009), constata-se que no ensaio de lixiviação os parâmetros para classificação apresentaram concentrações inferiores às recomendadas pela norma ABNT/NBR 10005/2004. Os ensaios foram realizados com um período de cura de 1 ano.

Quanto ao ensaio de solubilização (ABNT/NBR 10006/2004), através das características obtidas nas análises físico-químicas dos ensaios realizados, o agregado siderúrgico foi classificado como de Classe II – Resíduo não perigoso inerte, podendo assim ser utilizada em pavimentação (LOIOLA, 2009).

4.2.2 Resultados dos ensaios realizados nas emulsões asfálticas (RR-2C e RR1C-E)

Os ensaios de caracterização das emulsões asfálticas RR-2C e RC1C-E foram realizados no laboratório da empresa fabricante que forneceu a emulsão utilizada na pesquisa. A Tabela 4.5 e a Tabela 4.6 mostram os resultados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4.5 - Resultados de caracterização da emulsão asfáltica RR2C

EMULSÃO ASFÁLTICA	ENSAIOS REALIZADOS	LIMITES		RESULTADOS	FINALIDADE
		MÍNIMO	MÁXIMO		
RR2C	Viscosidade - 50°C	100	400	170	TSD
	Peneiração - 0,84mm (%) em peso	-	0,1	0,01	
	Evaporação em peso (%)	-	-	67,4	

Fonte: Asfaltos Nordeste (2013).

Tabela 4.6 - Resultados de caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E

EMULSÃO ASFÁLTICA	ENSAIOS REALIZADOS	LIMITES		RESULTADOS	FINALIDADE
		MÍNIMO	MÁXIMO		
RC1C-E	Viscosidade - 25°C (Saybolt-Furol)	20	100	20	MRAF
	Peneiração - 0,84mm (%) em peso		0,1	0,01	
	Evaporação em peso (%)	62		63,3	
	Carga da partícula	Positiva		Positiva	
	Sedimentação		5	0,6	
	Penetração, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm	50		57	
	Recuperação elástica 20cm (25°C)	70		71	
	Ponto de amolecimento (°C)	55		60	

Fonte: Asfaltos Nordeste (2013).

Conforme observado na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6, os resultados obtidos no ensaio de caracterização das emulsões asfálticas validam a utilização das mesmas em revestimentos do tipo TSD e MRAF.

4.3 Resultados do segundo procedimento experimental

Os resultados obtidos no segundo procedimento experimental foram organizados em função do tipo de revestimento estudado para os agregados mineral e siderúrgico. Primeiramente, apresentam-se os resultados obtidos na dosagem do TSD e, posteriormente, os resultados observados na dosagem do MRAF.

4.3.1 Resultados da dosagem dos corpos de prova de TSD com agregados mineral e siderúrgico (TSD-AM) e (TSD-AS)

Apresentam-se nesta etapa da pesquisa os resultados obtidos no processo de dosagem de dois tipos de TSD em laboratório. Os TSDs foram confeccionados com agregado mineral e siderúrgico e tiveram a sua metodologia de moldagem descrita no tópico 3.4.1 desta dissertação.

Os TSDs com agregado mineral (TSD-AM) e agregado siderúrgico (TSD-AS) foram dosados segundo a especificação do DERT-ES-P 11/00. Para a classe granulométrica adotada, classe II-III, obtiveram-se as taxas dos agregados (Tag) e posteriormente as taxas de emulsão (RR-2C).

Seguindo a metodologia recomendada pela especificação, o cálculo das taxas para o TSD-AM foi verificado pelo método da bandeja, resultando em uma taxa média de 13,7kg/m² para a 1^a camada e 7,8kg/m² para a 2^a camada. As taxas obtidas nas 1^a e 2^a camadas foram divididas pela massa específica solta calculada para os materiais da 1^a (0,96kg/L) e 2^a (0,98kg/L) camadas do AM, resultando em uma taxa efetiva em volume de 14,24L/m² e 7,97L/m², respectivamente. A especificação DERT-ES-P 11/00 recomenda o acréscimo de 5% nas taxas calculadas, obtendo-se como resultado a taxa a espalhar de 14,95L/m² para a 1^a camada e 8,37L/m² para a 2^a camada.

A mesma metodologia foi repetida para o cálculo das taxas do TSD-AS, onde se verificou pelo método da bandeja uma taxa média de 17,7kg/m² para a 1^a camada e 9,4kg/m² para a 2^a camada. Dividiu-se o resultado pela massa específica solta da 1^a (1,09kg/L) e 2^a

(1,14kg/L) camadas e com um acréscimo de 5% obteve-se a taxa efetiva em volume de 17,04L/m² para a 1^a camada e 8,64L/m² para a 2^a camada.

Uma vez calculadas as taxas dos agregados em L/m², os valores foram aplicados nas expressões definidas pela especificação do DER/CE para o cálculo da taxa de ligante. Para o TSD-AM, obteve-se as taxas de 1,04L/m² para a 1^a camada, 1,07L/m² para 2^a camada e 0,5L/m² para o banho diluído. No caso do TSD-AS, as taxas calculadas foram de 1,15L/m² para a 1^a camada, 1,23L/m² para a 2^a camada e 0,5L/m² para o banho diluído.

As taxas de agregado e ligante indicadas pela norma para a faixa granulométrica adotada e encontradas no ensaio de dosagem para o AM e AS podem ser visualizadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados obtidos na dosagem do TSD-AM e TSD-AS

Taxas	Agregados (L/m ²)			Emulsão asfáltica RR-2C (L/m ²)			
	1 ^a camada	2 ^a camada	Total	1 ^a camada	2 ^a camada	3 ^a camada	Total
DERT-ES-P11/00	12,10	8,90	21,10	0,94	0,92	0,50	2,36
Método da bandeja (TSD-AM)	14,95	8,37	23,32	1,04	1,07	0,50	2,61
Método da bandeja (TSD-AS)	17,04	8,64	25,68	1,15	1,23	0,50	2,88

Fonte: Autor (2013).

Observa-se que os valores citados na especificação DERT-ES-P11/00 são indicativos quanto aos valores das taxas de agregados e de ligantes a serem aplicadas na confecção do revestimento. A mesma especificação ressalta a importância da verificação da taxa de agregado com a utilização do método da bandeja. Para serviços de maior importância, sugere o teste em verdadeira grandeza, utilizando trechos de 40m por faixa de tráfego quando houver necessidade.

Analisando-se a Tabela 4.7, verifica-se que as taxas de agregados da 1^a camada e de ligante sugeridas pela especificação do DER/CE são menores que os valores encontrados através do método da bandeja. Observa-se também que as taxas de agregado da 1^a e 2^a camadas são maiores para o TSD-AS, devido a maior densidade do material e pela forma do mesmo interferir na disposição e organização dos agregados na bandeja.

Na confecção dos corpos de prova para avaliação do desempenho do TSD através do ensaio de WTAT, decidiu-se utilizar as taxas calculadas pelo método da bandeja, tendo em vista a taxa de agregado calculada ser mais próxima da distribuição real dos agregados em campo.

4.3.2 Resultados da dosagem dos corpos de prova de MRAF com agregados mineral e siderúrgico (MRAF-AM) e (MRAF-AS)

Apresentam-se nesta etapa da pesquisa os resultados obtidos no processo de dosagem dos dois tipos de MRAF em laboratório. Os microrrevestimentos foram confeccionados com agregado mineral e siderúrgico e tiveram a sua metodologia de moldagem descrita no item 3.4.2 do Capítulo 3.

Na construção do MRAF, adotaram-se para ambos os agregados a Faixa II do DNIT como a faixa de projeto. Para o agregado mineral foi utilizada uma combinação da brita 3/8" e pó de pedra de forma a encaixar o agregado na Faixa II do DNIT. Ambos os agregados foram peneirados e empregados em proporções iguais em cada peneira de forma a se obter curvas granulométricas idênticas.

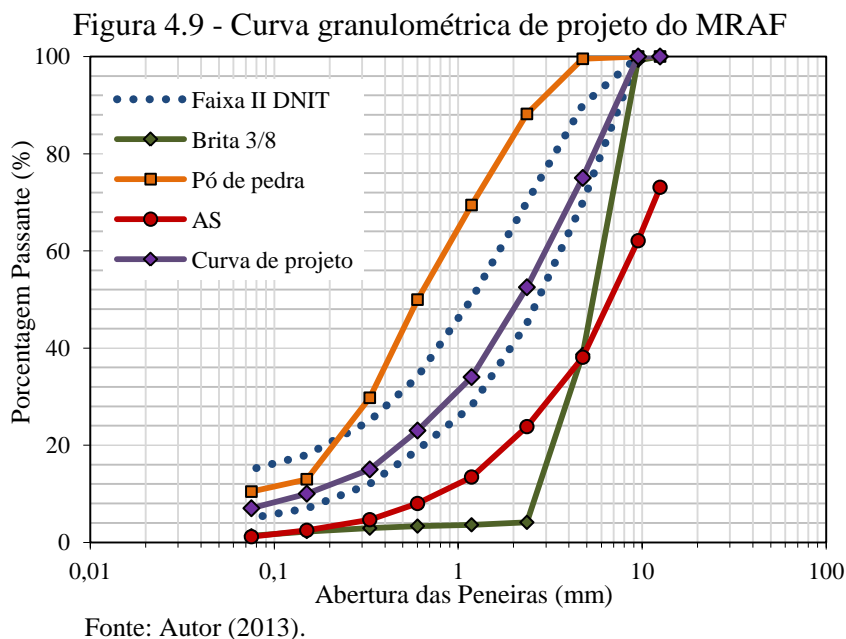
A composição granulométrica de cada material e a curva granulométrica adotada no projeto de MRAF pode ser observada na Tabela 4.8 e na Figura 4.9, respectivamente.

Tabela 4.8 - Composição granulométrica dos agregados utilizados no MRAF

Peneiras		Materiais (% passante)				
		Agregado mineral		Agregado siderúrgico	Faixa II DNIT	Curva granulométrica de projeto
pol	mm	Brita 3/8"	Pó de pedra			
1/2"	12,5	100,0	100,0	73,1	100	100
3/8"	9,5	99,2	100,0	62,1	100	100
Nº 4	4,75	38,7	99,5	38,1	70 - 90	75
Nº 8	2,36	4,1	88,2	23,8	45 - 70	53
Nº 16	1,18	3,6	69,4	13,4	28 - 50	34
Nº 30	0,60	3,3	49,9	8,0	19 - 34	23
Nº 50	0,33	2,9	29,7	4,6	12 - 25	15
Nº 100	0,15	2,2	13,0	2,5	7 - 18	10
Nº 200	0,075	1,3	10,4	1,1	5 - 15	7
FUNDO	-	0,0	0,0	0,0	-	0,0

Fonte: Autor (2013).

Na curva granulométrica de projeto do MRAF-AM, utilizou-se 25% do material retido na peneira de Nº4 da brita 3/8" e as frações restantes que compuseram a composição foram retiradas do pó de pedra. Na curva de projeto do MRAF-AS, as frações foram retiradas na granulometria corrida do material conforme fornecido pelo fabricante. A Figura 4.9 ilustra a granulometria dos materiais e a curva de projeto do MRAF.



Apresenta-se, a seguir, para ambos os agregados testados, os resultados dos ensaios referentes ao processo de dosagem do MRAF. Inicialmente, verificou-se o teor de aditivo pelo tempo mínimo de mistura e, posteriormente, calculou-se o teor de ligante de projeto.

4.3.2.1 Determinação do teor de aditivo

A determinação do teor de aditivo a ser adicionado na mistura de MRAF foi realizada seguindo o ensaio de Determinação do Tempo Mínimo de Misturação (NBR 14758/2001) que é de 120s. De acordo com Ceratti e Reis (2011), a mistura deve permanecer fluida e homogênea por no mínimo 20s a 25°C. Para o caso de temperaturas maiores que 25°C, situação comum no estado do Ceará, o autor comenta que o tempo de misturação deve estar entre 180 e 300s.

O ensaio realizado em laboratório (25°C) indicou um tempo de 230s para o agregado mineral, com 0,5% de aditivo, e um tempo maior que 240s para o agregado siderúrgico, com 0% de aditivo.

Diante dos resultados observados, pode-se concluir que para ambos os agregados a utilização do aditivo pode ser considerada facultativa à luz da especificação da NBR 14758/2001. Entretanto, para o agregado mineral estudado, a utilização do aditivo é recomendada, tendo em vista as altas temperaturas de aplicação em campo, observadas no estado do Ceará, e a experiência dos vários técnicos que aplicaram MRAF no estado.

Ressalta-se que a utilização do aditivo em misturas de MRAF tem como finalidade controlar o tempo de ruptura da emulsão, não implicando em aumento ou perda de desempenho do material. Logo, do ponto de vista econômico, a não utilização do aditivo favorece a redução de custo na construção do revestimento.

4.3.2.2 Determinação do teor de ligante de projeto

Para definição do teor de ligante, moldaram-se corpos de prova com diferentes teores de emulsão asfáltica, procurando-se manter constante o mesmo teor de líquidos (água + emulsão). Finalizada a etapa de moldagem, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de WTAT e LWT e o teor de projeto foi obtido através da combinação gráfica dos resultados dos ensaios.

Através do ensaio de WTAT, obteve-se como resultado a perda de massa por unidade de área desgastada (g/m^2), sendo o valor máximo permitido pelas especificações brasileiras de 538g/m^2 . No ensaio de LWT, obteve-se o aumento de massa devido à adesão da areia em (g/m^2), sendo o valor máximo estabelecido em norma de 538g/m^2 .

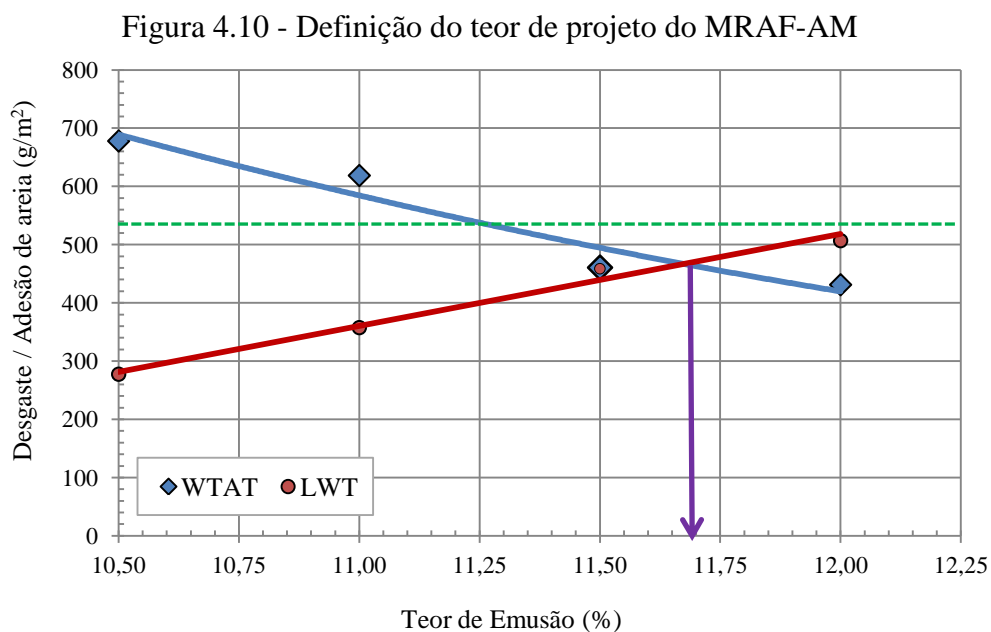
Os corpos de prova de MRAF-AM foram moldados com teores de emulsão de 10,5, 11, 11,5 e 12%. Os resultados obtidos para os ensaios de WTAT e LWT podem ser visualizados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Resultados do ensaio do WTAT e LWT para o MRAF-AM

Teor de Emulsão	WTAT (g/m^2)	LWT (g/m^2)
10,5%	677,7	277,3
11,0%	618,5	357,3
11,5%	460,6	458,7
12,0%	431,0	506,7

Fonte: Autor (2013).

A Figura 4.10 ilustra a representação gráfica dos resultados obtidos e a determinação do teor ótimo de ligante. Observa-se que o teor de projeto encontrado para a mistura de MRAF-AM foi de 11,7%.



Verifica-se na Figura 4.10 que o teor de projeto está abaixo do limite de 538g/m², podendo-se utilizar teores de emulsão de até 12,25%, tendo em vista ainda estar dentro das especificações. No entanto, a utilização de teores maiores não é recomendada. Isso se deve ao possível aumento dos custos que esse tipo de decisão poderia acarretar na fabricação da mistura de MRAF-AM sem significar uma melhoria direta no desempenho da mistura.

Para o teor mínimo, constata-se que o teor de 11,25% seria um valor mínimo de ligante a ser utilizado. Ressalta-se que a especificação, DNIT 035/2005-ES reforça que o teor mínimo de asfalto residual para a Faixa II do DNIT deve ser de 6,5%. Logo, para um teor residual da emulsão RC1C-E de 62%, o teor mínimo de projeto seria de 10,5%.

Com relação ao agregado siderúrgico, realizaram-se os mesmos procedimentos para determinação do teor ótimo de ligante. Os corpos de prova de MRAF-AS foram moldados com teores de ligante de 10, 11, 11,5 e 12,5%. A Tabela 4.10 ilustra os resultados obtidos nos ensaios de WTAT e LWT.

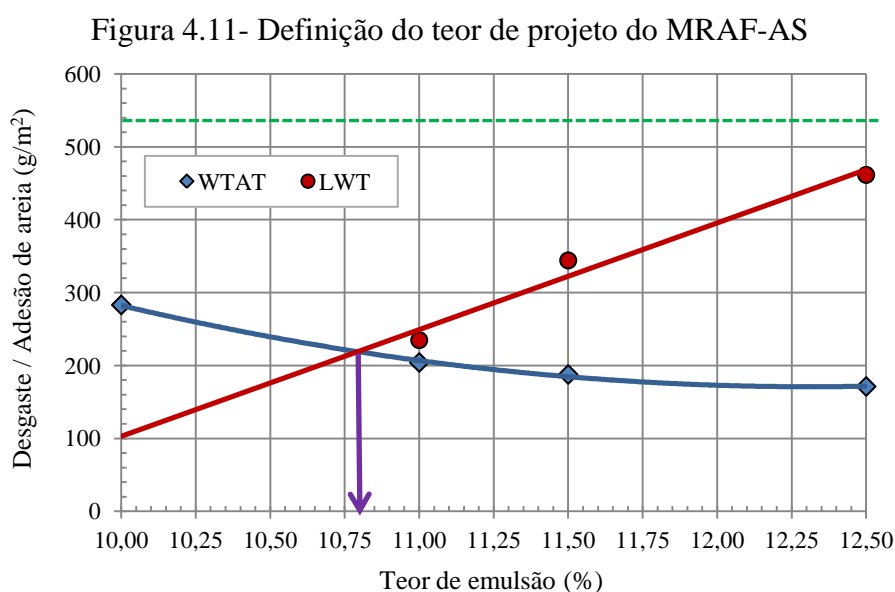
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de WTAT e LWT para o MRAF-AS

Teor de Emulsão	WTAT (g/m ²)	LWT (g/m ²)
10%	282,9	100,0
11%	204,0	234,7
11,5%	187,5	344,0
12,5%	171,1	461,3

Fonte: Autor (2013).

O resultado do ensaio LWT para o teor de 10% apresentado na Tabela 4.10 foi obtido através do prolongamento da linha de tendência para os outros teores ensaiados. Isso ocorreu devido o teor de 10% apresentar um comportamento diferente do característico da curva do LWT. Acredita-se que tal comportamento deve-se a alguma falha na moldagem ou execução do ensaio no referido teor. No entanto, o ensaio não foi refeito por se verificar não significativa a sua influência na determinação do teor de projeto.

A Figura 4.11 ilustra as curvas obtidas com os valores do ensaio de WTAT e LWT para a determinação do teor de ligante de projeto para mistura MRAF-AS.



Fonte: Autor (2013).

O teor de ligante de projeto para o MRAF-AS determinado pelo cruzamento das curvas WTAT e LWT resultou em um valor de 10,8%. Verificou-se que todos os teores de emulsão testados apresentaram resultados abaixo do limite exigido pelas especificações quanto ao desgaste e adesão de areia.

Analisando-se os resultados da Tabela 4.9 e Tabela 4.10 para os teores de 11 e 11,5%, teores de ligantes comuns para ambos os agregados, constata-se que de forma geral o agregado mineral apresentou um desgaste pelo ensaio WTAT maior do que o sofrido pelo agregado siderúrgico. Acredita-se que esse comportamento seja devido a maior resistência a abrasão fornecida pelo agregado siderúrgico.

Quanto aos resultados comparativos do ensaio de LWT para os agregados mineral e siderúrgico, verifica-se também que os maiores valores de adesão de areia, conseqüentemente maior exsudação, ocorreram nos corpos de prova de MRAF moldados com

agregado mineral. Imagina-se que esse resultado se deva a uma maior porosidade do agregado siderúrgico em comparação ao mineral, podendo, assim, resultar em uma maior absorção do ligante excedido.

4.4 Resultados do terceiro procedimento experimental

4.4.1 Resultados gerais da análise de desempenho do TSD-AM e TSD-AS submetidos ao WTAT

Apresentam-se nesta etapa da pesquisa os resultados obtidos através da moldagem dos dois tipos de TSDs em laboratório. Os TSDs confeccionados com agregado mineral (TSD-AM) e siderúrgico (TSD-AS) tiveram a sua metodologia de moldagem descrita no item 3.4.1 da presente pesquisa.

Seguindo a metodologia definida na pesquisa, analisou-se comparativamente o desempenho dos dois tipos de agregados, moldados sob as mesmas condições e utilizando-se a mesma emulsão asfáltica (RR-2C).

Na dosagem de ambos os TSDs foram calculados as taxas de agregados e ligante, denominadas como taxas de projeto, tendo em vista serem essas as taxas visadas no momento da confecção dos corpos de prova. De forma a avaliar as taxas aplicadas, foram moldados nove corpos de prova de cada agregado e avaliados segundo a metodologia estabelecida para determinação das taxas reais de agregado e ligante.

As taxas de projeto, anteriormente calculadas para os agregados em L/m², foram convertidas através da massa específica solta em kg/m². Para a confecção dos corpos de prova, as quantidades de agregado e ligante foram calculadas em função da área da manta asfáltica utilizada no molde do revestimento (0,065m²).

Na análise dos resultados obtidos avaliaram-se a média das taxas aplicadas, o desvio padrão, o coeficiente de variação (CV) e a amplitude dos valores máximo e mínimo encontrada. A Tabela 4.11 resume os valores das taxas de projeto visadas na moldagem dos corpos de prova e um comparativo das taxas reais aplicadas na moldagem.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de WTAT para o TSD-AM

CORPOS DE PROVA	TAXAS					DESGASTES (%)
	LIGANTE (L/m ²)			AGREGADO (kg/m ²)		
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	Banho	1ª Aplicação	2ª Aplicação	
C1	0,97	1,27	0,47	15,59	5,99	40,93
C2	0,98	1,60	0,50	14,27	6,88	11,89
C3	0,96	1,56	0,37	14,04	6,41	12,11
C4	0,97	1,22	0,55	14,02	7,91	17,27
C5	0,99	1,60	0,29	14,07	7,72	14,99
C6	0,99	1,41	0,52	14,88	7,65	15,67
C7	1,03	1,42	0,48	14,28	7,71	15,32
C8	1,00	1,72	0,39	14,22	7,75	13,62
C9	0,99	1,35	0,26	13,87	7,69	14,40
Taxas de projeto	1,04	1,07	0,5	14,39	8,19	-
Média das taxas aplicadas	0,99	1,46	0,43	14,36	7,30	14,41
Variância	0,00	0,03	0,01	0,29	0,49	3,32
Desv. Pad.	0,02	0,17	0,10	0,54	0,70	1,82
Valor máx.	1,03	1,72	0,55	15,59	7,91	17,27
Valor mín.	0,96	1,22	0,26	13,87	5,99	11,89
Amplitude	0,07	0,50	0,29	1,72	1,92	5,39
Coef. Var.	2,0%	11,5%	24,1%	3,8%	9,5%	12,7%

Fonte: Autor (2013).

De uma forma geral, observa-se, na Tabela 4.11, uma ligeira dispersão dos resultados encontrados. Entretanto, os valores das taxas apresentadas, bem como o resumo estatístico, devem ser analisados com cuidado de modo a evitar conclusões equivocadas. Analisando os dados, verifica-se que os resultados obtidos tendem de maneira geral a estarem próximos da média, apresentando algumas exceções com valores divergentes da tendência central da amostra.

As médias das taxas de ligante aplicadas mostraram-se coerentes com a taxa de projeto visada. Entretanto, verifica-se que no caso da 2ª aplicação de ligante as taxas aplicadas nos ensaios foram maiores do que a taxa de projeto visada. Esse comportamento pode ser explicado através de observações feitas em laboratório quanto à verificação de uma maior quantidade de ligante necessário à cobertura da 1ª camada de agregado.

Quanto às taxas de agregados, os valores observados na 1ª camada se mostraram coerentes com a taxa de projeto. Para a 2ª camada, os ensaios tiveram como resultado um valor menor do que a taxa de projeto.

A dispersão dos resultados foi também constatada por Loiola (2009), tendo o autor argumentado que tal comportamento ocorreu devido a fatores como falta de um critério preestabelecido para execução do TSD, taxas baixas de ligante e altas de agregados e a possível superposição do agregado da segunda camada com o agregado da primeira quando submetido ao esforço da mangueira de borracha usado no ensaio de WTAT, proporcionando maior desagregação.

Na presente pesquisa verificou-se que os problemas levantados por Loiola (2009) podem ser relevantes nos resultados obtidos. No entanto, acredita-se que certa variabilidade dos resultados pode ser considerada esperada, desde que controlada, tendo em vista o processo de moldagem dos corpos de prova ainda ser subjetivo.

Esse aspecto se deve a etapa de confecção dos corpos de prova que requerem, em alguns casos, uma maior taxa de agregado para preencher os vazios do molde, ou uma maior taxa de ligante de forma a cobrir todo o agregado. Observa-se, assim, uma necessidade quanto ao controle da taxa de projeto visada e da taxa real aplicada pelo executor do ensaio.

Quanto ao desgaste, observou-se que apenas o CP1 apresentou um valor com grande divergência dos demais, indicando um possível erro de moldagem ou alguma falha na execução do ensaio, tendo em vista as taxas de agregado e ligante estarem coerentes com os demais resultados. Diante do observado, decidiu-se não utilizar o resultado do CP1 no cálculo do resumo estatístico dos valores obtidos.

O mesmo procedimento de análise de dados foi realizado com o agregado siderúrgico e os valores obtidos estão ilustrados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio do WTAT para o TSD-AS

CORPOS DE PROVA	TAXAS					DESGASTES (%)
	LIGANTE (L/m ²)			AGREGADO (kg/m ²)		
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	Banho	1ª Aplicação	2ª Aplicação	
CP1	1,10	1,73	1,13	17,33	9,32	31,40
CP2	1,09	1,56	0,51	17,40	9,42	23,46
CP3	1,09	1,19	0,38	16,67	8,85	38,64
CP4	0,94	1,25	0,53	16,74	10,15	28,28
CP5	1,09	1,57	0,50	17,05	9,78	21,82
CP6	1,09	1,45	0,47	16,98	9,17	19,20
CP7	1,09	1,18	0,47	16,98	9,39	27,43
CP8	1,09	1,31	0,46	17,53	9,40	26,19
CP9	1,08	1,61	0,44	18,14	9,29	22,81
Taxas de projeto	1,15	1,23	0,50	18,58	9,87	-
Média das taxas aplicadas	1,07	1,43	0,47	17,20	9,42	25,07
Variância	0,00	0,04	0,00	0,21	0,14	15,72
Desv. Pad.	0,05	0,20	0,05	0,45	0,37	3,96
Valor max.	1,10	1,73	0,53	18,14	10,15	31,40
Valor min.	0,94	1,18	0,38	16,67	8,85	19,20
Amplitude	0,16	0,55	0,15	1,47	1,31	12,21
Coef. Var.	4,70%	14,06%	10,23%	2,64%	3,92%	15,8%

Fonte: Autor (2013).

Observando as taxas de ligante aplicadas, verifica-se que na 1ª camada foi utilizada em média uma quantidade ligeiramente menor do que a taxa de projeto, entretanto, na 2ª camada observou-se um aumento do valor aplicado. Quanto às taxas de agregados, os valores médios encontrados para ambas as camadas foram ligeiramente inferiores às taxas de projeto.

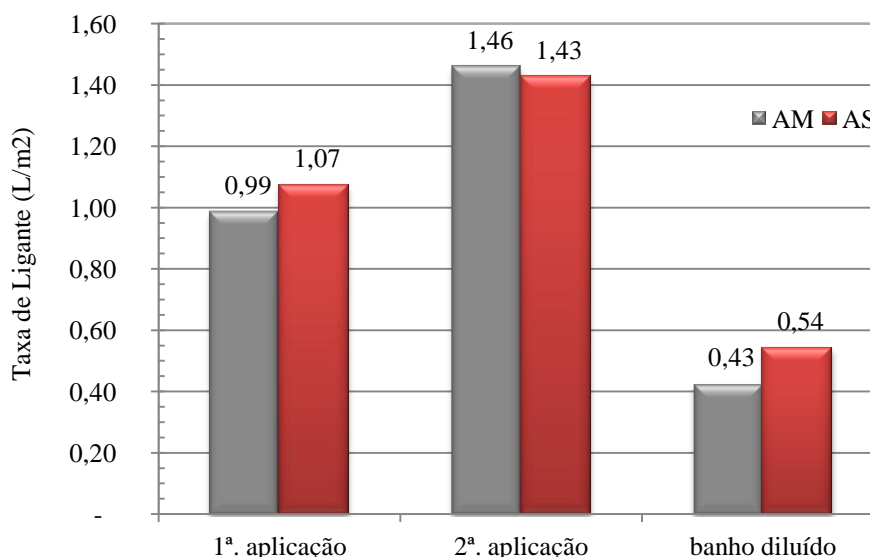
Observa-se na Tabela 4.12 que para o cálculo do resumo estatístico do banho diluído e do desgaste foram desconsiderados os dados do CP1 e CP3, respectivamente. Essa ação foi realizada analisando o comportamento da amostra e a influência desses valores atípicos nos resultados.

Através da análise estatística realizada verifica-se que os resultados do TSD-AS apresentam uma maior amplitude e dispersão de resultados quando comparados aos obtidos para o TSD-AM.

4.4.1.1 Análise das taxas de ligante

A Figura 4.12 apresenta graficamente o resultado da média das taxas de ligante aplicadas na confecção dos corpos de prova de TSD-AM e TSD-AS.

Figura 4.12 - Taxas de emulsão RR-2C aplicadas no TSD-AM e TSD-AS



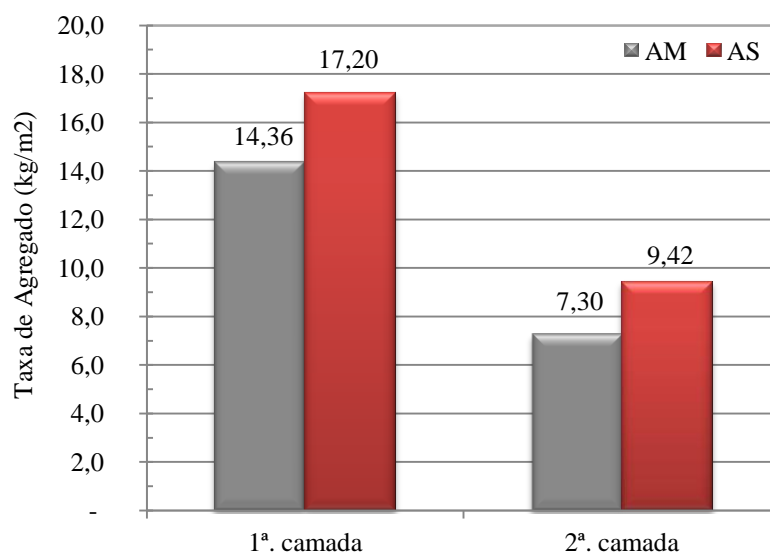
Fonte: Autor (2013).

Conforme observado na Figura 4.12, para ambos os agregados verificou-se que os valores das taxas de ligante aplicadas nas diversas camadas do TSD resultaram em valores próximos, independente do tipo de agregado testado. A taxa total de ligante obtida para o caso do AS foi de 3,04L/m² e para o caso do AM foi de 2,87L/m². Os valores ligeiramente maiores observados na utilização do AS pode ser explicado pela característica do material ser mais rugoso e com maior absorção quando comparado ao AM, resultando assim na necessidade de taxas maiores para o recobrimento do agregado.

4.4.1.2 Análise das taxas de agregado

A Figura 4.13 apresenta graficamente o resultado da média das taxas dos agregados mineral e siderúrgico aplicadas na confecção dos corpos de prova de TSD-AM e TSD-AS.

Figura 4.13 - Taxas de agregados aplicadas no TSD-AM e TSD-AS



Fonte: Autor (2013).

Na Figura 4.13, pode-se constatar que a utilização do agregado siderúrgico na confecção do TSD resultou em uma maior taxa total ($26,62\text{kg/m}^2$) de agregado quando comparado à utilização do agregado mineral ($21,66\text{kg/m}^2$). Entretanto, esse resultado deve ser observado com cuidado, tendo em vista a massa específica solta do agregado siderúrgico ser maior do que o agregado mineral, constatando-se assim que para um mesmo volume de TSD construído, se aplicaria em termos de massa uma maior taxa do TSD-AS, mas não necessariamente um maior volume de agregados.

A relação entre os valores de massa específica solta da granulometria da 1ª camada do AS ($1,09\text{kg/L}$) e do AM ($0,96\text{kg/L}$) resulta que para um mesmo volume de material a ser revestido com TSD, a massa do AS, tomando o AM como referência, seria 13,3% maior do que o AM, ou seja: $\text{Massa (AS)} = 1,133 \times \text{Massa (AM)}$. Na 2ª camada, a relação entre a massa específica do AS ($1,14\text{kg/L}$) e o AM ($0,98\text{kg/L}$) resultaria em 16,3%, implicando assim, em uma taxa real em kg/m^2 do TSD-AS maior do que o TSD-AM de 13,3% e 16,3% para a 1ª e 2ª camada, respectivamente.

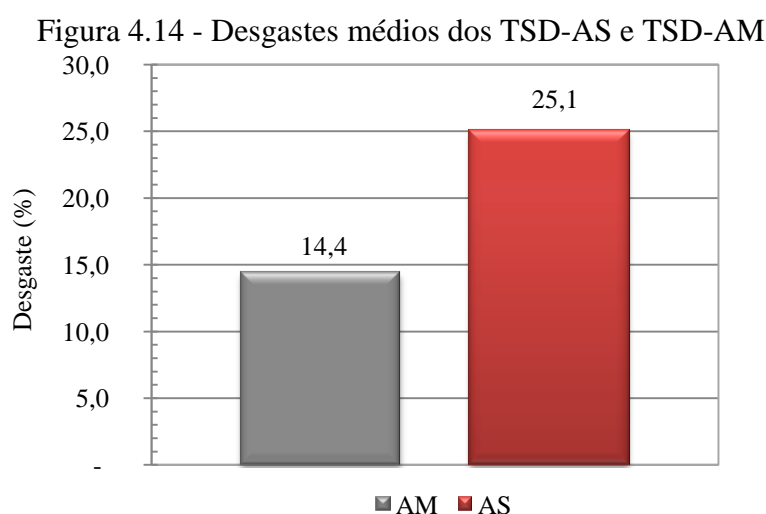
Analisando as taxas de agregados para ambas as camadas do TSD, verifica-se que a diferença entre as taxas da 1ª e 2ª camada do TSD-AS, em relação ao TSD-AM, é de $2,84$ ($17,20 - 14,36$) e $2,12\text{kg/m}^2$ ($9,42 - 7,30$), respectivamente. Esses valores representam na 1ª camada uma massa 19,8% maior de AS em relação ao AM e na 2ª camada, uma massa 29% maior. Subtraindo o valor encontrado pelo percentual constatado da relação entre as densidades do AS e AM para as duas camadas, ($19,8\% - 13,3\%$) e ($29\% - 16,3\%$), conclui-se

que a taxa real de agregado utilizada na 1ª camada do TSD-AS foi 6,5% maior do que o TSD-AM e 12,8% maior na 2ª camada.

Assim, uma vez subtraído o percentual da relação AS/AM, função da diferença do valor da massa específica solta dos materiais, chegou-se ao percentual verificado no cálculo da taxa de agregados do TSD-AS para a 1ª e 2ª camada (6,5 e 12,8%), resultando em taxas reais de 15,3 e 8,2kg/m², respectivamente. Esses são os valores da taxa de agregado siderúrgico em termos de agregado mineral para uma melhor compreensão das taxas aplicadas.

4.4.1.3 Análise dos desgastes

A Figura 4.14 apresenta graficamente o resultado da média dos desgastes observados nos corpos de prova de TSD-AM e TSD-AS quando submetidos ao ensaio de WTAT.



Fonte: Autor (2013).

Observa-se na Figura 4.14 que em termos de valores numéricos de desgaste, o TSD-AS apresentou um maior percentual de desagregação do material quando comparado ao TSD-AM, mesmo submetido às mesmas condições de ensaio. Do ponto de vista subjetivo, pode-se inferir que ambos os agregados apresentaram baixos valores de desgastes WTAT, tendo em vista o aspecto visual das mantas após o ensaio. Não se tem ainda um valor mínimo de desgaste que pode ser arbitrado como pequeno, mas sugere-se adotar, com base nos trabalhos de laboratório, o uso de um valor abaixo de 20% para ser considerado como sendo de baixo desgaste WTAT.

Uma explicação possível para o maior desgaste das mantas com AS pode estar relacionada à forma dos agregados. Observou-se, nos ensaios de caracterização, que o AS apresentou um valor para o índice de forma melhor do que o AM, indicando assim um formato menos lamelar e mais cúbico. No caso do ensaio WTAT, essa característica do AS pode aumentar o arrancamento do agregado que é provocado pelo contato com a mangueira de borracha usada durante o ensaio.

Nas pesquisas desenvolvidas por Loiola (2009) e Pereira (2010), verificou-se um desgaste inferior a 10% para os agregados mineral e siderúrgico testados, tendo o agregado siderúrgico um melhor comportamento. Reforça-se que tais resultados não podem ser comparados diretamente com os valores apresentados na presente pesquisa, tendo em vista ao erro presente na fórmula utilizada pelos autores para a estimativa de desgaste, conforme explicado no item 3.5.1.

Ressalta-se também que nos trabalhos desenvolvidos por Loiola (2009) e Pereira (2010) empregou-se outro tipo de agregado de origem granítica, diferente do estudado neste trabalho que é do tipo gnaiss. Castro (2011) ao investigar o comportamento de três agregados minerais da RMF para aplicação MRAF concluiu que o melhor agregado a ser empregado foi o usado na presente pesquisa. Ressalte-se que um dos agregados estudados por Castro (2011) era semelhante ao estudado por Loiola (2009) e Pereira (2009).

De maneira geral, verificou-se certa limitação quanto à adaptação do WTAT para avaliação dos TSDs, conforme metodologia desenvolvida por Loiola (2009). O esforço rotativo aplicado pela mangueira no corpo de prova não proporciona um efeito abrasivo, mas sim um arrancamento dos agregados, principalmente o material sobreposto na 2ª camada.

Acredita-se que a utilização do ensaio de WTAT e da metodologia adotada na presente pesquisa, devem ser analisadas cuidadosamente quando tiverem por finalidade qualificar ordenadamente vários tipos de agregados. Tal recomendação deve-se as limitações observadas na realização dos ensaios com relação a aspectos dos agregados como: índice de forma, abrasão, travamento entre os agregados e compactação.

4.4.2 Resultados da análise de desempenho do MRAF-AM e MRAF-AS

Na realização deste trabalho e como parte da metodologia proposta no 3º procedimento experimental, adotaram-se como parâmetro de desempenho da mistura testada os ensaios de WTAT, coesão e cura pelo coesímetro (MCT) e adesividade de misturas (WST).

4.4.2.1 Resultados dos ensaios de MRAF-AM e MRAF-AS submetidos ao WTAT

A avaliação de desempenho utilizando o ensaio WTAT se deu através de metodologia semelhante à aplicada aos corpos de prova de TSD. Para cada tipo de mistura, MRAF-AM e MRAF-AS, foram moldados nove corpos de prova no teor ótimo de emulsão de cada mistura e com proporções idênticas de materiais, granulometria, água e fíler.

Os corpos de prova foram submetidos a todos os procedimentos realizados no ensaio de WTAT, com o objetivo de verificar se as misturas atenderiam às especificações da norma, para o teor ótimo de ligante obtido no processo de dosagem. A Tabela 4.13 ilustra os resultados obtidos para o desgaste dos corpos de prova em g/m^2 e porcentagem, além de um resumo estatístico das amostras estudadas.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio do WTAT para as misturas MRAF-AM e MRAF-AS

Corpos de prova	DESGASTES MRAF-AM		DESGASTES MRAF-AS	
	(g/m^2)	%	(g/m^2)	%
CP1	559,3	1,0	115,2	0,1
CP2	447,4	0,8	52,6	0,1
CP3	667,9	1,2	59,2	0,1
CP4	348,7	0,6	88,8	0,1
CP5	486,9	0,8	348,7	0,4
CP6	559,3	0,9	82,3	0,1
CP7	608,7	1,1	65,8	0,1
CP8	575,8	1,0	105,3	0,1
CP9	592,2	1,0	197,4	0,2
Média	538,5		123,9	
Variância	9219,4		8997,5	
Desvio padrão	96,0		94,9	
Valor máx.	667,9		348,7	
Valor mín.	348,7		52,6	
Amplitude	319,1		296,1	
Coef. Var.	17,8		76,5	

Fonte: Autor (2013).

Observando-se a Tabela 4.13, verifica-se que nos corpos de prova de MRAF-AM ocorreu certa variabilidade nos valores dos desgastes obtidos, resultando em um valor médio de desgaste de $538,5\text{g/m}^2$. O valor observado, ligeiramente maior do que o limite (538g/m^2) foi obtido utilizando no cálculo o resultado da média das nove amostras.

Analisando os desgastes para todos os corpos de prova de agregado mineral ensaiados, verifica-se nos corpos de prova CP3 e CP4 grande divergência dos demais. A

média calculada sem a utilização desses resultados resulta em um valor de 547,1g/m² e uma menor dispersão dos resultados individuais em relação à média. Entretanto, valor ainda superior ao desgaste permitido.

Quanto ao MRAF-AS, verificou-se uma forte dispersão dos resultados encontrados, representado pelo elevado valor do coeficiente de variação. O desgaste médio dos resultados incluindo todos os corpos de prova resultou em 123,9g/m², valor dentro do limite exigido pelas especificações de microrrevestimento asfáltico.

Analisando a Tabela 4.13, verifica-se para o MRAF-AS um elevado desgaste para o CP5 quando comparado aos demais valores observados na amostra. O cálculo da média dos desgastes obtidos desconsiderando o CP5 resulta em um valor de 95,8g/m², com um desvio padrão de 46,5g/m² e coeficiente de variação de 48,5%, valor ainda bastante elevado.

Verificando comparativamente os dois revestimentos testados, observa-se que de maneira geral a utilização do agregado siderúrgico resultou em um menor desgaste do microrrevestimento quando comparado ao agregado mineral.

O agregado mineral utilizado na presente pesquisa é de comum utilização em obras rodoviárias no estado do Ceará. Para ambos os agregados, acredita-se que fatores como moldagem e acabamento na confecção dos corpos de prova podem ter favorecido o polimento dos agregados, assim como o aumento do desgaste e a variabilidade dos resultados. Possivelmente uma amostragem maior tenderia a um valor mais representativo do desgaste médio e com menor dispersão.

Acredita-se que o resultado obtido pelo valor médio dos desgastes do microrrevestimento com agregado mineral não inviabiliza a sua utilização, tendo em vista o mesmo ter apresentado bons resultados de caracterização e ser considerado viável para a utilização em serviços de pavimentação.

Destaca-se como resultado mais importante desta análise de desempenho do MRAF submetido ao WTAT, o baixo valor de desgaste do AS quando comparado aos valores do AM. Pode-se considerar esse resultado como um indicativo da qualidade do material fino do AS e a sua potencialidade para aplicação em serviços de microrrevestimento asfáltico.

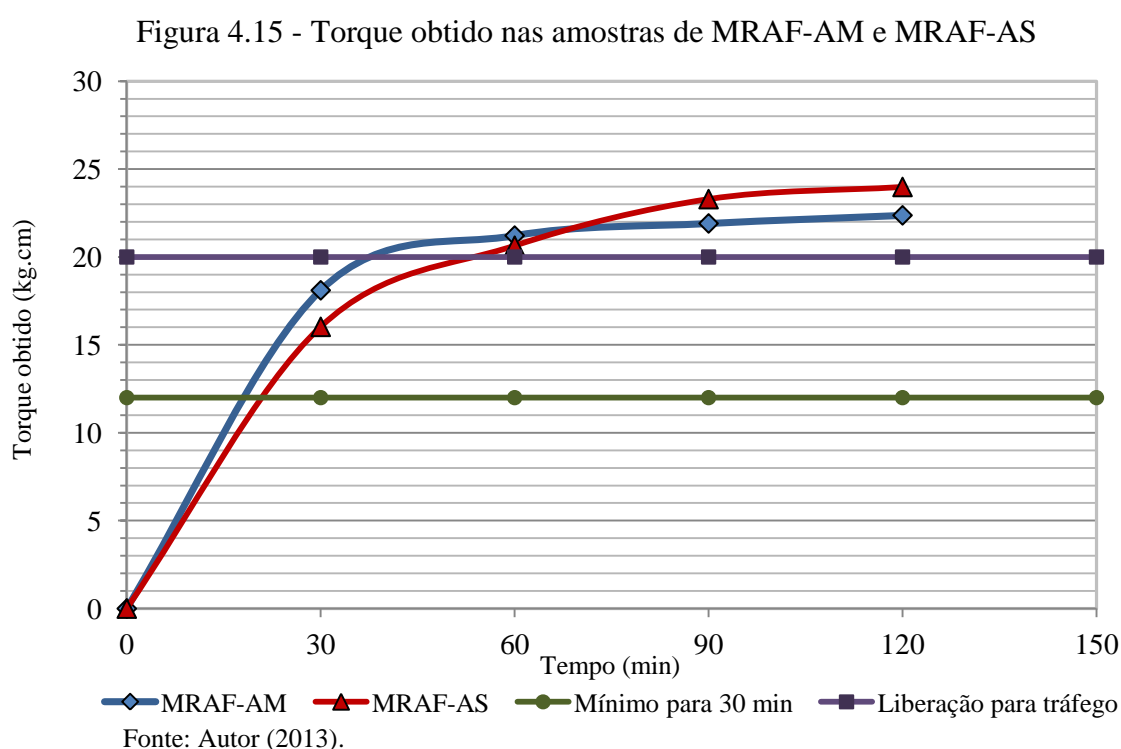
4.4.2.2 Resultados do ensaio de coesão da mistura MRAF-AM e MRAF-AS

O ensaio de determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro foi realizado de acordo com a norma NBR 14798/2002. O ensaio tem como objetivo determinar a

resistência ao torque superficial de uma mistura de microrrevestimento durante seu processo de cura, obtendo-se assim o tempo de liberação ao tráfego do MRAF.

As especificações recomendam que uma mistura de cura rápida tenha um torque mínimo de 12 kg.cm, após 30 minutos de moldagem, e que desenvolva um torque de no mínimo 20 kg.cm, após 60 minutos de moldagem, para ser classificada como de rápida liberação ao tráfego.

O ensaio foi realizado para as misturas com agregado mineral e siderúrgico e os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.15.



Conforme observado na Figura 4.15, ambas as misturas atendem aos critérios recomendados pelas especificações.

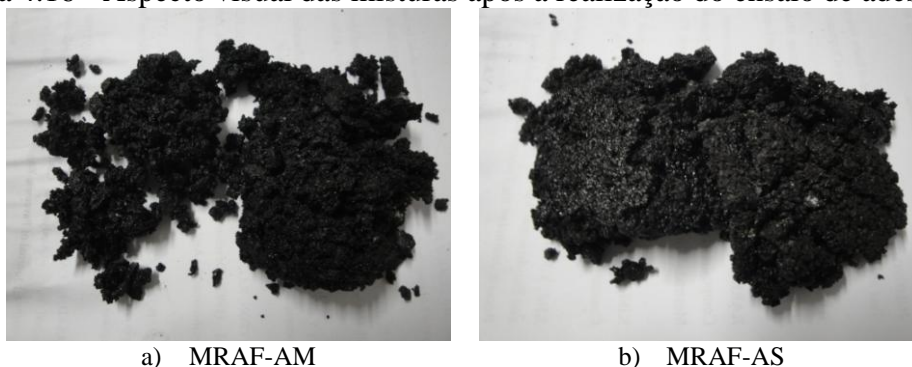
Para o tempo de 30 minutos, verifica-se que o MRAF-AM apresenta um torque maior do que o MRAF-AS, porém ambos superam o limite mínimo de cura rápida. Ressalta-se que na moldagem do corpo de prova de MRAF-AM foi utilizado o teor de 0,5% de aditivo como observado na dosagem.

Quanto ao limite para verificação de liberação ao tráfego, ambas as misturas atendem às especificações e apresentam resultados semelhantes, podendo o tráfego ser liberado com uma hora após a aplicação do microrrevestimento.

4.4.2.3 Verificação da compatibilidade agregado-emulsão das misturas (WST)

A verificação da compatibilidade agregado-emulsão das misturas MRAF-AM e MRAF-AS foi realizada segundo NBR 14757/2001. Os resultados obtidos através de inspeção visual indicaram um recobrimento de mais de 90% em ambas as misturas, classificando-as como de adesividade satisfatória. A Figura 4.16 ilustra o aspecto final das misturas depois do ensaio.

Figura 4.16 - Aspecto visual das misturas após a realização do ensaio de adesividade



Fonte: Autor (2013).

4.5 Resultados do quarto procedimento experimental

O quarto procedimento experimental apresenta inicialmente os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais constituintes da camada de base das placas submetidas ao simulador de tráfego de laboratório.

Sobre a camada de base foi aplicada uma imprimação e dois tipos de revestimentos foram testados, TSD e *cape seal*, ambos moldados com dois agregados diferentes, um agregado mineral de referência e um agregado siderúrgico como material alternativo.

As taxas de ligantes e agregados aplicadas no TSD foram as mesmas calculadas no 2º procedimento experimental, adaptando-as em função da área da placa. Na moldagem do *cape seal* foi necessário a dosagem da 1ª camada de TSS. Para a 2ª camada foi utilizada a dosagem da mistura de MRAF anteriormente determinada.

Como apresentado no Capítulo 3, as placas foram submetidas à metodologia desenvolvida na presente pesquisa e os resultados obtidos para os diferentes revestimentos e materiais testados são apresentados a seguir.

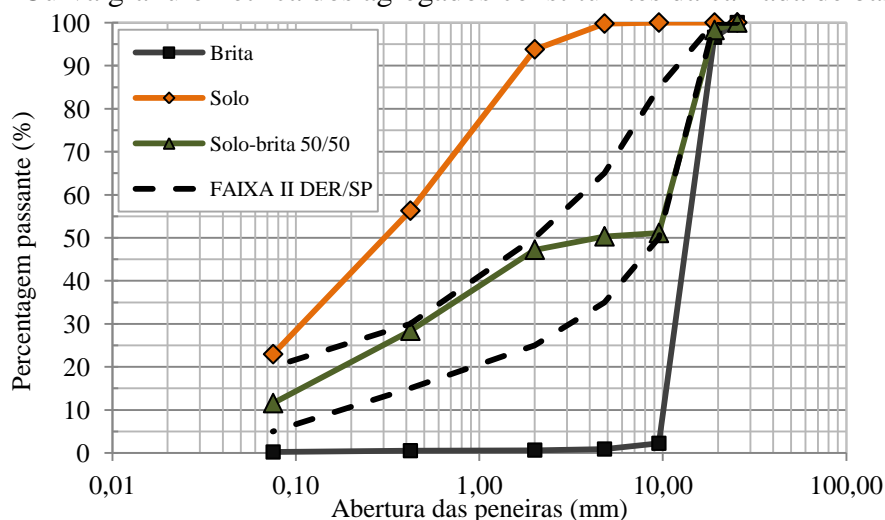
4.5.1 Caracterização dos materiais utilizados na base das placas submetidas ao simulador de tráfego

Em todas as placas foram utilizadas uma composição de 50% de solo e 50% de agregado mineral na moldagem das bases de solo-brita. O solo e a brita foram coletados na Região Metropolitana de Fortaleza e são usualmente empregados em obras de pavimentação do estado do Ceará.

A realização dos ensaios de caracterização visou analisar a qualidade da mistura solo-brita aplicada na simulação da camada de base das placas submetidas ao simulador de laboratório, bem como garantir a fabricação de uma base estabilizada e que não influenciasse a deformação medida através do ensaio de simulação pelo pneumático.

Realizou-se na mistura de solo-brita os ensaios de granulometria, compactação, *California Bearing Ratio* (CBR), Módulo de Resiliência (MR) e densidade *in situ*. A granulometria do solo, da brita, e da mistura solo-brita testada podem ser visualizados na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Curva granulométrica dos agregados constituintes da camada de base das placas



Fonte: Autor (2013).

A mistura solo-brita foi enquadrada na Faixa II do DER/SP segundo a especificação técnica ET-DE-P00/006 para construção de sub-base ou base de solo-brita.

O ensaio de compactação e CBR foram realizados na mistura solo-brita na energia modificada. A massa específica seca máxima obtida no ensaio de compactação foi $2,297\text{g/cm}^3$ e a umidade ótima 6,0%. O valor do CBR observado foi 164%.

O ensaio de densidade *in situ* foi realizado após a moldagem das placas de solo-brita de forma a verificar o grau de compactação e qualidade da base compactada. O grau de compactação é a relação entre a massa específica aparente máxima obtida do solo seco *in situ* e a massa específica aparente máxima do solo seco obtida em laboratório. A sequência metodológica, conforme descrita no Capítulo 3, resultou em um grau de compactação igual a 100%. A Figura 4.18 ilustra algumas etapas do ensaio.

O ensaio de MR foi realizado de forma a investigar o comportamento do solo-brita quanto aos parâmetros de deformabilidade. Os corpos de prova foram moldados na energia modificada e no teor ótimo de umidade.

Para a análise do MR foram testados três modelos: (a) o modelo que relaciona o valor de MR com a tensão desvio (σ_d), (b) o que relaciona o valor de MR com a tensão confinante (σ_3) e (c) o modelo composto que relaciona o MR com σ_d e σ_3 . A Tabela 4.14 apresenta os valores de R^2 em função dos modelos testados.

Tabela 4.14 - Modelos de avaliação do MR

Modelo	R^2	Equação
(a) $M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	0,72	$MR = 367,14 \cdot \sigma_d^{0,3263}$
(b) $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	0,82	$MR = 598,74 \cdot \sigma_3^{0,4292}$
(c) $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	0,90	$MR = 6819,06 \cdot \sigma_3^{0,3253} \cdot \sigma_d^{0,1954}$

Fonte: Autor (2013).

Para os modelos analisados, constatou-se, em função do valor de R^2 , que o modelo composto representa melhor o comportamento do solo-brita.

Figura 4.18 - Ensaio de densidade *in situ*



a) Furo perfurado na base de solo-brita b) Preenchimento do furo com areia

Fonte: Autor (2013).

Conforme os resultados dos ensaios realizados, verificou-se que a mistura solo-brita apresentou características que viabilizaram a sua utilização como material constituinte da camada de base das placas de *cape seal* e TSD.

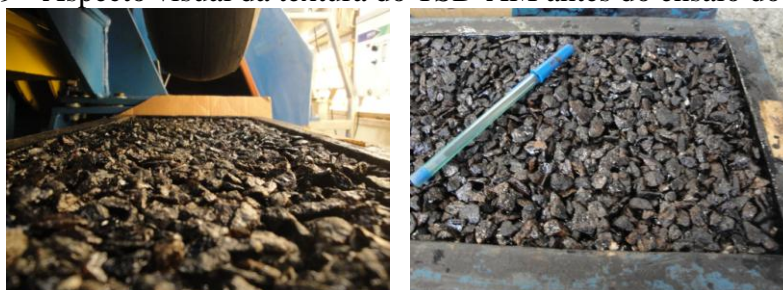
4.5.2 Avaliação das placas de TSD-AM e TSD-AS submetidas ao simulador de tráfego

A avaliação das placas de tratamento superficial duplo foi feita para ambos os agregados visando analisar o comportamento do revestimento diante do carregamento submetido pelo simulador. Os resultados a seguir são detalhados em função do tipo de agregado ensaiado.

4.5.2.1 Resultados das placas de TSD-AM

Devido ao aspecto rugoso e irregular da superfície do TSD, a avaliação e acompanhamento da deformação realizada de acordo com a norma francesa NF P98-253-1 não foi possível de ser realizada. Essa norma foi desenvolvida para misturas a quente e recomenda que a leitura do afundamento seja feita para cada ciclo. Entretanto, devido ao arrancamento e deslocamento dos agregados do TSD com a passagem do pneumático, o acompanhamento das leituras ficou impossibilitado. A Figura 4.19 ilustra o aspecto rugoso do TSD ensaiado.

Figura 4.19 - Aspecto visual da textura do TSD-AM antes do ensaio do simulador



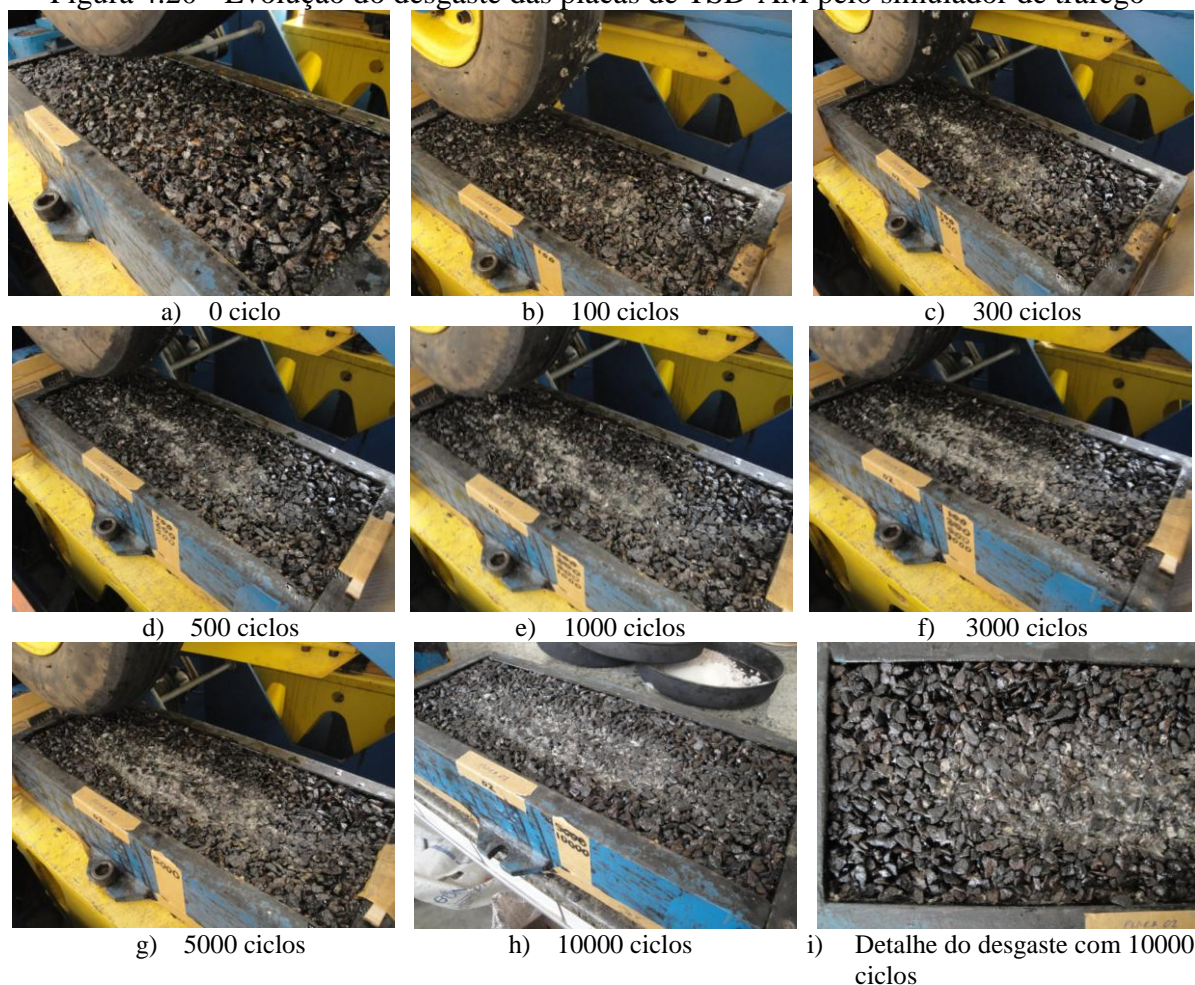
a) Detalhe transversal da placa

b) Vista superior da placa

Fonte: Autor (2013).

Desta forma, achou-se razoável avaliar o desgaste e a deformação do material através do acompanhamento visual e registro fotográfico para cada ciclo ensaiado. O TSD-AM foi submetido ao carregamento de 75kg aplicado pelo pneumático, sendo avaliado visualmente nos seguintes pontos de parada: 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000 e 10000 ciclos. A Figura 4.20 ilustra o comportamento das placas ensaiadas para os diversos ciclos.

Figura 4.20 - Evolução do desgaste das placas de TSD-AM pelo simulador de tráfego



Fonte: Autor (2013).

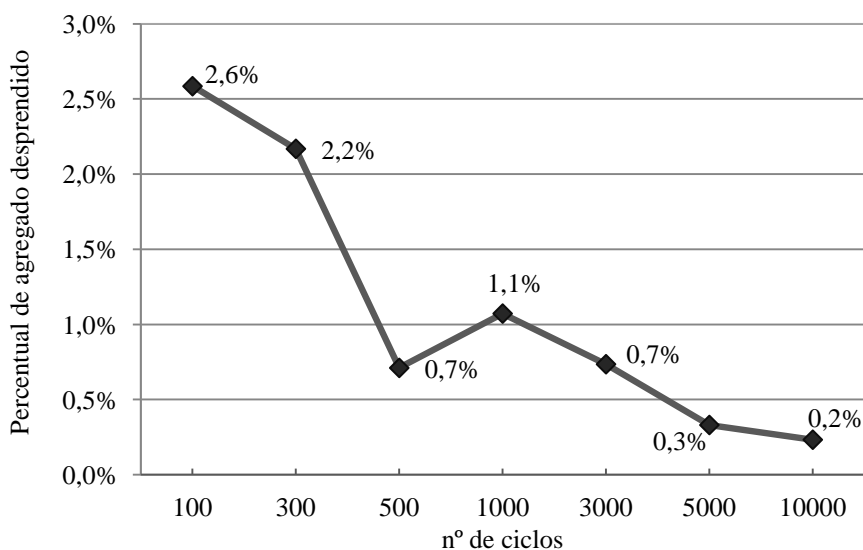
Observando-se a Figura 4.20, comprova-se que a evolução do desgaste se deu ao longo do incremento do número de ciclos, conforme esperado. Verificou-se nas placas de TSD-AM uma maior desagregação inicial dos agregados constituintes da 2ª camada, e uma redução da taxa de massa de agregado ao longo do número de ciclos.

Acredita-se que esse comportamento possa estar relacionado à energia aplicada na compactação das placas. Durante a compactação foi utilizada uma placa de metal, entre o pneumático e o revestimento, em razão da limitação da mesa compactadora para aplicações de cargas maiores provocar quebra de agregados, bem como visando uma melhor distribuição da carga aplicada pelo pneumático. Ressalte-se que a utilização direta do pneumático da mesa compactadora sobre o revestimento do tipo TS deve ser evitada devido ao frequente arrancamento de agregados, ocasionado pela rolagem e a adesão.

No ensaio realizado com 100 e 300 ciclos é possível visualizar, na Figura 4.20, os agregados aderidos ao pneumático. Constatou-se que os valores da massa de agregado desprendidos da placa variaram em função do nível de carregamento, no entanto, com

tendência a diminuir ao longo dos ciclos. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que ao longo do carregamento as partículas de agregado foram se acomodando e fornecendo um melhor travamento. A Figura 4.21 ilustra o percentual de agregado desprendido da 2ª camada da placa de TSD-AM em comparação à taxa inicialmente aplicada.

Figura 4.21 - Massa de agregado desprendida da placa de TSD-AM em percentual



Fonte: Autor (2013).

A massa de agregado desprendida após a realização de cada ciclo foi obtida através da varredura das placas e coleta do agregado solto. Para cada ciclo, analisou-se também a evolução da acomodação do material e a formação da trilha de roda. A Figura 4.22 ilustra esses aspectos comentados.

Figura 4.22 - Varredura e formação de trilha de roda no TSD-AM



a) Varredura dos agregados soltos

b) Área com agregados soltos

c) Acomodação dos agregados

Fonte: Autor (2013).

O aparecimento de trilha de roda devido à acomodação do material foi visualizado com 300 ciclos de carregamento. A profundidade de afundamento teve uma maior variação

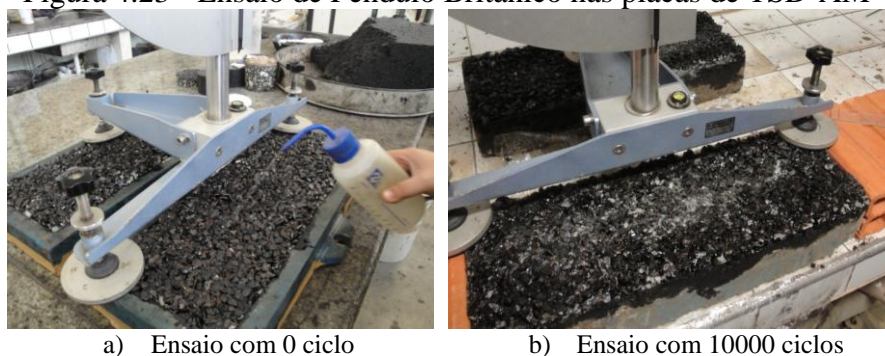
até os 3000 ciclos. Já para os carregamentos de 5000 e 10000 ciclos não foi observado alterações significativas ao longo da execução do ensaio.

O critério de parada na realização do ensaio foi estabelecido visualmente pelo nível de desgaste ao longo do mesmo. Observou-se, experimentalmente, para 10000 ciclos aplicados pelo pneumático que um aumento do número de ciclos implicaria um maior desgaste das placas, inviabilizando, assim, a realização dos ensaios de avaliação da textura dos materiais.

Os ensaios relativos à macrotextura e microtextura das placas de TSD-AM foram realizados antes e depois da aplicação dos ciclos de carga pelo simulador. As leituras tiveram o objetivo de acompanhar a evolução do desgaste através da textura dos revestimentos, aspecto de fundamental importância ao longo da vida útil de uma rodovia.

Inicialmente, realizou-se o ensaio de Pêndulo Britânico cujos valores de VRD (valor de resistência à derrapagem), segundo DNIT (2006), resultaram em um valor médio de 79 para 0 ciclo de carregamento, classificando-o de acordo com a Tabela 3.5 como uma superfície muito rugosa. O ensaio realizado após o ensaio com 10000 ciclos de passagens do pneumático constatou um valor de VRD igual a 70, classificando-o como uma superfície rugosa. A Figura 4.23 ilustra a execução do ensaio.

Figura 4.23 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de TSD-AM



Fonte: Autor (2013).

Os valores de VRD constatados antes e depois da realização do ensaio com o simulador atestaram o aspecto rugoso da microtextura do TSD-AM. Acredita-se que a redução do valor de VRD, resultando em uma perda da rugosidade, se deve ao arrancamento do material da 2ª camada, aliado a um maior polimento e acomodação dos agregados pela formação da trilha de roda, como comentado anteriormente.

A avaliação da macrotextura foi feita através do ensaio de mancha de areia, cujos valores de HS (altura média da mancha de areia em mm) segundo DNIT (2006) resultaram em

valores médios de 4,68 e 2,82mm para ensaios realizados antes e depois do simulador, respectivamente.

De acordo com a Tabela 3.4, esses resultados indicam que o TSD-AM pode ser classificado como um revestimento de superfície muito grosseira ou muito aberta. Observa-se que mesmo após a realização da passagem de 10000 ciclos pelo simulador, o valor da altura da mancha pode ser considerado bastante elevado. A Figura 4.24 ilustra a realização do ensaio.

Figura 4.24 - Ensaio de mancha de areia nas placas de TSD-AM



a) Ensaio com 0 ciclo

b) Ensaio com 10000 ciclos

Fonte: Autor (2013).

Devido ao aspecto irregular do TSD-AM, ocasionado pelo arrancamento e acomodação do agregado da 2ª camada após a aplicação dos 10000 ciclos, a medição do diâmetro médio se mostrou complicada, utilizando-se no cálculo do HS um valor médio da região de maior desgaste da placa.

4.5.2.2 Resultados das placas de TSD-AS

A avaliação das placas de TSD-AS foi realizada de acordo com a metodologia desenvolvida e aplicada na presente pesquisa para o agregado mineral. A utilização do mesmo procedimento visou à análise comparativa do comportamento dos agregados utilizados sujeitos às mesmas condições de esforços das placas de TSD-AM. A Figura 4.25 ilustra o aspecto das placas de TSD-AS antes do início do ensaio.

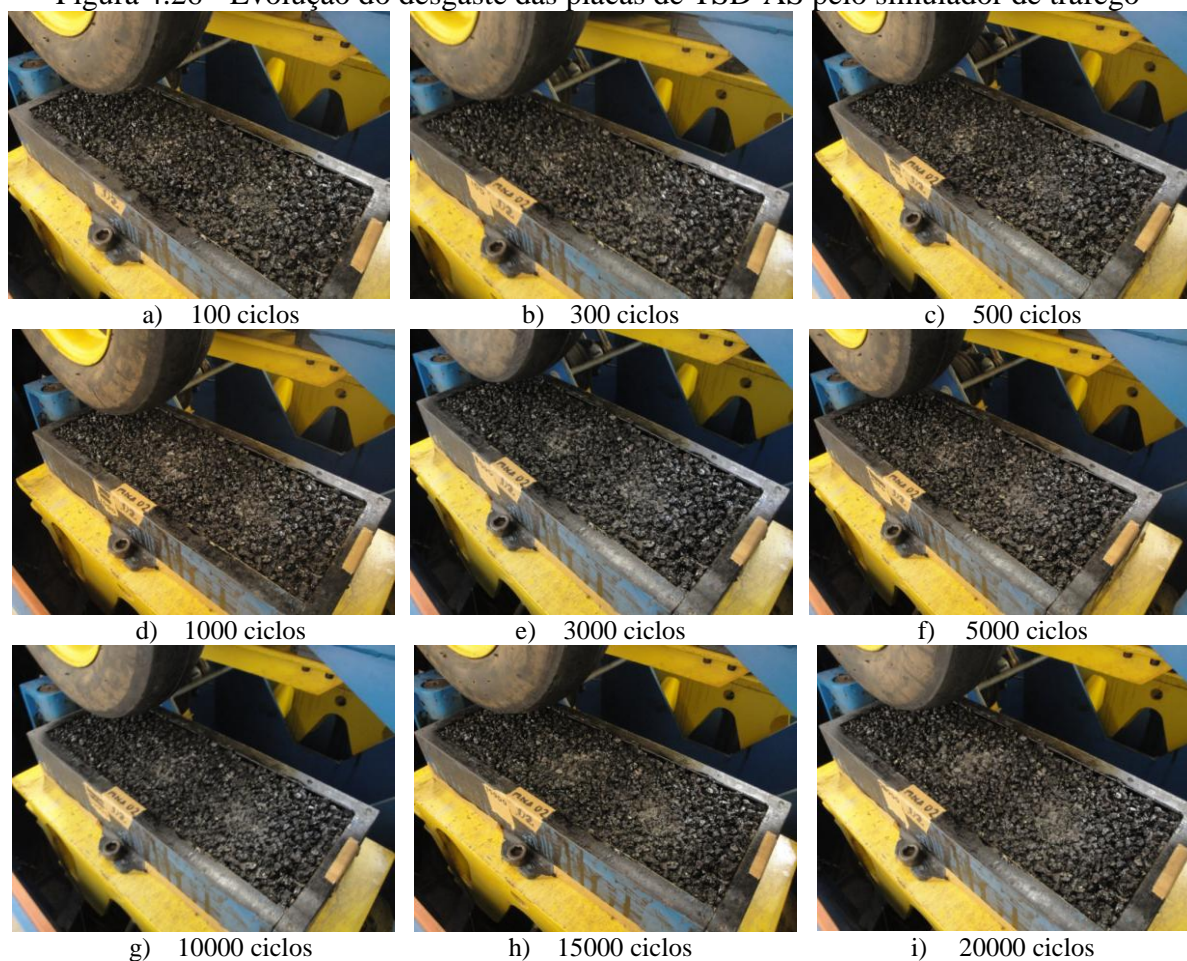
Figura 4.25 - Aspecto visual da textura do TSD-AS antes do ensaio do simulador



a) Detalhe da textura do TSD-AS b) Placas antes do simulador
Fonte: Autor (2013).

A análise das placas de TSD-AS quanto ao desgaste e deformação sofrida pela carga do simulador foi feita para os carregamentos de 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 10000, 15000 e 20000 ciclos. A avaliação do TSD-AS foi feita através do acompanhamento visual e registro fotográfico para cada ciclo ensaiado. A Figura 4.26 ilustra o comportamento das placas ensaiadas para os diversos ciclos.

Figura 4.26 - Evolução do desgaste das placas de TSD-AS pelo simulador de tráfego

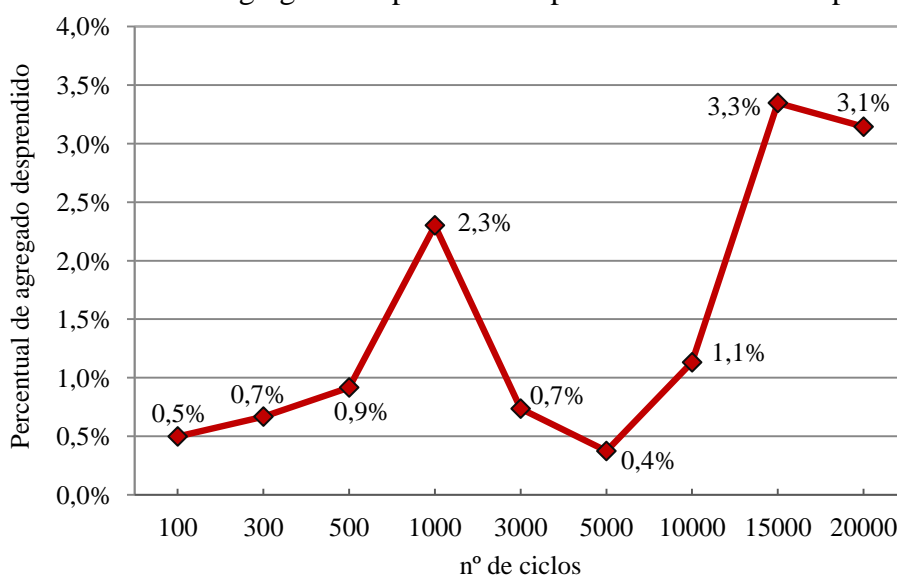


Fonte: Autor (2013).

Observando a Figura 4.26, verifica-se que a evolução do desgaste sofrido pela placa de TSD-AS se deu de forma gradual e lenta ao longo do ensaio. De maneira geral, o agregado siderúrgico utilizado na confecção das placas não apresentou problemas quanto à quebra de agregados. Entretanto, constatou-se ao longo do incremento dos ciclos um leve aumento na quantidade de agregados soltos.

Uma maior desagregação do material da 2ª camada do TSD-AS ocorreu com 1000 ciclos de passagens do pneumático, voltando a reduzir para 3000 e 5000 ciclos e aumentando novamente para 15000 e 20000 ciclos. A Figura 4.27 ilustra a evolução da perda de agregado da 2ª camada do TSD-AS ao longo do ensaio.

Figura 4.27 - Massa de agregado desprendida da placa de TSD-AS em percentagem



Fonte: Autor (2013).

A passagem do simulador de tráfego até os 20000 ciclos de carregamento foi realizada devido ao TSD-AS apresentar ao longo do ensaio aspecto visual que permitisse o estudo do revestimento sob a atuação de ciclos maiores do que os aplicados no TSD-AM.

Apesar do revestimento TSD-AS apresentar visualmente boas características ao longo da execução do ensaio, o critério de parada do ensaio aos 20000 ciclos foi adotado devido ao aparecimento das primeiras desagregações pontuais do material da 1ª camada, atestando assim, o início de um possível desgaste excessivo.

Quanto ao aspecto relativo à deformação e formação de trilha, observou-se que o TSD-AS respondeu de maneira satisfatória as aplicações dos ciclos de carga, tendo os primeiros sinais de trilha de roda aparecido somente com 3000 ciclos de carregamento. A

Figura 4.28 ilustra o acompanhamento da trilha de roda ao longo do ensaio nas placas de TSD-AS.

Figura 4.28 - Acompanhamento da evolução da trilha de roda do TSD-AS

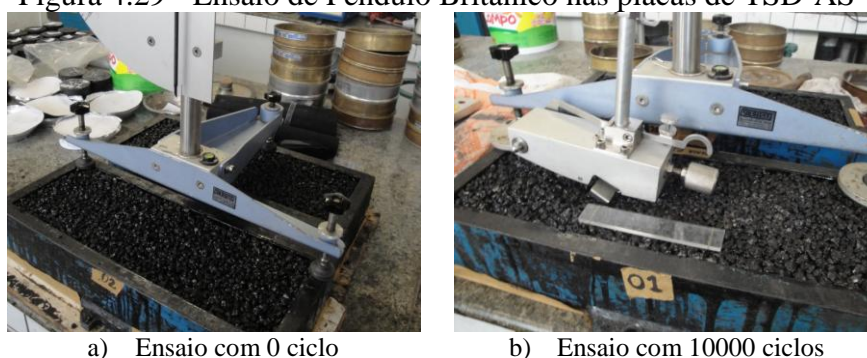


Fonte: Autor (2013).

A formação da trilha de roda no TSD-AS se deu de forma irregular devido ao arrancamento dos agregados em locais pontuais da placa, favorecendo assim, regiões com uma maior deformação. No geral, a atuação do carregamento contribuiu para um maior travamento dos agregados do revestimento devido a uma maior compactação provocada pelo pneumático.

Quanto à avaliação da macrotextura e microtextura das placas de TSD-AS, os valores de VRD médios calculados com o Pêndulo Britânico antes e depois da aplicação dos 20000 ciclos resultaram em 65 e 89, respectivamente. A Figura 4.29 ilustra a execução do ensaio.

Figura 4.29 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de TSD-AS



Fonte: Autor (2013).

O resultado indica um aumento da rugosidade do TSD-AS após a realização do ensaio. Acredita-se que esse aumento seja devido ao arrancamento irregular dos agregados da 2ª camada, formando regiões da placa com desníveis quanto à trilha de roda e conseqüentemente a passagem do pêndulo.

A avaliação da macrotextura foi feita através do ensaio de mancha de areia, cujos valores de HS, segundo DNIT (2006), resultaram em valores médios de 7,25 e 4,54mm para ensaios realizados antes e depois do simulador, respectivamente.

De acordo com a Tabela 3.4 esses resultados indicam que o TSD-AS pode ser classificado como um revestimento de superfície muito grosseira ou muito aberta. A Figura 4.30 ilustra a realização do ensaio.

Figura 4.30 - Ensaio de mancha de areia nas placas de TSD-AS



a) Ensaio com 0 ciclo

b) Ensaio com 20000 ciclos

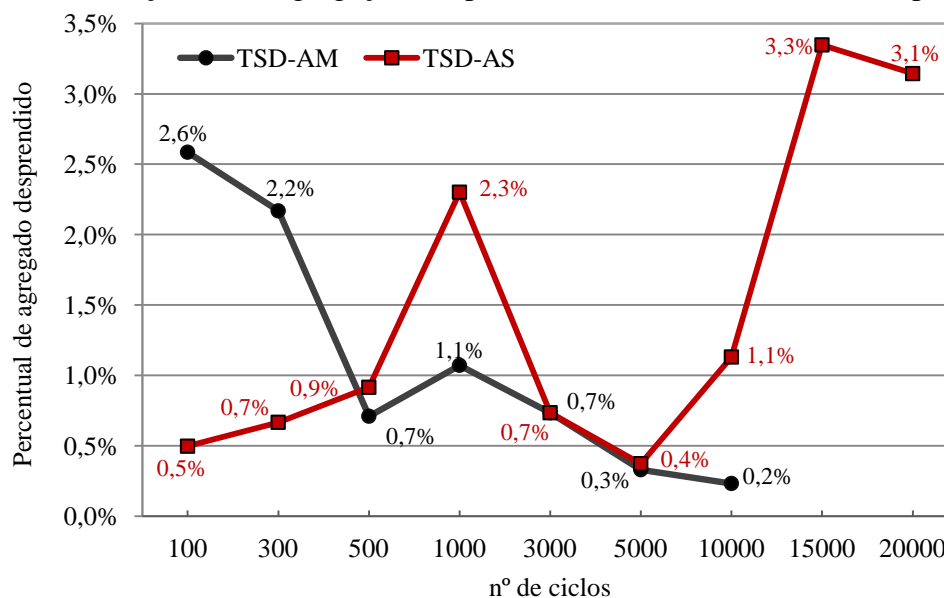
Fonte: Autor (2013).

4.5.2.3 *Resumo comparativo dos resultados do TSD-AM e do TSD-AS no simulador de laboratório*

A comparação dos resultados obtidos para o TSD-AM e TSD-AS visou avaliar em relação ao agregado de referência (agregado mineral), a utilização e comportamento de um agregado alternativo (agregado siderúrgico).

Observou-se, no aspecto relacionado ao desgaste e desagregação dos materiais, que as placas de TSD-AS apresentaram visualmente ao longo do ensaio um melhor aspecto em comparação ao TSD-AM. Apesar das placas de TSD-AS apresentarem um maior percentual de agregados soltos em comparação ao TSD-AM, as placas construídas com agregado siderúrgico necessitaram de um maior número de ciclos para que o desgaste visual se tornasse perceptível, chegando ao dobro de ciclos do agregado mineral. A Figura 4.31 ilustra a evolução da desagregação para os revestimentos.

Figura 4.31 - Evolução da desagregação das placas de TSD-AS e TSD-AM em percentagem



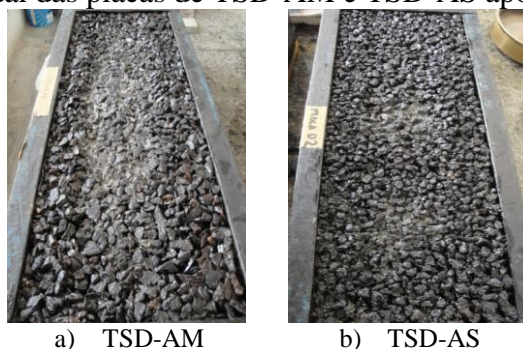
Fonte: Autor (2013).

Deve-se observar com atenção o pico, para o caso do TSD-AM, observado para o carregamento de 1000 ciclos que destoa do comportamento geral dos resultados. Acredita-se que essa discordância seja resultado de algum evento atípico e não represente a tendência geral dos resultados.

Observando-se a Figura 4.31, pode-se concluir para o TSD-AS que as placas confeccionadas com agregado siderúrgico apresentaram baixos valores de desgaste nos carregamentos iniciais, tendendo a um nível de desgaste aproximadamente constante com uma leve tendência de crescimento ao longo do aumento de ciclos.

Diferentemente do comportamento apresentado pelo TSD-AS, o TSD-AM apresentou os maiores picos de desgastes para os carregamentos iniciais e uma tendência a redução de desagregação ao longo do aumento do número de ciclos. A Figura 4.32 ilustra o aspecto visual das placas após o ensaio para os dois tipos de agregados testados.

Figura 4.32 - Aspecto visual das placas de TSD-AM e TSD-AS após o simulador de tráfego

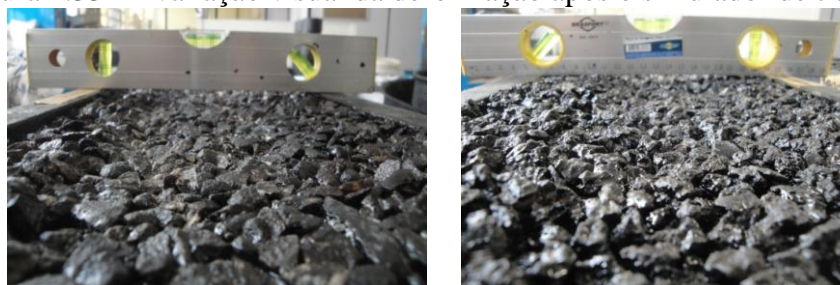


a) TSD-AM
Fonte: Autor (2013).

b) TSD-AS

Quanto ao aspecto relativo à deformação e formação de trilha de roda, a maior acomodação do agregado mineral resultou em maiores valores de trilha de roda para o TSD-AM. Acredita-se que essa tendência do agregado mineral deve estar relacionada ao seu formato mais lamelar do que o agregado siderúrgico. A Figura 4.33 ilustra os aspectos comentados.

Figura 4.33 - Avaliação visual da deformação após o simulador de tráfego



a) Afundamento do TSD-AM

b) Afundamento do TSD-AS

Fonte: Autor (2013).

A avaliação comparativa dos revestimentos quanto à macro e microtextura das placas estão apresentadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de TSD-AM e TSD-AS

MICROTEXTURA				
Placas	VRD		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
TSD-AM	79	70	Muito rugosa	Rugosa
TSD-AS	65	89	Rugosa	Muito rugosa
MACROTEXTURA				
Placas	HS (mm)		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
TSD-AM	4,68	2,82	Muito grosseira ou muito aberta	Muito grosseira ou muito aberta
TSD-AS	7,25	4,54	Muito grosseira ou muito aberta	Muito grosseira ou muito aberta

Fonte: Autor (2013).

Observando a Tabela 4.15, verifica-se que ambos os revestimentos testados apresentaram um valor de VRD maior do que o mínimo recomendado pela especificação de serviço DNIT 031/2006-ES (valor de 45) e pelo manual de restauração do DNIT (2006) cujo valor é de 55. O resultado apresentado ressalta o aspecto rugoso do revestimento do tipo TSD, independentemente do agregado utilizado e mesmo após os diferentes ciclos aplicados. Quanto à macrotextura, a especificação de serviço DNIT 031/2006-ES recomenda para pavimentos asfálticos que os valores de HS devam estar entre 0,6 e 1,2 de forma a classificar

o revestimento com textura entre média, grosseira ou aberta. Os valores elevados observados para as placas indicam um bom comportamento do revestimento quanto ao risco de hidroplanagem. Entretanto, altos valores de HS podem resultar em um desgaste excessivo de pneus, maior consumo de combustível e maior ruído ao rolamento.

4.5.3 Avaliação das placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS submetidas ao simulador de tráfego

As placas de *cape seal* com agregado mineral (CAPE SEAL-AM) e com agregado siderúrgico (CAPE SEAL-AS) foram moldadas de acordo com as especificações do DER/CE e do DNIT quanto à dosagem do TSS e MRAF, respectivamente. A dosagem do MRAF foi a mesma comentada anteriormente no segundo procedimento experimental.

A dosagem do TSS foi feita de acordo com a especificação DERT-ES-P 10/00. Para a classe granulométrica adotada na especificação (5/8"-3/8"), obteve-se a Tag e, posteriormente, a taxa de emulsão.

Seguindo a metodologia recomendada pela especificação, o cálculo da taxa de agregado da 1ª camada do TSS é a mesma do TSD anteriormente calculado, 14,95L/m² ou 14,39kg/m², para o agregado mineral, e 17,04L/m² ou 18,58kg/m², para o agregado siderúrgico.

Uma vez calculadas as taxas de agregados em L/m², os valores foram aplicados nas expressões definidas pela especificação do DER/CE para o cálculo da taxa de ligante. Para o TSS com agregado mineral e TSS com agregado siderúrgico, foram obtidas, respectivamente, as taxas de 1,45L/m² e 1,69L/m² para a 1ª camada. Quanto ao banho diluído, ambos os revestimentos utilizaram a taxa de 0,3L/m².

As taxas reais aplicadas foram convertidas em função da área da placa a ser revestida. Após a moldagem, as placas foram submetidas ao simulador de tráfego e os resultados observados serão detalhados a seguir em função do tipo de agregado ensaiado.

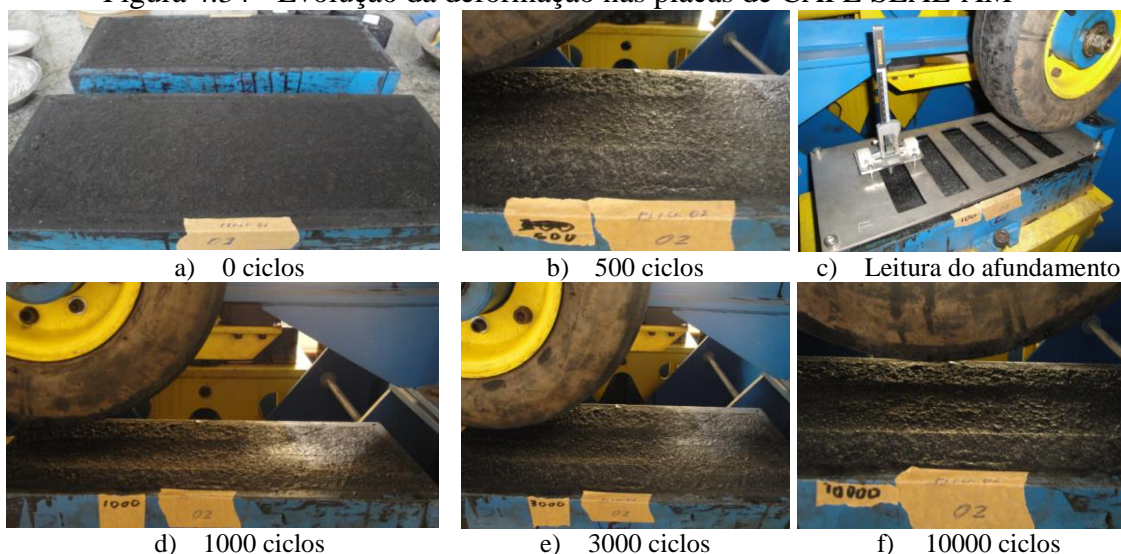
4.5.3.1 Resultados das placas de CAPE SEAL-AM

As placas de CAPE SEAL-AM foram submetidas ao carregamento de 75kg aplicado pelo pneumático, sendo avaliado visualmente nos seguintes pontos de parada: 100, 500, 1000, 3000, 7000 e 10000 ciclos. Para as placas de CAPE SEAL não foram realizadas leituras com 300 e 5000 ciclos como no TSD-AM, isso se deve à evolução da deformação ser

mais visível para ciclos maiores de carregamento, enquanto nas placas de TSD, a desagregação tende a ser maior nos ciclos iniciais.

Para cada ponto de parada foi realizada a leitura do afundamento, conforme a norma francesa NF P98-253-1, visando medir a deformação do revestimento testado. A Figura 4.34 ilustra visualmente as placas ensaiadas para diversos ciclos.

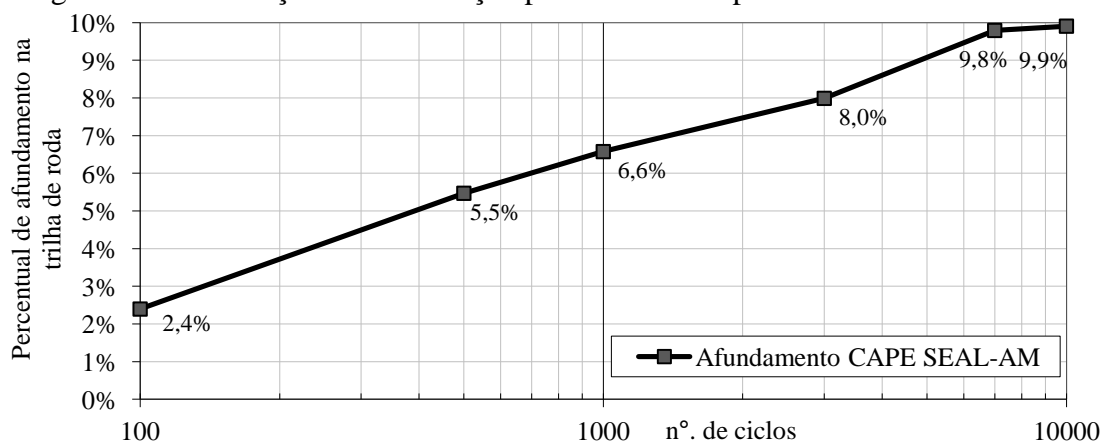
Figura 4.34 - Evolução da deformação nas placas de CAPE SEAL-AM



Fonte: Autor (2013).

O acompanhamento do afundamento da trilha de roda foi realizado até os 10000 ciclos de passagens do pneumático. Esse ponto de parada foi adotado para efeito de simulação do mesmo carregamento executado nas placas de TSD. A Figura 4.35 ilustra a deformação permanente medida pelo afundamento das placas de CAPE SEAL-AM com relação a altura total do revestimento.

Figura 4.35 - Evolução da deformação permanente nas placas de CAPE SEAL-AM



Fonte: Autor (2013).

Conforme observado na Figura 4.35, a evolução da deformação permanente, medido na trilha de roda do pneumático, proporcionou um afundamento gradual e praticamente linear ao longo do ensaio.

Percebe-se também que no intervalo entre 7000 ciclos e 10000 ciclos a deformação teve uma tendência a se estabilizar, sendo observada uma pequena variação do afundamento em função do incremento do número de ciclos.

Ao longo de todo o ensaio não foi observado nenhuma desagregação do material ou trinca devido aos ciclos de passagens de carregamento.

Assim como nas placas de TSD ensaiadas, os ensaios de macrotextura e microtextura foram realizados antes e depois da aplicação dos ciclos. O ensaio de Pêndulo Britânico realizado antes da aplicação dos ciclos pelo pneumático resultou em um valor médio para o VRD de 90, classificando-o como uma superfície muito rugosa. O ensaio realizado após os 10000 ciclos de carregamento resultou em um VRD médio de 61, classificando-o como uma superfície rugosa. A Figura 4.36 ilustra a realização do ensaio nas placas de CAPE SEAL-AM.

Figura 4.36 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de CAPE SEAL-AM



a) Ensaio com 0 ciclo

b) Ensaio com 10000 ciclos

Fonte: Autor (2013).

Pelos valores de VRD encontrados verifica-se que a aplicação dos ciclos pelo simulador de tráfego acarreta, como esperado, uma diminuição do valor da rugosidade do revestimento em relação ao TSD-AM. A especificação de serviço DNIT 031/2006-ES recomenda que o valor de VRD seja igual ou maior que 45, logo, conclui-se que mesmo após os 10000 ciclos de carregamento, o CAPE SEAL-AM ainda apresentava rugosidade adequada. Acredita-se que a redução do valor do VRD esteja relacionada à formação da trilha de roda e polimento sofrido pelo pavimento com a passagem do pneumático.

A avaliação da macrotextura realizada através do ensaio de mancha de areia antes da aplicação dos ciclos resultou em um valor médio para o HS de 0,58, indicando uma macrotextura de classe média. O valor de mancha de areia depois dos 10000 ciclos de

passagens do pneumático foi realizada com dificuldade devido às dimensões da placa. A mancha de areia ultrapassou o limite das placas indicando dessa forma uma diminuição da altura da mancha e conseqüentemente uma diminuição da macrotextura. A Figura 4.37 ilustra o ensaio sendo executado.

Figura 4.37 - Ensaio de mancha de areia nas placas de CAPE SEAL-AM



c) Ensaio com 0 ciclo

d) Ensaio com 10000 ciclos

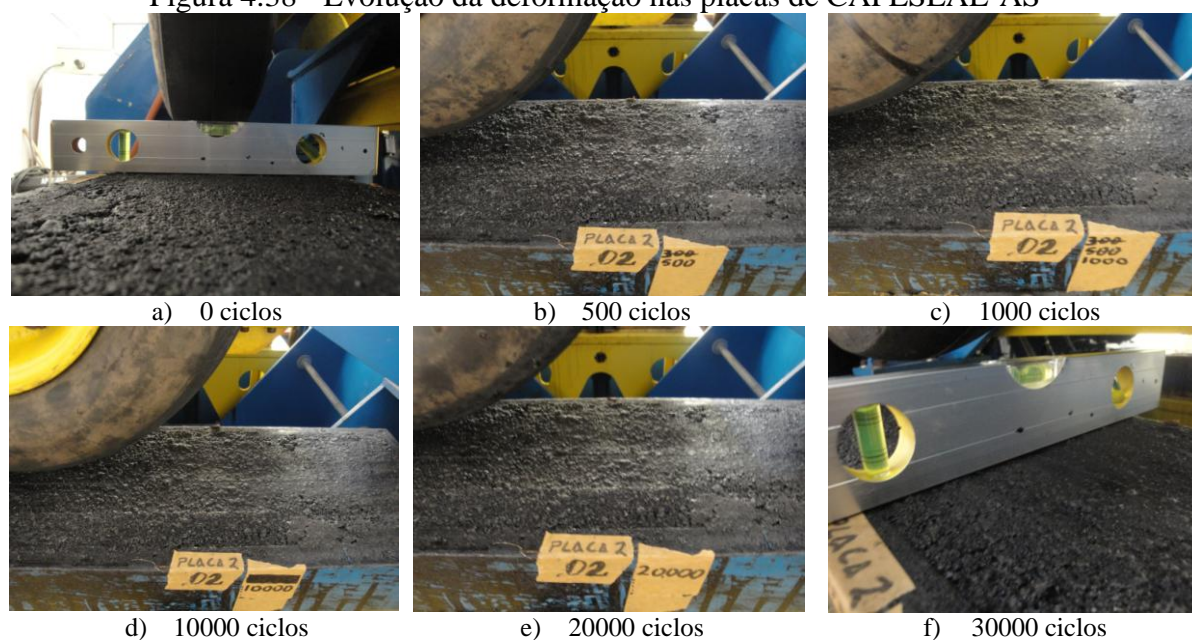
Fonte: Autor (2013).

4.5.3.2 Resultados das placas de CAPE SEAL-AS

As placas de CAPE SEAL-AS foram submetidas aos diversos ciclos de carregamento do pneumático, sendo avaliado nos seguintes pontos de parada: 100, 500, 1000, 10000, 20000 e 30000 ciclos. Para o CAPE SEAL-AS, decidiu-se prolongar o número de ciclos aplicado no revestimento (20000 e 30000) devido ao bom aspecto visual do mesmo com 10000 ciclos, analisando assim o agregado siderúrgico para carregamentos maiores.

Para cada ponto de parada foi realizada a leitura do afundamento conforme a norma francesa NF P98-253-1. A Figura 4.38 ilustra visualmente as placas ensaiadas para diversos ciclos.

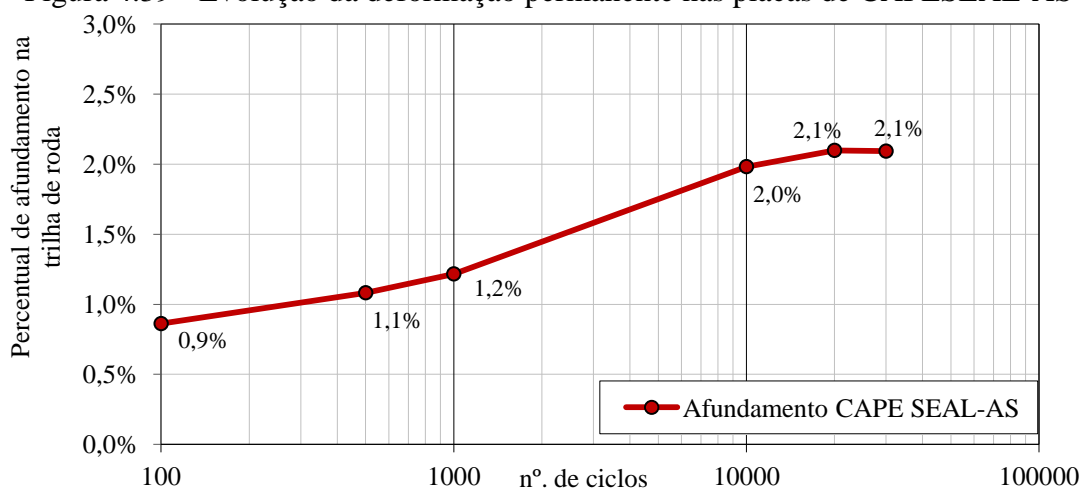
Figura 4.38 - Evolução da deformação nas placas de CAPESEAL-AS



Fonte: Autor (2013).

Quanto ao aspecto visual, o afundamento na trilha de roda não foi muito perceptível o que foi constatado pela leitura das deformações. A Figura 4.39 ilustra a evolução da deformação medida em função dos ciclos de passagens do simulador.

Figura 4.39 - Evolução da deformação permanente nas placas de CAPESEAL-AS



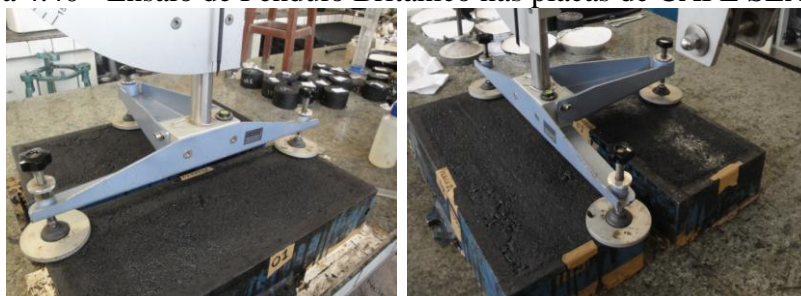
Fonte: Autor (2013).

Conforme observado na Figura 4.39, a evolução do afundamento do CAPE SEAL-AS deu-se de forma gradual ao longo do aumento do número de ciclos. Observa-se que a deformação máxima de 2,1% ocorreu aos 20000 ciclos de carregamento e se manteve constante até os 30000 ciclos, indicando uma tendência de estabilização dos valores de deformação.

Ao longo de todo o ensaio não foi observado nenhuma desagregação do material ou trinca devido aos ciclos de passagens.

A avaliação da textura do revestimento CAPE SEAL-AS foi realizada antes e depois do ensaio com o simulador de tráfego. Os ensaios de microtextura realizados pelo Pêndulo Britânico resultaram em valores médios de VRD de 79 e 65, classificando o revestimento como de superfície muito rugosa e rugosa, respectivamente. A Figura 4.40 ilustra a realização do ensaio.

Figura 4.40 - Ensaio de Pêndulo Britânico nas placas de CAPE SEAL-AS



c) Ensaio com 0 ciclo

d) Ensaio com 30000 ciclos

Fonte: Autor (2013).

Através do resultado do VRD, observa-se que a aplicação dos ciclos pelo pneumático resultou em uma redução da microtextura do revestimento CAPE SEAL-AS. Entretanto, o valor encontrado atende com segurança às especificações técnicas quanto aos valores mínimos de microtextura.

Realizou-se também o ensaio de macrotextura através da medição da mancha de areia. Os valores médios para o HS calculados antes e depois da aplicação de cargas pelo pneumático foram de 0,68 e 0,57, respectivamente, indicando uma macrotextura de classe média em ambas as medições. A Figura 4.41 ilustra o ensaio executado.

Figura 4.41 - Ensaio de mancha de areia nas placas de CAPE SEAL-AS



e) Ensaio com 0 ciclo

f) Ensaio com 30000 ciclos

Fonte: Autor (2013).

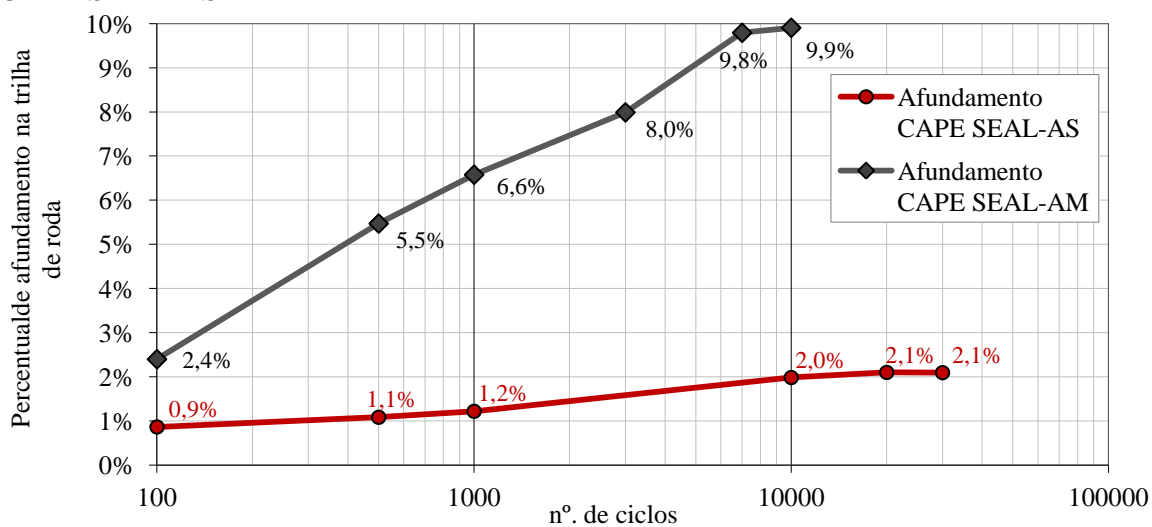
4.5.3.3 Resumo comparativo dos resultados do CAPE SEAL-AM e do CAPE SEAL-AS

A comparação dos resultados obtidos para o CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS visou avaliar a utilização e comportamento de um agregado alternativo (agregado siderúrgico), em relação ao um agregado de referência (agregado mineral).

Observou-se nos aspectos relacionados ao desgaste que as placas de CAPE SEAL-AS, quando submetidas ao mesmo esforço de carregamento aplicado pelo pneumático, apresentaram visualmente um desgaste menor do que as placas de CAPE SEAL-AM.

O *cape seal* com agregado siderúrgico apresentou um aspecto mais rígido do que o *cape seal* com agregado mineral, o que influenciou diretamente no valor de deformação medida ao longo do ensaio. A Figura 4.42 ilustra a evolução da deformação permanente medida em função do número de ciclos para ambos os revestimentos.

Figura 4.42 - Evolução da deformação permanente nas placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS



Fonte: Autor (2013).

Conforme se verifica na Figura 4.42, a evolução da deformação medida no CAPE SEAL-AM se desenvolve a uma taxa maior do que o afundamento sofrido pelo CAPE SEAL-AS. Analisando os percentuais de afundamento para os diversos ciclos, observa-se que o afundamento na deformação na trilha de roda no *cape seal* com agregado mineral é várias vezes superior a constatada com agregado siderúrgico.

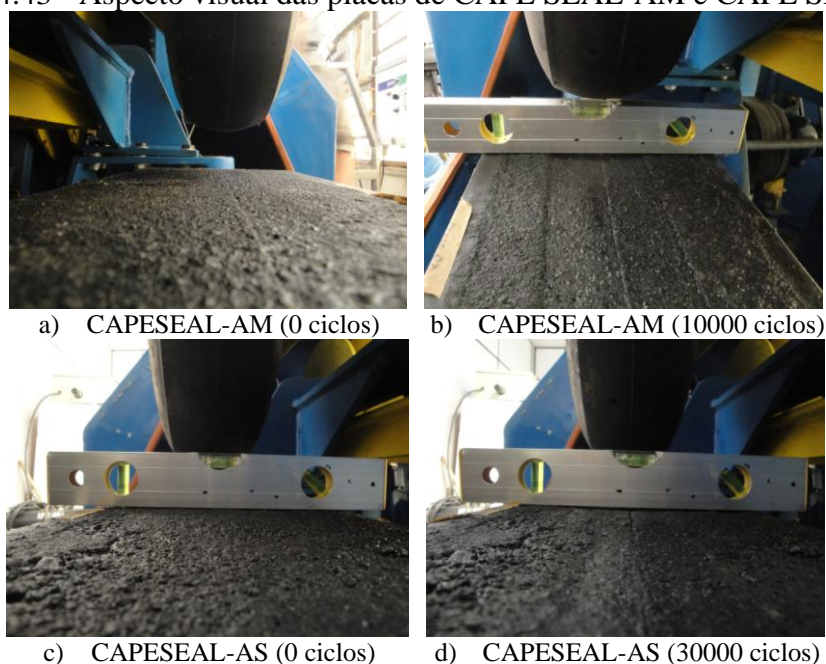
Os carregamentos de 20000 e 30000 ciclos não foram aplicados ao CAPE SEAL-AM por se considerar que valores de carregamento maiores poderiam comprometer a análise da macro e microtextura do revestimento após o ensaio. Aliado a isso,

observou-se uma tendência no *cape seal* com agregado mineral a uma estabilização do valor de afundamento, tendo em vista a mínima variação no gráfico para o intervalo de 7000 e 10000 ciclos.

Quanto ao agregado siderúrgico, decidiu-se realizar o ensaio até os 30000 ciclos de passagem devido ao bom aspecto visual apresentado pelo revestimento, ao longo da realização dos testes com o simulador de laboratório. A evolução da deformação para o agregado siderúrgico mostra que entre 10000 e 30000 ciclos, o afundamento foi mínimo, ressaltando que os baixos valores de deformação que o CAPE SEAL-AS apresentou tenderam a se estabilizar após os 10000 ciclos.

O aspecto visual das placas antes e depois da aplicação do simulador de tráfego pode ser observado na Figura 4.43.

Figura 4.43 - Aspecto visual das placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS



Fonte: Autor (2013).

Através da Figura 4.43 pode-se comparar visualmente a maior deformação sofrida pela placa com agregado mineral em relação ao agregado siderúrgico. Acredita-se que a maior capacidade de suporte à deformação do CAPE SEAL-AS seja devido a cubicidade e porosidade do agregado siderúrgico que associado à emulsão asfáltica resultaria em um maior travamento da mistura.

Os resultados observados no ensaio das placas atestam as conclusões do segundo procedimento experimental, onde se verificou um maior desgaste do microrrevestimento asfáltico confeccionado com agregado mineral em comparação ao siderúrgico. Apesar da

forma de aplicação de esforços serem diferentes, no ensaio de WTAT e simulador de tráfego, o microrrevestimento com AS mostrou menor desgaste.

A avaliação comparativa de comportamento dos revestimentos quanto à macro e microtextura das placas estão apresentadas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS

MICROTEXTURA				
Placas	VRD		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
CAPESEAL-AM	90	61	Muito rugosa	Rugosa
CAPESEAL-AS	76	65	Muito rugosa	Rugosa
MACROTEXTURA				
Placas	HS (mm)		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
CAPESEAL-AM	0,58	0,51	Média	Média
CAPESEAL-AS	0,68	0,57	Média	Média

Fonte: Autor (2013).

Na Tabela 4.16 verifica-se que ambos os revestimentos testados apresentaram um valor de VRD maior do que o mínimo recomendado pelas especificações do DNIT. O resultado apresentado ressalta o aspecto rugoso do revestimento *cape seal*, independentemente do agregado utilizado e mesmo após os diferentes ciclos aplicados.

Quanto à microtextura, a especificação técnica DNIT 031/2006-ES, recomenda para pavimentos asfálticos que os valores de HS devam estar entre 0,6 e 1,2 de forma a classificar o revestimento com textura entre média, grosseira ou aberta. Os valores observados para as placas indicam que independente do agregado utilizado, a macrotextura do *cape seal* não foi severamente afetada pela passagem do pneumático nos diferentes ciclos.

Outro aspecto observado na avaliação da microtextura feita com o Pêndulo Britânico foi quanto à permeabilidade do *cape seal*. A água espalhada previamente a realização do ensaio, apresentou uma maior dificuldade de penetração no revestimento CAPE SEAL-AS do que no CAPE SEAL-AM.

4.5.4 Avaliação comparativa dos revestimentos TSD-AM e CAPE SEAL-AM

A avaliação comparativa dos resultados obtidos pelo simulador de tráfego para as placas de TSD-AM e CAPE SEAL-AM teve como objetivo avaliar através de parâmetros

técnicos as características desses diferentes tipos de revestimentos quando submetidos aos mesmos esforços e confeccionados com os mesmos materiais.

Aliado a isso, destaca-se como objetivo deste trabalho a investigação de soluções alternativas como o *cape seal*, por apresentar rendimento semelhante ao TSD e que possam ser consideradas como alternativas técnicas para a pavimentação local.

Analisando o aspecto visual dos revestimentos TSD-AM e CAPE SEAL-AM, verifica-se que o tratamento superficial duplo com agregado mineral apresenta-se visualmente mais irregular do que o *cape seal* confeccionado com o mesmo agregado. Esse aspecto é esperado tendo em vista as características individuais do TSD e do MRAF (constituente da 2ª camada do *cape seal*).

Quando avaliados através dos ensaios de macro e microtextura, o TSD-AM e o CAPE SEAL-AM apresentaram os resultados listados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de TSD-AM e CAPESEAL-AM

MICROTEXTURA				
Placas	VRD		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
TSD-AM	79	70	Muito rugosa	Rugosa
CAPESEAL-AM	90	61	Muito rugosa	Rugosa
MACROTEXTURA				
Placas	HS (mm)		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
TSD-AM	4,68	2,82	Muito grosseira ou muito aberta	Muito grosseira ou muito aberta
CAPESEAL-AM	0,58	0,51	Média	Média

Fonte: Autor (2013).

Na Tabela 4.17, verifica-se que ambos os revestimentos apresentam uma redução das características de textura após a aplicação dos ciclos de passagem pelo pneumático. Entretanto, os valores observados estão de acordo com os parâmetros especificados pelo DNIT para pavimentos asfálticos.

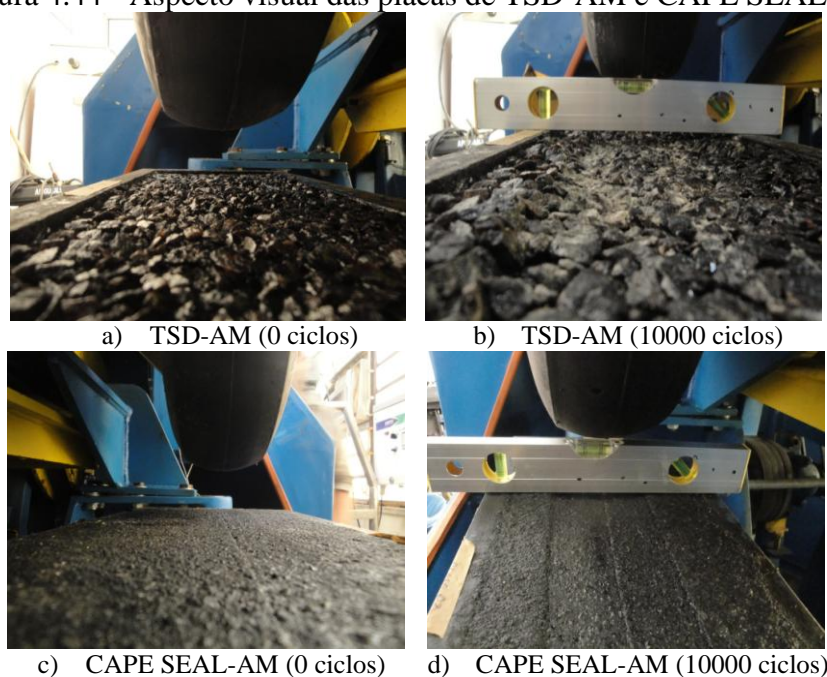
O CAPE SEAL-AM apresentou antes da passagem do simulador maior rugosidade inicial do que o TSD-AM. Esse comportamento ocorreu provavelmente devido a granulometria mais fechada do revestimento *cape seal*, favorecendo um maior contanto pneu pavimento. Após a aplicação de 10000 ciclos pelo simulador, o resultado obtido é menor do que o observado no TSD-AM, porém dentro dos parâmetros técnicos.

A avaliação da macrotextura retrata através da mancha de areia a grande diferença entre os dois tipos de revestimentos. Os valores obtidos para o CAPE SEAL-AM apresentaram-se dentro dos limites especificados pelo DNIT. Já os valores do TSD-AM foram maiores, indicando a existência de uma superfície muito grosseira ou aberta. Por outro lado, esses resultados do TSD-AM indicam um maior nível de ruído e desgaste dos pneus em comparação ao CAPE SEAL-AM.

Na avaliação do desgaste e deformação sofrida pelos revestimentos, verificou-se que o TSD-AM apresentou um nível maior de desgaste ao longo da aplicação dos ciclos. A aplicação dos 10000 ciclos de passagens do pneumático resultou em um revestimento com aspecto mais desgastado do que o CAPE SEAL-AM, devido ao arrancamento e acomodação dos agregados, enquanto no CAPE SEAL-AM ocorreu apenas uma deformação devido à trilha de roda.

A Figura 4.44 ilustra o aspecto visual das placas de TSD-AM e CAPE SEAL-AM no início e término do ensaio.

Figura 4.44 - Aspecto visual das placas de TSD-AM e CAPE SEAL-AM



Fonte: Autor (2013).

4.5.5 Avaliação comparativa dos revestimentos TSD-AS e CAPE SEAL-AS

A comparação do CAPE SEAL-AS em relação ao TSD-AS resultou, de maneira geral, nas mesmas conclusões obtidas com os mesmos revestimentos confeccionados com

agregado mineral. O revestimento *cape seal* com agregado siderúrgico apresentou melhores características quando submetido aos ciclos de passagens do pneumático do que o tratamento superficial duplo com o mesmo agregado.

Através da análise visual de desgaste do TSD-AS, constatou-se um bom comportamento do revestimento. Para os 20000 ciclos de passagens do pneumático, a deformação verificada foi considerada pequena, assim como a desagregação do material, com exceção do valor obtido aos 1000 ciclos que provavelmente seria um comportamento atípico durante o ensaio.

Para o CAPE SEAL-AS, o ensaio de simulação foi possível de ser realizado até os 30000 ciclos de passagens do pneumático, constatando-se um bom comportamento do revestimento quanto a capacidade de absorção da carga aplicada, sendo observada uma mínima deformação. O ensaio foi encerrado devido às leituras de deformação do revestimento praticamente estabilizarem a partir dos 10000 ciclos de passagens.

A avaliação comparativa dos revestimentos quanto à textura pode ser visualizada na Tabela 4.18. Ressalta-se que os pontos de parada finais do TSD-AS e CAPESEAL-AS ocorreram com 20000 e 30000 ciclos, respectivamente.

Tabela 4.18 - Resumo dos ensaios de textura realizados nas placas de TSD-AS e CAPE SEAL-AS

MICROTEXTURA				
Placas	VRD		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
TSD-AS	65	89	Rugosa	Muito rugosa
CAPE SEAL-AS	79	65	Muito rugosa	Rugosa
MACROTEXTURA				
Placas	HS (mm)		Classificação	
	Antes	Depois	Antes	Depois
TSD-AS	7,25	4,54	Muito grosseira ou muito aberta	Muito grosseira ou muito aberta
CAPE SEAL-AS	0,68	0,57	Média	Média

Fonte: Autor (2013).

Observa-se na Tabela 4.18 que os resultados obtidos, quanto à macro e microtextura de ambos os revestimentos, apresentam-se adequados às especificações técnicas do DNIT.

Na avaliação da microtextura, o TSD-AS apresentou maior rugosidade após os ciclos de passagens do pneumático, comportamento justificado pela irregularidade devido ao arrancamento de alguns agregados da 2ª camada do revestimento. No CAPE SEAL-AS a

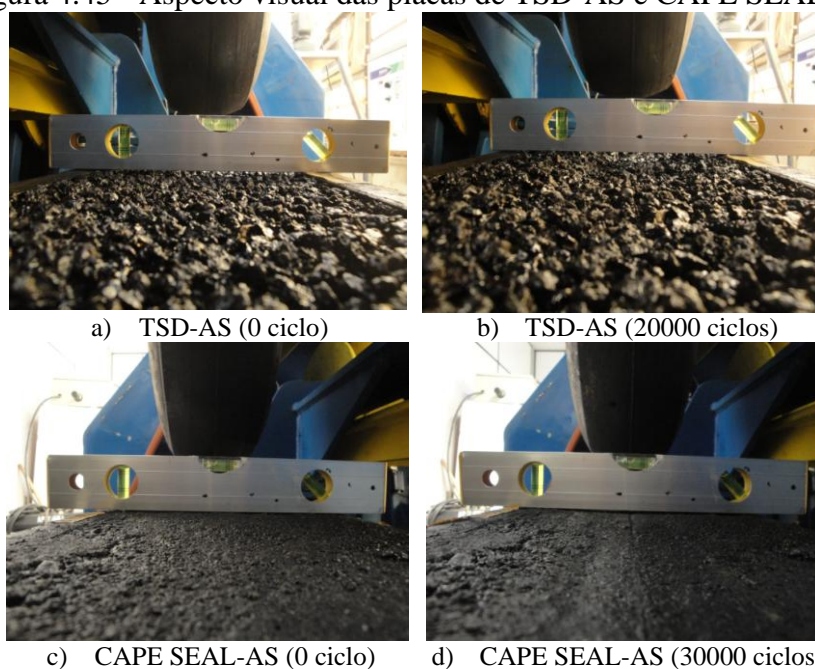
redução da rugosidade deve-se provavelmente a deformação e polimento do revestimento devido ao efeito cíclico da carga aplicada.

Quanto à avaliação da macrotextura, não se verificou alterações significativas na altura da mancha de areia do CAPESEAL-AS.

Para o TSD-AS, o valor da macrotextura obtido com o ensaio de mancha de areia teve uma redução significativa, passando de 7,25 para 4,54. No entanto, acredita-se que em comparação ao CAPE SEAL-AS, o TSD-AS devido à boa capacidade de resistência à abrasão do agregado siderúrgico, pode resultar em revestimentos mais duráveis do que o TSD com agregado mineral, assim como provocar um maior desgaste de pneus e aumento de ruído quando comparado ao *cape seal* com agregado mineral.

A Figura 4.45 ilustra o aspecto visual das placas de TSD-AS e CAPE SEAL-AS no início e no término do ensaio.

Figura 4.45 - Aspecto visual das placas de TSD-AS e CAPE SEAL-AS



Fonte: Autor (2013).

4.6 Levantamento dos custos de aplicação do TSD e CAPE SEAL para o agregado mineral e siderúrgico

Apresenta-se neste item uma estimativa de custos envolvidos na construção de um revestimento TSD e *cape seal*. Ambos os revestimentos foram construídos integralmente com os agregados mineral e siderúrgico utilizados na presente pesquisa. O cálculo estimado em

R\$/km foi realizado tomando como base uma plataforma de 7m de largura para uma extensão de 1km de rodovia e uma espessura do TSD e *cape seal* (TSS + MRAF) de 2cm.

As taxas de agregados e ligantes utilizadas nas composições dos revestimentos foram as mesmas determinadas no quarto procedimento experimental quanto à confecção das placas de TSD e *cape seal*. Na composição dos custos de aplicação, utilizou-se a tabela de custos da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE) do ano de 2013. Adotou-se o preço de R\$ 49,97/m³, para o agregado mineral utilizado no TSS e TSD, e o preço de R\$ 48,00/m³ para o agregado mineral utilizado no MRAF. Para o agregado siderúrgico, como o mesmo não consta na tabela da SEINFRA-CE, adotou-se o valor fornecido pelo fabricante de R\$ 5,67/m³ para a granulometria corrida.

Os preços dos ligantes utilizados na confecção dos revestimentos foram obtidos através de pesquisa de mercado, resultando para emulsão RR2C (TSS e TSD) um valor médio de R\$ 1.050,00/ton e para a emulsão RC1C-E (MRAF) um valor médio de R\$ 1.450,00/ton. Para o aditivo o preço observado foi de R\$ 2,50/kg.

Reforça-se que durante a composição do custo/m² do TSS, TSD e MRAF, foram utilizados os coeficientes quanto aos equipamentos e mão de obra contidos na tabela da SEINFRA-CE. No entanto, os coeficientes, quanto à estimativa do consumo em metro cúbico (m³) dos agregados para a construção de 1m² de revestimento, foram alterados em função das taxas de agregado utilizadas na presente pesquisa, não adotando-se assim os valores estimados pela SEINFRA-CE.

Ressalta-se que na composição adotada não estão incluídas as Bonificações e Despesas Indiretas (BDI) e as Distâncias Médias de Transportes (DMT). O comparativo de custo para a construção do TSD e *cape seal* pode ser observado na Tabela 4.19 para ambos agregados testados.

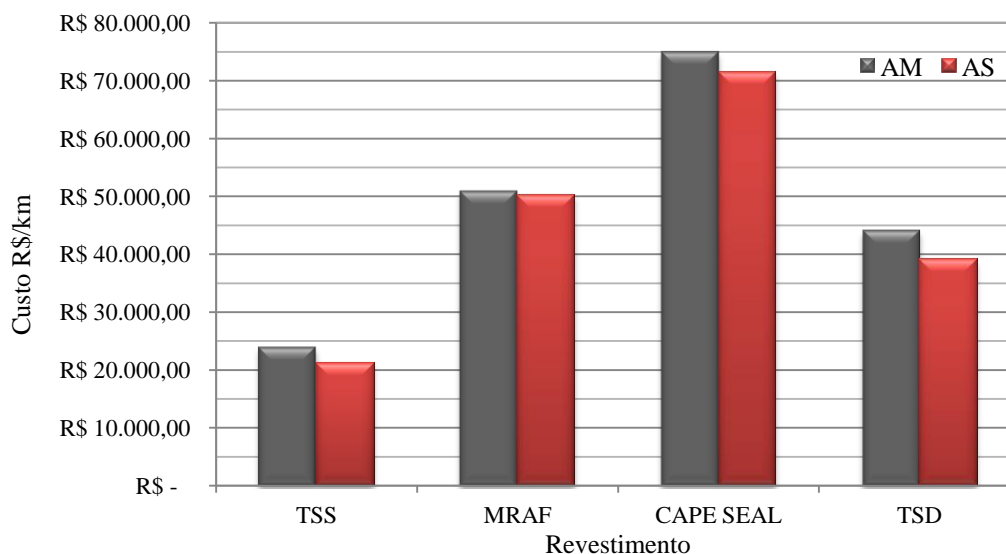
Tabela 4.19 - Comparativo de custos do TSD e *cape seal* para os diferentes agregados

Taxa / Custo	Agregado Mineral			Agregado Siderúrgico			AM	AS
	TSS	MRAF	TSD	TSS	MRAF	TSD	<i>Cape Seal</i>	<i>Cape Seal</i>
Tx. de agreg. (kg/m ²)	14,39	25,00	22,58	18,58	33,00	28,45	-	-
Teor de Lig. ou Tx. de Lig.	1,75 (L/m ²)	11,70 (%)	2,61 (L/m ²)	1,99 (L/m ²)	10,80 (%)	2,88 (L/m ²)	-	-
Teor de aditivo (%)	0	0,5	0	0	0	0	0,5	-
Custo do Lig. (R\$/m ²)	R\$ 1,84	R\$ 4,24	R\$ 2,74	R\$ 2,09	R\$ 5,17	R\$ 3,02	R\$ 6,08	R\$ 7,26
Custo do Aditivo (R\$/m ²)	R\$ 0,00	R\$ 0,31	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,31	R\$ 0,00
Custo do Equip. + M.O + Agreg. (R\$/m ²)	R\$ 1,59	R\$ 2,72	R\$ 3,57	R\$ 0,94	R\$ 2,00	R\$ 2,55	R\$ 4,31	R\$ 2,94
Custo Final (R\$/m ²)	R\$ 3,43	R\$ 7,27	R\$ 6,31	R\$ 3,03	R\$ 7,17	R\$ 5,57	R\$ 10,70	R\$ 10,20
Custo Final (R\$/km)	R\$ 23.994,12	R\$ 50.916,25	R\$ 44.149,54	R\$ 21.190,35	R\$ 50.203,53	R\$ 39.002,52	R\$ 74.910,37	R\$ 71.393,89

Fonte: Autor (2013).

De maneira geral, verifica-se conforme a Tabela 4.19, que quando se compara o custo final dos trechos calculados com agregado mineral em comparação ao agregado siderúrgico, independente do revestimento e analisando cada um individualmente, esses últimos apresentam custos menores. Entretanto, ressalta-se que essa afirmação só é válida diante da dosagem apresentada e para os agregados utilizados. A Figura 4.46 ilustra graficamente o comparativo de custos para melhor visualização dos dados da Tabela 4.19.

Figura 4.46 - Comparativo de custos dos revestimentos moldados com AM e AS



Fonte: Autor (2013).

Analisando pontualmente os revestimentos TSS e TSD para ambos os agregados, verifica-se que apesar dos revestimentos construídos com AS apresentarem uma maior taxa de agregado e ligante, o valor final do custo/km em comparação ao AM é menor devido ao reduzido preço do m³ do AS (R\$ 5,67/m³) em comparação ao do AM (R\$ 49,97/m³). Constata-se, assim, que do ponto de vista econômico, a utilização do AS é favorecida para valores baixos do m³ de agregado siderúrgico em relação ao preço do agregado mineral.

Comparando-se o custo/km para o MRAF produzido para os dois agregados, verifica-se que o MRAF-AS apresenta um custo de 1,3% menor do que o MRAF-AM, logo, não se observa uma grande diferença de custos quando se utiliza o agregado siderúrgico em substituição ao mineral. Aparentemente, o preço menor do m³ do AS é um fator menos relevante no quantitativo do preço final do que o teor de ligante e aditivo, devido ao preço elevado da emulsão (RC1C-E).

A utilização de aditivo pelo MRAF-AM faz com que o custo final em R\$/km produzido seja superior ao do MRAF-AS. Observando-se assim, que do ponto de vista de custos, a não utilização do aditivo pelo AM acarretaria em um custo/km de aproximadamente 3% menor do MRAF-AM em comparação ao MRAF-AS. Entretanto, trabalhos como o de Castro (2011) envolvendo agregados locais destacou a necessidade do aditivo para a correta aplicação do MRAF em campo, havendo agregados cuja utilização de aditivos se faz obrigatória devido as suas características. Logo, sem analisar o aspecto técnico do MRAF-AS apresentar resultados melhores do que o MRAF-AM, do ponto de vista econômico, a utilização do aditivo pode ser contabilizada como um pré-requisito para os agregados minerais da região.

O fator que favoreceu o aumento do custo do MRAF-AS está relacionado ao uso de uma taxa de agregado por m² maior do que a verificada para o MRAF-AM. Assim, como o teor de emulsão é feito com base no peso dos agregados, verifica-se que no caso do AS, mesmo apresentando aspectos favoráveis como um baixo valor do m³ do agregado e a ausência do uso de aditivos, o custo final tende a ser semelhante ao do MRAF-AM, devido a maior taxa de ligante por metro quadrado do MRAF-AS (3,56L/m²) em comparação ao MRAF-AM (2,93L/m²).

De acordo com o que foi comentado e observando-se a Tabela 4.19, verifica-se que alguns fatores como, o preço da emulsão utilizada no MRAF (RC1C-E) e o teor de aditivo influenciam o custo final do revestimento *cape seal*. Assim, em termos de custos, a construção do CAPE SEAL-AS resultaria em uma economia em torno de 5% de acordo com a condição apresentada para o CAPE SEAL-AM (utilização de até 0,5% de

aditivo). Caso não fosse utilizado nenhum aditivo no CAPE SEAL-AM, a vantagem econômica do CAPE SEAL-AS em termos de custos reduziria para 1,8%.

Investigando a utilização do *cape seal* comparativamente ao uso do TSD, verifica-se que a adoção do CAPE SEAL-AS em relação ao custo do TSD-AS resulta em um custo final cerca de 80% maior. Quando se compara o CAPE SEAL-AM com o TSD-AM, esse valor é reduzido para 70%. Dessa forma, percebe-se que a decisão da utilização do *cape seal* em substituição ao TSD deve ser observada também em função de critérios técnicos, da durabilidade e da qualidade/finalidade que se espera da rodovia.

Outros fatores podem ser levantados também visando favorecer a redução do custo final do revestimento *cape seal* testado. Como na metodologia não se verificou um controle da taxa em m² de MRAF aplicado sobre o TSS, mas sim, o controle da mesma altura para ambas as placas de *cape seal* e TSD confeccionadas, a taxa de MRAF aplicada para ambos os agregados na fabricação do *cape seal* resultou em um valor correspondente a aplicação em duas camadas (TSS + 2 camadas de MRAF). Calculando o custo/km do *cape seal*, adotando o custo de 1 camada de MRAF igual a metade do custo das 2 camadas, anteriormente calculado, o valor do CAPE SEAL-AS seria de R\$ 46.292,12/km, enquanto o CAPE SEAL-AM seria R\$ 49.452,24/km, valores assim, economicamente mais competitivos em comparação ao TSD-AS (R\$ 39.002,52/km) e TSD-AM (R\$ 44.149,54/km).

Logo, verifica-se que assim como os aspectos técnicos anteriormente apresentados, o aspecto econômico tem função fundamental na tomada de decisão sobre a adoção da melhor técnica na construção de um revestimento asfáltico. Constata-se, diante da resposta do *cape seal* quanto aos ensaios realizados pelo simulador de tráfego, que a utilização do mesmo pode ser pensada como um revestimento com aspecto mais rígido e melhor adaptado a absorção das cargas do que o TSD, como verificou-se no simulador de tráfego. Assim, a utilização do revestimento *cape seal* e TSD não seria indicada para o mesmo tipo de tráfego.

Vale salientar que todas as observações constatadas nesta análise referem-se às taxas e parâmetros definidos na presente pesquisa, devendo-se observar com cuidado a extrapolação desses resultados para outros estudos.

4.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos quatro procedimentos experimentais desenvolvidos na metodologia da presente pesquisa.

Inicialmente, os materiais envolvidos na pesquisa foram caracterizados. Posteriormente, realizou-se o procedimento de dosagem do TSD e do MRAF visando a definição de taxas de agregados e ligantes a serem aplicadas na moldagem dos corpos de prova dos revestimentos. As taxas calculadas foram verificadas no terceiro procedimental experimental e com os resultados obtidos, moldaram-se as placas que foram ensaiadas no quarto procedimental experimental. Finalmente, realizou-se uma análise quanto ao custo envolvido na construção dos revestimentos estudados em laboratório.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e possíveis sugestões para futuras pesquisas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Resumo das principais conclusões da pesquisa

O presente capítulo tem como objetivo apresentar as principais conclusões obtidas ao longo da pesquisa, bem como as sugestões que possam servir de inspiração para condução de trabalhos futuros relacionados ao assunto.

Ressalta-se que todas as observações constatadas na presente análise referem-se às taxas, materiais e parâmetros definidos nesta pesquisa. Logo, as conclusões apresentadas devem ser observadas com cuidado diante de comparativo ou extrapolação para outros estudos.

De maneira sucinta, pode-se destacar que o agregado siderúrgico, como material a ser utilizado em revestimentos esbeltos atende com segurança aos parâmetros recomendados pelas especificações técnicas, apresentando muitas vezes resultados melhores do que o agregado mineral.

Durante a realização dos procedimentos experimentais executados ao longo da pesquisa, verificou-se que a metodologia concebida no presente trabalho pode ser pensada como um parâmetro de avaliação da qualidade de revestimentos do tipo TSD e *cape seal*.

Na avaliação do TSD através do simulador de tráfego, quanto aos parâmetros de desgaste e desagregação observados para ambos os agregados testados, verificou-se que para o mesmo nível de carregamento (10000 ciclos), a desagregação do TSD-AS foi menor do que o TSD-AM, divergindo do observado no ensaio de desempenho pelo WTAT. Logo, observando a forma como os esforços são aplicados nos diferentes ensaios, acredita-se que a utilização do simulador de tráfego possa ser considerada mais aconselhável e tende a retratar melhor a realidade do campo. Ressalta-se que tal afirmação não inviabiliza a utilização do WTAT como estimativa inicial dos desgastes. Para o caso do *cape seal*, a avaliação quanto ao desgaste da camada superficial de MRAF pelo simulador de tráfego foi coerente com os valores observados na avaliação de desempenho pelo WTAT, constatando-se um melhor desempenho para os revestimentos confeccionados com agregado siderúrgico.

Conclui-se, diante do programa experimental executado em comparação ao TSD, e com base nos parâmetros técnicos e econômicos obtidos, que o *cape seal* é mais indicado para rodovias que necessitem de um revestimento de melhor qualidade de rolamento, maior absorção de cargas e menor desgaste. No entanto, quanto ao aspecto dos custos, a aplicação

do mesmo deve ser analisada cuidadosamente em função da disponibilidade de recursos e análise da melhor relação custo/benefício.

5.2 Detalhamento das principais conclusões e/ou constatações

5.2.1 Quanto aos ensaios de caracterização dos agregados - Primeiro procedimento experimental

Na avaliação dos agregados utilizados, realizou-se uma série de ensaios visando à obtenção de parâmetros exigidos pelas normas técnicas para liberação desses materiais para fins de pavimentação. De maneira geral, observou-se que a Brita ¾”, Brita 3/8” e o Pó de pedra estudados, apresentaram resultados satisfatórios quanto à sua utilização em pavimentos rodoviários. Quanto ao agregado siderúrgico, verificou-se que o mesmo apresentou condições adequadas de utilização para os revestimentos testados, constatando-se muitas vezes resultados melhores do que os apresentados pelo agregado mineral tradicional.

Analisando o índice de forma dos agregados, verificou-se que independente da graduação analisada, o agregado siderúrgico apresentou comportamento cúbico. O mesmo se verificou para os agregados minerais, porém, com aspecto menos cúbico.

Os valores dos ensaios de Abrasão Los Angeles indicaram menores valores de desgaste para o agregado siderúrgico em comparação ao agregado mineral. Para todas as graduações do AS testadas, verificou-se valores menores do que o limite máximo requerido pelo DNIT de 25%.

Investigando a absorção e a densidade dos agregados, verificaram-se maiores valores de densidade aparente, densidade real e absorção para o agregado siderúrgico em comparação ao agregado mineral, independente da granulometria testada. O maior valor de absorção do agregado siderúrgico foi considerado esperado, tendo em vista o aspecto poroso do material, entretanto, o mesmo se enquadrou nos limites recomendados pelo DNIT (entre 1 e 2%).

A avaliação da qualidade dos agregados miúdos, pela presença de argila e/ou silte, através do ensaio de equivalente de areia resultaram, em valores de 89 e 83% para o AM e AS, respectivamente. Os resultados ficaram acima do limite mínimo de 60% recomendado pela especificação do DNIT, reforçando o uso dos materiais para utilização em misturas do tipo MRAF.

Os resultados do ensaio de azul de metileno para os agregados mineral e siderúrgico apresentaram valores de 2,5 e 2,0mg/g para o AM e AS, respectivamente, estando dentro dos parâmetros recomendados pelas especificações técnicas vigentes. A avaliação preliminar desse parâmetro é importante devido influenciar na possibilidade do uso de aditivo que pode acarretar em maiores custos para as misturas de MRAF.

A avaliação dos agregados quanto ao ensaio de durabilidade resultou em valores abaixo do máximo especificado pela norma para os diferentes agregados testados. Observou-se também, que o ensaio realizado com os finos do agregado mineral apresentou um maior desgaste (4,75%), enquanto para o agregado siderúrgico, o valor verificado foi de 2,35%. Os valores encontrados podem sinalizar uma maior tendência ao desgaste dos finos do agregado mineral quando sujeito às intempéries.

Na avaliação da adesividade do ligante aos agregados testados, aspecto de grande importância na construção do TSD, verificou-se que para as granulometrias testadas a adesividade foi considerada satisfatória, tendo o agregado mineral uma maior cobertura do que o agregado siderúrgico para a mesma quantidade de emulsão utilizada. Acredita-se que tal comportamento deva-se a maior porosidade do AS, requerendo assim uma maior taxa de ligante.

Ao avaliar a expansão do agregado siderúrgico, observou-se, após uma série de tentativas de determinação da curva de compactação, que a umidade ótima do AS coletado foi de 3%. Quanto ao potencial expansivo, constatou-se que para um período de cura de 8 meses o AS apresentou uma expansão de 0,02%, muito abaixo do limite máximo delimitado pelas especificações técnicas e para 14 meses de cura, não foi verificada nenhuma expansão.

Quanto à caracterização dos ligantes (emulsões RR2C e RC1C-E), constatou-se o seu enquadramento em todos os requisitos exigidos pelas especificações técnicas de TSD e MRAF.

5.2.2 Quanto ao processo de dosagem do TSD e MRAF em laboratório - Segundo procedimento experimental

Verificou-se no procedimento de dosagem do TSD que, para os agregados ensaiados, o cálculo realizado através do método da bandeja apresentou taxas de agregado maiores (10,5% para o AM e de 21,7% para o AS) do que os valores recomendados pelo DER/CE. Analisando as camadas individualmente, observaram-se na 1ª camada taxas maiores do que as recomendadas pelo DER/CE e na 2ª camada as taxas encontradas pelo método da

bandeja foram ligeiramente menores. A aplicação de taxas maiores, para o caso do AS, deve-se a maior densidade do material e pela forma cúbica do mesmo interferir na organização dos agregados na bandeja. Ressalta-se que a utilização do método da bandeja deve ser observada com cuidado, tendo em vista o aspecto subjetivo relacionado à utilização do critério visual do operador ser o fator determinante na disposição dos agregados.

Os valores calculados para fins de dosagem em L/m^2 , seguindo as equações recomendadas pelo DER/CE em função da taxa de agregado em kg/m^2 calculada pelo método da bandeja, resultaram em um aumento no consumo de RR2C de 10,5% para o caso do AM e 22,0% para o AS, em comparação aos valores recomendados pelo DER/CE.

Quanto à avaliação do MRAF, a dosagem dos materiais constatou que para ambos os agregados testados a utilização de aditivo pode ser considerada facultativa. No entanto, acredita-se que, diante dos resultados observados no AM e devido às altas temperaturas do estado do Ceará, é recomendado a utilização do aditivo para o caso do agregado mineral. Esse argumento é reforçado através dos depoimentos de alguns técnicos locais com experiência em MRAF, onde constataram a necessidade do emprego de limites maiores do que o recomendado pela norma.

A determinação do teor de ligante de projeto, obtido através das curvas de LWT e WTAT para ambos os agregados, resultou em um valor de 11,7% para o agregado mineral e 10,8% para o agregado siderúrgico. A análise desse resultado deve ser observada com cuidado, tendo em vista que mesmo o AS apresentando um teor de emulsão 0,9% menor do que o AM, na prática, a quantidade de ligante utilizada pelo AS é maior devido a maior densidade do agregado.

Observou-se também que para ambos os agregados testados, o agregado mineral apresentou maior desgaste, no ensaio de WTAT, e maior exsudação, no ensaio de LWT, quando comparado ao agregado siderúrgico. Acredita-se que esse comportamento seja devido aos fatores como a maior resistência à abrasão (menor desgaste) e porosidade do AS (maior absorção do excesso de ligante).

5.2.3 Quanto à avaliação do TSD e MRAF submetidos aos ensaios de desempenho - Terceiro procedimento experimental

A avaliação dos TSDs deu-se inicialmente pela moldagem dos corpos de prova ensaiados. A modificação adotada na pesquisa, quanto à alteração realizada na metodologia

criada por Loiola (2009) e adaptada por Pereira (2010), resultou no desenvolvimento de um carrinho distribuidor de agregados.

Observou-se, na moldagem dos corpos de prova, que a utilização do carrinho distribuidor e as outras etapas metodológicas desenvolvidas na presente pesquisa não anularam totalmente o aspecto subjetivo envolvido na construção do TSD em laboratório. No entanto, a utilização do carrinho possibilitou uma distribuição aleatória dos agregados no molde metálico, diminuindo consideravelmente a influência do operador no encaixe dos agregados durante a moldagem.

Os resultados quanto à avaliação do TSD-AM, pelo equipamento WTAT, indicou que de maneira geral os valores tendem a estar próximos das médias das taxas aplicadas, apresentando algumas exceções com valores divergentes da tendência central da amostra. As taxas médias de agregado e ligante se mostraram coerentes com as taxas de projeto. Os valores dispersos de alguns resultados foram também constatados por Loiola (2009). Entretanto, acredita-se que certa variabilidade possa ser considerada esperada, tendo em vista o aspecto subjetivo da moldagem dos corpos de prova devido a necessidade do controle da taxa de projeto e da taxa real aplicada pelo executor do ensaio.

Analisando os resultados obtidos para o TSD-AS, observou-se que ocorreu uma maior variabilidade quanto ao desgaste médio calculado pelos 9 corpos de prova em comparação ao TSD-AM. Os desgastes obtidos para ambos os agregados foram, em média 25,1% e 14,4% para o AS e AM, respectivamente. Acredita-se que aspectos relacionados ao formato cúbico do agregado e a forma como o carregamento é aplicado foram decisivos para um maior desgaste do AS.

Quanto à taxa de agregado em kg/m^2 utilizado na confecção dos corpos de prova, verificou-se que o TSD-AS utilizou uma taxa maior em comparação ao TSD-AM. Entretanto, deve-se observar com cuidado esse resultado, tendo em vista a massa específica solta do AS ser maior do que a do AM. Logo, para um mesmo volume de TSD se aplicaria em termos de massa uma taxa maior no TSD-AS, mas não necessariamente um maior volume de agregados. Os valores verificados na média dos corpos de prova de TSD-AS resultaram em uma taxa real de agregado utilizada na 1ª camada de 6,5% maior do que o TSD-AM e 12,8% maior na 2ª camada em comparação ao TSD-AM.

Quanto aos resultados do ensaio de WTAT para o MRAF-AM e MRAF-AS, observou-se que de maneira geral a utilização do agregado siderúrgico resultou em um menor desgaste do microrresvetimento quando comparado ao agregado mineral. O baixo valor de

desgaste do AS quando comparado aos valores do AM, indicaram a potencialidade do AS para aplicação em serviços de microrrevestimento asfáltico.

A análise do MRAF-AM e MRAF-AS pelo ensaio de coesão e mistura indicou que ambos superaram o limite mínimo de cura rápida estabelecido pelas especificações. Quanto ao limite para verificação de liberação ao tráfego, ambas as misturas apresentaram resultados semelhantes, podendo o tráfego ser liberado com uma hora após a aplicação do microrrevestimento.

5.2.4 Quanto ao uso do simulador de laboratório na avaliação das placas de TSD e cape seal - Quarto procedimento experimental

Considera-se a metodologia desenvolvida ao longo do quarto procedimento experimental como uma das contribuições da presente pesquisa. Independentemente do revestimento testado, TSD ou *cape seal*, e do agregado, mineral ou siderúrgico, a metodologia desenvolvida, a partir do trabalho de Loiola (2009), possibilitou a criação de um procedimento para avaliação de revestimentos esbeltos em simulador de tráfego de laboratório.

O uso do solo-brita na simulação da camada de base para a confecção das placas foi considerada satisfatório do ponto de vista mecânico. Os materiais utilizados e a metodologia de construção da base, incluindo, compactação e verificação do grau de compactação, mostraram-se adequados à avaliação das placas pelo simulador em função de não apresentaram sinais de deformação ou acomodação que pudesse influenciar a análise do revestimento testado.

A carga de 75 kg aplicada pelo pneumático foi considerada satisfatória para a avaliação de revestimentos esbeltos do tipo TSD e *cape seal*, tendo em vista permitir um acompanhamento do desgaste do revestimento ao longo do ensaio de forma gradual, possibilitando assim, uma melhor compreensão dos efeitos provocados pela ação do pneumático. Diante dos resultados observados nesta pesquisa, a utilização da carga de 500 kg conforme recomendada pela norma francesa NF P98-253-1, não é recomendada para revestimentos do tipo tratamento superficial. Todavia, entende-se que esse tipo de simulador foi desenvolvido para análise de outros tipos de revestimentos e o que se pretendeu aqui foi a adaptação de um equipamento já disponível no LMP/UFC para análise de TS.

Na avaliação do desgaste realizada para as placas de TSD-AM, verificou-se que a evolução da desagregação se deu ao longo dos ciclos, ocorrendo com maior intensidade para

os ciclos iniciais do carregamento (100 e 300 ciclos). Constatou-se o arrancamento do agregado mineral apenas da 2ª camada e uma formação de trilha de roda devido à acomodação do material pela compactação do pneumático.

O ensaio de simulação nas placas de TSD-AS apresentou como resultado um aumento da desagregação dos agregados ao longo do incremento do número de ciclos. Observou-se que os agregados arrancados do TSD-AS eram materiais constituintes da 2ª camada e que os primeiros sinais de trilha de roda somente ocorreram com 3000 ciclos de carregamento.

Quanto à avaliação da textura do TSD-AM e TSD-AS, verificou-se que devido ao aspecto irregular da superfície dos mesmos, os valores medidos nos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico não apresentaram mudanças muito significativas quando submetidos ao carregamento do simulador de tráfego.

Observaram-se quanto ao aspecto visual que as placas de TSD-AS apresentaram melhores resultados em comparação ao TSD-AM ao longo da aplicação de ciclos pelo pneumático. Apesar do maior percentual de agregados soltos do TSD-AS, em comparação ao TSD-AM, verificou-se que as placas construídas com agregado siderúrgico necessitavam de um número maior de ciclos para que o desgaste se tornasse perceptível, chegando ao dobro de ciclos aplicado ao agregado mineral.

Na avaliação das placas de *cape seal*, observou-se que, para o mesmo carregamento aplicado pelos pneumáticos, o desgaste e deformação das placas foram, de maneira geral, menores do que os constatados nos TSDs. Nas placas de *cape seal* não foram realizados as leituras de afundamento para os 300 e 5000 ciclos, devido a evolução do afundamento ser mais visível para intervalos maiores de carregamento, ao contrário dos TSDs cuja desagregação tendeu a ser maior nos ciclos iniciais.

A evolução da deformação medida no CAPE SEAL-AM se desenvolveu a uma taxa maior do que o afundamento sofrido pelo CAPE SEAL-AS. Observando os percentuais de afundamento para os diversos ciclos, verificou-se que no final do ensaio para o CAPE SEAL-AM (10000 ciclos), o mesmo apresentou um valor de afundamento de aproximadamente 10%, enquanto no CAPE SEAL-AS (30000 ciclos), o valor observado foi em torno de 2%. Os carregamentos de 20000 e 30000 ciclos não foram aplicados ao CAPE SEAL-AM por se considerar que valores de carregamento maiores poderiam comprometer a análise da macro e microtextura do revestimento após o ensaio.

Os resultados dos ensaios com a utilização do simulador de tráfego atestam as conclusões relativas ao segundo procedimento experimental quanto ao maior desgaste do

MRAF-AM em relação ao MRAF-AS. Apesar da diferente aplicação de esforços, ensaio de WTAT e simulador de tráfego, o microrrevestimento com AS mostrou um menor desgaste independente do tipo de carregamento aplicado.

Quanto à macro e microtextura, os valores observados através dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia ressaltam o aspecto rugoso do revestimento *cape seal*. Independentemente do agregado utilizado e mesmo após os diferentes ciclos aplicados, as placas ensaiadas apresentavam resultados que as enquadravam com segurança nas especificações técnicas do DNIT.

Verificou-se também, para os revestimentos *cape seal*, que na realização do ensaio de pêndulo britânico, para obtenção da microtextura do revestimento, a água espalhada previamente para realização do ensaio apresentou maior dificuldade de penetração no revestimento CAPE SEAL-AS do que no CAPE SEAL-AM. Tal comportamento indica que o revestimento *cape seal* com agregado siderúrgico pode apresentar menor permeabilidade, onde acredita-se que a mesma seja devida a uma melhor compatibilidade entre emulsão e o AS permitindo um maior travamento da mistura.

A avaliação comparativa entre o TSD-AM e o CAPE SEAL-AM constatou um maior aspecto de desagregação e desgaste do TSD-AM quando submetido ao mesmo ciclo de carregamento pelo pneumático. A comparação do CAPE SEAL-AS em relação ao TSD-AS resultou, de maneira geral, nas mesmas conclusões.

Acredita-se que em função dos resultados observados, a análise comparativa do TSD e *cape seal* confeccionados na pesquisa não se adequam ao mesmo tipo de carregamento. Diante da metodologia inicialmente proposta, os dois revestimentos foram comparados procurando manter-se a mesma espessura da camada de revestimento de 2 cm. Entretanto, verificou-se que devido a forma como o *cape seal* é construído, o mesmo apresentou um aspecto mais rígido e funcionalmente melhor adaptado a absorção das cargas, o que foi verificado posteriormente pelo ensaio de simulação.

Verificou-se que devido à limitação da altura total do revestimento, utilizou-se uma taxa na segunda camada do *cape seal*, correspondente ao MRAF, próxima ao dobro do valor aplicado para uma única camada de MRAF. Assim, o *cape seal* construído na pesquisa correspondeu a uma estrutura de aproximadamente TSS + 2MRAF, enquanto a mais recomendada por razões econômicas seria TSS + 1MRAF.

Logo, diante dos resultados observados na pesquisa, verifica-se que a utilização do CAPE SEAL-AS e CAPE SEAL-AM podem ser pensadas como soluções ligadas às rodovias com maior volume de tráfego e sujeita a carregamentos maiores, sendo o CAPE

SEAL-AS um revestimento com melhor comportamento esperado quando comparado ao CAPE SEAL-AM.

Para o TSD-AS, devido à boa capacidade de resistência à abrasão do agregado siderúrgico, pode-se considerar que o mesmo seja mais resistente do que o TSD-AM. Entretanto, ressalta-se que a utilização do TSD independente do agregado utilizado, pode resultar em um maior desgaste de pneus e aumento de ruído quando comparado ao *cape seal*.

5.2.5 Quanto à viabilidade econômica e técnica do TSD e cape seal

De maneira geral, verifica-se que o custo final dos trechos utilizando o agregado mineral em comparação ao agregado siderúrgico apresentou valores menores, independente do tipo de revestimento analisado.

Avaliando as composições de custos dos revestimentos TSS e TSD para ambos os agregados utilizados, verificou-se que apesar dos revestimentos construídos com agregado siderúrgico utilizarem uma taxa maior de agregado e ligante, na confecção de 1m² de revestimento, o valor final do custo/km, em comparação ao agregado mineral, é menor devido ao preço do m³ do AS (R\$ 5,67/m³) em comparação ao do AM (R\$ 49,97/m³). Logo, verifica-se que a utilização do AS, para TSS e TSD, é vantajosa quando o preço do m³ do agregado siderúrgico for menor em relação ao preço do AM, em caso contrário, outros critérios devem justificar a tomada de decisão pelo uso do AS, como por exemplo, a questão ambiental.

Constatou-se que a utilização de aditivo pelo MRAF-AM fez com que o custo final em R\$/km produzido fosse superior ao do MRAF-AS. Dessa forma, observa-se que do ponto de vista de custos, a não utilização de aditivos resultaria em um custo/km, aproximadamente, de 3% menor para o caso do emprego do AM. Castro (2011) ressalta que para os agregados da Região Metropolitana de Fortaleza há muitas vezes a necessidade da utilização de aditivos.

Verificou-se no cálculo dos custos do MRAF-AS um maior teor de ligante por metro quadrado (3,56L/m²) em comparação ao MRAF-AM (2,93L/m²). A utilização de uma taxa maior de ligante e agregado para o microrrevestimento com AS em comparação ao microrrevestimento com AM, acarretou em um aumento do custo do MRAF-AS e perda da vantagem econômica do mesmo em relação ao baixo preço de 1m³ de agregado siderúrgico, o que resultou em custo final do MRAF-AS semelhante ao MRAF-AM.

Quanto ao *cape seal*, observou-se que em termos de custos a construção do CAPE SEAL-AS resultou em uma economia em torno de 5% de acordo com a condição apresentada para o CAPE SEAL-AM (utilização de até 0,5% de aditivo). Caso não fosse utilizado nenhum aditivo no CAPE SEAL-AM, a vantagem econômica do CAPE SEAL-AS em termos de custos reduziria para 1,8%.

Analisando comparativamente o *cape seal* ao TSD, constatou-se que a decisão pela adoção do CAPE SEAL-AS em relação ao TSD-AS resultaria em um custo final cerca de 80% maior. Quando se compara o CAPE SEAL-AM com o TSD-AM, esse valor é reduzido para 70%. Logo, verifica-se que a decisão pela utilização do *cape seal* em substituição ao TSD deve ser estudada e baseada em função de critérios técnicos envolvendo durabilidade e finalidade da rodovia.

Constatou-se também que a utilização do *cape seal* da forma como foi concebida na pesquisa, pode ter contribuído para a elevação dos custos totais do *cape seal* em comparação ao TSD. Considerando que o *cape seal* confeccionado foi construído como TSS + 2MRAF, dividindo os custos da construção da camada de MRAF por dois e somando ao TSS, obtém-se de maneira simples uma ideia quanto ao custo do *cape seal* para TSS + 1MRAF. Assim, os cálculos resultaram em um custo final de 12% maior do CAPE SEAL-AM em relação ao TSD-AM e 18% maior do CAPE SEAL-AS em relação ao TSD-AS, indicando dessa forma, custos um pouco mais competitivos do *cape seal* em relação ao TSD.

Constatou-se, diante dos resultados apresentados, que a utilização do *cape seal* pode ser pensada como a de um revestimento funcionalmente melhor do que o TSD. A forma como o *cape seal* é construído ajuda a absorver melhor as cargas aplicadas pelos pneumáticos quando comparado ao TSD. Assim, acredita-se que a utilização do revestimento *cape seal* possa ser concebida para rodovias com diferentes níveis de tráfego, sendo o *cape seal* indicado para tráfego mais elevado do que o TSD.

5.3 Sugestões e recomendações para novas pesquisas

Durante a presente pesquisa verificou-se uma série de observações que podem ser investigadas em pesquisas futuras. Dentre elas destacam-se:

- a) desenvolver e aprimorar o processo construtivo dos CPs do TSD através de uma metodologia que vise a anulação ou diminuição da influência do operador do ensaio na construção dos corpos de prova de tratamento superficial;

- b) aperfeiçoar o processo construtivo do TSD quanto à distribuição dos agregados e ligante na construção das placas;
- c) investigar técnicas de compactação dos agregados na manta asfáltica utilizada na confecção do corpo de prova de TSD;
- d) investigar a repetibilidade e reprodutibilidade da moldagem dos corpos de prova de TSD para a realização do ensaio WTAT, bem como avaliar a validade desse tipo de ensaio para outros revestimentos do tipo tratamento superficial;
- e) investigar a utilização do tratamento digital de imagens para avaliar o desgaste do TSD quanto ao ensaio de WTAT;
- f) analisar outros agregados minerais e alternativos visando o emprego em tratamentos de superfície;
- g) analisar o efeito do aumento gradual da carga aplicada pelo pneumático na avaliação das placas através do simulador de tráfego;
- h) pesquisar o CAPE SEAL-AM e CAPE SEAL-AS quanto à avaliação da permeabilidade;
- i) pesquisar em laboratório a construção de *cape seal* com diferentes taxas de MRAF e submetê-los ao simulador de tráfego, visando assim, identificar taxas que represente do ponto de vista técnico e econômico resultados competitivos em comparação ao TSD;
- j) analisar, no simulador de laboratório, o comportamento do *cape seal* construído para TSS+1MRAF em comparação ao TSD;
- k) construir um trecho experimental que possa avaliar comparativamente os revestimentos TSD e *cape seal* para ambos os agregados em verdadeira grandeza.

REFERÊNCIAS

- ABEDA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010.
- AFNOR - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P98-250-2**: *Preparation de mélange hydrocarbonés: partie 2: compactage des plaques*. Paris, 1991a.
- AFNOR - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P98-253-1**: *Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés: partie 1: essai d'orniérage*. Paris, 1991b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **IBP P-MB-167**: Determinação da Ductilidade de Materiais Betuminosos (Revisão). Rio de Janeiro, 1971.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14376**: Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo por evaporação, Método expedito. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14393**: Emulsões Asfálticas - Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14746**: Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica - Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14757**: Microrrevestimentos e lamas asfálticas - Determinação da adesividade de misturas. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14758**: Microrrevestimentos asfálticos - Determinação do tempo mínimo de misturação. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14798**: Microrrevestimentos Asfálticos - Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14841**: Microrrevestimentos a frio - Determinação do excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14941**: Emulsões asfálticas - Determinação da viscosidade saybolt-furol. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14948:** Microrrevestimentos asfálticos a frio modificados por polímero - Materiais, execução e desempenho. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14949:** Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6299:** Emulsões Asfálticas - Determinação do pH de Emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560:** Materiais betuminosos - Determinação de ponto de amolecimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6567:** Emulsões Asfálticas - Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1139-00:** standard specification for aggregate for single or multiple bituminous surface treatments. USA, 2004.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 303-93:** standard test method for measuring frictional proper using the British pendulum tester. USA, 1998.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 965-96:** standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. USA, 2001.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica para Engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2010.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B.; **Avaliação da Resistência ao Polimento e a Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o Processamento Digital de Imagens.** In: 7º CBR & C - Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Foz do Iguaçu, 2011.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o uso de Escoria de Aciaria como Agregado.** Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

CASTRO, P. B. **Avaliação de Agregados da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação em Microrrevestimento Asfáltico a Frio.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

CAVALCANTE, F. C. I. T.; PEREIRA, S. L. O.; BARROSO, S. H. A. **Aproveitamento de resíduos provenientes da indústria siderúrgica para construção de pavimentos econômicos do estado do ceará.** Livro comemorativo 2010: compilação dos melhores projetos. Rio de Janeiro: Construtora Norberto Odebrecht, 2011.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de microrrevestimento asfáltico a frio**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, Instituto Pavimentar, 2011.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2012**. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/Relatorio-geral.aspx>. Acesso em: 05 fev. 2013.

DERT - Informativo Gerencial. Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará. Fortaleza, 2006.

DERT-ES-P 10/00. Tratamento Superficial Simples. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias. Pavimentação, 2000.

DERT-ES-P 11/00. Tratamento Superficial Duplo. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias. Pavimentação, 2000.

DERT-ES-P 20/00. Microrrevestimento Asfáltico à Frio. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias. Pavimentação, 2000.

DERT-ET-P 00/06. Sub-base ou base de solo brita. Especificação Técnica, 2006.

DNER-EM 063/94. Emulsões Asfálticas Catiônicas. Especificação de Material. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-EM 128/10. Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos. Rio de Janeiro, 2010.

DNER-EM 262/94. Emprego de Escórias de Aciaria em Pavimentos Rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ES 391/99. Tratamento Superficial Simples com Asfalto Polímero. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

DNER-ES 392/99. Tratamento Superficial Duplo com Asfalto Polímero. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

DNER-ES 393/99. Tratamento Superficial Triplo com Asfalto Polímero. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

DNER-ME 003/99. Materiais Betuminosos - Determinação da Penetração. Rio de Janeiro, 1999.

DNER-ME 006/00. Emulsão Asfáltica - Determinação da Sedimentação. Rio de Janeiro, 2000.

DNER-ME 035/98. Agregados - determinação da abrasão Los Angeles, 1998.

DNER-ME 049/94. Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas, 1994.

DNER-ME 054/97: Equivalente de Areia, 1997.

DNER-ME 078/94. Agregado Graúdo - Adesividade a ligante betuminoso, 2004.

DNER-ME 081/98. Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo, 1998.

DNER-ME 083/98. Agregados - Análise granulométrica, 1998.

DNER-ME 084/95. Agregado miúdo - determinação da densidade real, 1995.

DNER-ME 086/94. Agregados - determinação do índice de forma, 1994.

DNER-ME 089/94. Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, 1994.

DNER-ME 382/99. Determinação da Recuperação Elástica dos Materiais Asfálticos Modificados por Polímeros, pelo Método do Ductilômetro. Rio de Janeiro, 1999.

DNIT - Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006

DNIT 031/2006-ES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 035/2005-ES. Pavimentos flexíveis - Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT 113/2009-ME. Pavimentação rodoviária - Agregado artificial. Método de ensaio. Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria. Rio de Janeiro, 2009.

DNIT 146/2010-ES. Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Simples com ligante asfáltico convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT 147/2010-ES. Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo com ligante asfáltico convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT 148/2010-ES. Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Triplo com ligante asfáltico convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT 150/2010-ES. Pavimentação asfáltica - Lama asfáltica. Especificação de serviço. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT. Plano Nacional de Viação 2012. Disponível em: http://www.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/snv-2012/SNV2012_Internet.xls/view. Acesso em: 05 fev. 2012.

DUQUE NETO, F.S. Proposição de metodologia para a escolha de solo e dosagem de antipó com emulsão de xisto. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

FHWA-FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Surface Rehabilitation Techniques: State of the Practice Design, Construction and Performance of Micro-Surfacing**. Washington. Estados Unidos, 1994.

FONSECA, P. F. Cape seal na SPVIAS - 2 anos de sucesso. **Fatos & Asfaltos**. ano 02, n.5, p. 2, out. 2005a. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_05.pdf>. Acesso em: 5 set. 2012.

FONSECA, P. F. Execução de cape seal na SPVIAS. **Fatos & Asfaltos**. ano 01, n.4, p. 2, mai. 2005b. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_04.pdf>. Acesso em: 5 set. 2012.

FONSECA, P. F. O Sucesso do *cape seal* na Castelo Branco. **Fatos & Asfaltos**. ano 02, n.8, p. 2, dez. 2006. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_08.pdf>. Acesso em: 5 set. 2012.

FONSECA, P. F.; GIOVANETTI, J. L.; MASSARANDUBA, J. C. Pioneira em aplicação de novas técnicas para pavimentação. **Fatos & Asfaltos**, ano 01, n.1, p. 2-3, set, 2004. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_01.pdf>. Acesso em: 2 set. 2012.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/ Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

HUNT, L.; BOYLE, G. E. **Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete**. Oregon Department of Transportation. State Research Project 511, Final Report, Salem, Oregon, 2000.

IABr - Relatório de sustentabilidade 2012. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>. Acesso em: 7 set. 2012.

ISSA-INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA A-143**. Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2010.

JAHREN, C. T.; BERGESON, K. L.; AL-HAMMADI, A.; CELIK, S.; LAU, G.; QUINTERO, H. **Interim Guidelines for Thin Maintenance Surfaces in Iowa**. In: Mid-Continent Transportation Symposium. Iowa, 2000.

KHAN, M. I.; WAHHAB, H.I.A. **Improving slurry seal performance in eastern Saudi arabia using steel slag**. In: 12^o Construction and building materials, 1998.

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

LEE, D. Y. **Laboratory Study of Slurry Seal Coats.** Iowa Department of Transportation. Iowa. USA, 1978.

LEE, J. S. **Performance Based Evaluation of Asphalt Surface Treatment Using Third Scale Model Mobile Loading Simulator.** A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy. Raleigh, North Carolina, 2007.

LOIOLA, P. R. R. **Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamentos superficiais de rodovias.** Dissertação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MEDINA, J.; MOTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

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

MORIAN, D. A. **Cost Benefit Analysis of Including Microsurfacing in Pavement Treatment Strategies & Cycle Maintenance.** The Pennsylvania Department of Transportation, 2011.

NOURELDIN, A.S.; McDANIEL, R. S. **Evaluation of Surface Mixtures of Steel Slag and Asphalt.** Transportation Research Record 1269, 1989.

OLIVEIRA, J. A.; DAVID, D.; CERATTI, J. A. P. **Estudo comparativo entre os revestimentos delgados TSD e cape seal.** Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. 17º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, 2004.

PARENTE, E. B.; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviário na região metropolitana de Fortaleza.** In: XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, v. I, p. 215-222, 2003.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente.** Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

PEREIRA, S. L. O. **Avaliação de Tratamentos Superficiais de Rodovias Através de Análise de Laboratório.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

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

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, IBP, 2010.

RABELO, A. N. **Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará.** Dissertação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

REIS, M. **Um Estudo da Influência da Granulometria dos Agregados no Desempenho do Microrrevestimento Asfáltico a Frio quanto ao Deslocamento Lateral e Vertical.** Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

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

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares do pavimento - estudo laboratorial.** Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SANTO, N. R. E.; REIS, R. M. M. **Microrrevestimento Asfáltico a Frio.** Uma Inovação Tecnológica para Tratamentos de Superfície, 1999.

SANTOS NETO, P. F. **Estudo do uso de escória de aciaria em camadas de pavimentos na região metropolitana de Fortaleza.** 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SILVA, B. T. A. **Utilização de materiais alternativos para a construção de pavimentos urbanos na região metropolitana de Fortaleza.** Dissertação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

SILVA, E. A. *Uso de escorias de aciaria tratadas com emulsiones catiónicas em varias pavimentaciones.* In: 6º Congresso Ibero-latino Americano Del Asfalto, CILA, Santiago. Tomo I, p. 01 – 18, 1991.

SILVA, E.A.; MENDONÇA, R. L. **Brésil: laitier d'aciérie à tous lês étages, laitiers sidérurgiques,** n. 81, p.11-24, 2001.

SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro.** Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SOLAIMANIAN, M.; KENNEDY, T. W. **Evaluation of the Cape Seal Process as a Pavement Rehabilitation Alternative.** Center for Transportation Research Bureau of Engineering Research the University of Texas at Austin, 1998.

TAVARES, D. S. **Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico.** Dissertação, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TAVARES, D. S.; MOTTA, L. M. G.; ODA, S.; RAMOS, F. R. **Utilização de Agregado Siderúrgico em SMA para Pavimentação Asfáltica.** In: Anais XVI CILA, Rio de Janeiro, 2011.

VALE, A. F. **Estudo e Aplicação de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF).** Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI-USP. São Paulo, 2003.

VASCONCELOS, M. A. G. **Primeiro Estudo da Aplicação de Biodiesel como Material Alternativo para a Imprimação Betuminosa de Pavimentos Rodoviários**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, 2009.

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

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. **Use of Steel Slag in Subgrade Applications**. Indiana Department of Transportation, 2009.