



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

PEDRO BASTOS DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE AGREGADOS ALTERNATIVOS EM
MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO**

**FORTALEZA-CE
2014**

PEDRO BASTOS DE CASTRO

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE AGREGADOS ALTERNATIVOS EM
MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO

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.

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

FORTALEZA-CE
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- C353a Castro, Pedro Bastos de.
Avaliação do emprego de agregados alternativos em microrrevestimento asfáltico / Pedro Bastos de Castro. – 2014.
158 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2014.
Área de Concentração: Caracterização de Materiais Aplicados à Pavimentação.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Transportes. 2. Rodovias. 3. Agregado siderúrgico. I. Título.

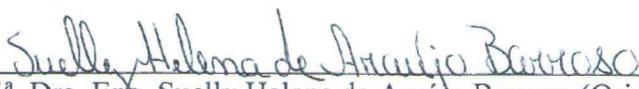
PEDRO BASTOS DE CASTRO

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE AGREGADOS ALTERNATIVOS EM
MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO

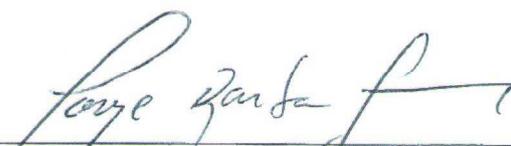
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Aprovada em 06/06/24

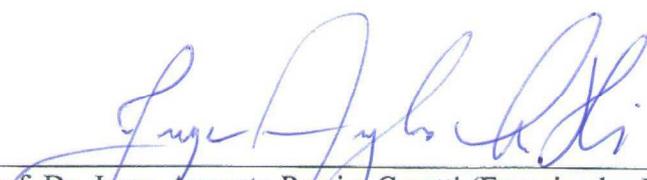
BANCA EXAMINADORA



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



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



Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

*Aos meus pais, Maurício e Cristiane,
minha avó Célia e minha noiva Cecilia
pelo amor, dedicação e apoio
incondicional ao longo desses anos.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, que sempre me iluminou, me dando forças, coragem e equilíbrio sempre nos momentos mais complicados. Sem Ele, não seria possível chegar até aqui.

À professora Suelly Helena de Araújo Barroso, minha orientadora e amiga, que desde o segundo ano da faculdade me incentivou a ingressar na área da pavimentação, que me acolheu no laboratório e concedeu todo o apoio necessário na realização desse trabalho. Orgulha-me muito poder ter tido o privilégio de ser seu aluno e orientado ao longo desses 5 anos. Todo o sucesso obtido nesse trabalho se deve também ao seu empenho.

À FUNCAP pelo apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus familiares, em especial meu tio Romeu, meus cunhados Victor e Vinícius e minha sogra Leda por todo apoio concedido e dedicação ao longo desses últimos anos. Com o apoio de vocês foi possível vencer todos os obstáculos enfrentados nesses últimos anos.

Aos meus padrinhos, Celso e Selma, por todo o amor e atenção dedicados ao longo de minha criação.

Aos meus grandes e velhos amigos Luiz, Ivan, Marcelo, Marcos, Dennis, Yuri e Felipe que foram mais que irmãos pra mim nos momentos em que mais precisei.

Ao meu avô, Aloysio de Castro, por todo o conhecimento passado, incentivo e apoio concedidos durante a realização da pesquisa.

À empresa Asfaltos Nordeste, em especial ao Sr. Francisco Baima, Francisco Baima Filho e André Baima, por todo o apoio concedido durante a realização desse trabalho, permitindo o uso de suas instalações ao longo desses últimos anos, pelo fornecimento dos materiais e pela liberdade que me foi concedida de realizar a minha pesquisa. Sem o apoio de vocês todos seria impossível a realização desse trabalho. Sou muito grato a vocês.

Ao chefe de laboratório da Asfaltos Nordeste, Sérgio Alexandre (*in memoriam*), quem considero meu grande professor ao longo desses últimos anos bem vividos, dando todo o apoio necessário no conhecimento do Microrrevestimento e para meu crescimento profissional. Sempre solícito, atuou de forma direta no desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Firmo meu compromisso de repassar a quem for o que aprendi com você. Minha eterna gratidão!

Aos colegas de laboratório da Asfaltos Nordeste, Erivan, Edson Radnai, Kelciane, Ismael, Araújo e Luiz, pela amizade construída, pelos ensinamentos, pelos ótimos momentos juntos e por todo o apoio concedido no desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Jorge Barbosa Soares, pelo apoio concedido no desenvolvimento de minhas pesquisas desde meu ingresso no laboratório, pela dedicação aos seus alunos e por todo o empenho em fazer do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP/UFC) uma referência nacional.

Ao professor Ernesto Nobre, pelos ensinamentos, conselhos e pela companhia durante minha graduação e mestrado. Tenho orgulho em ser seu aluno.

À professora Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, por toda a ajuda que foi dada nesse ano, sempre se mostrando disposta a contribuir para o nosso crescimento profissional.

Ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti por aceitar participar da banca examinadora desta dissertação.

Aos meus colegas de mestrado, em especial Márcio, William, Synardo, Boris, Lilian, Lucas, Juceline, Fernando, Isael, Lucimar e Daniele. Por todo o apoio no desenvolvimento do trabalho e pela ótima companhia nesses últimos anos. Que essas amizades construídas durem para toda a vida.

À todos os colegas e funcionários LMP/UFC, pelo apoio ao longo desse tempo que trabalhamos juntos.

Por fim, à todos os professores do curso de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC pelos ensinamentos passados e pela dedicação no empenho de formar novos e competentes engenheiros.

RESUMO

O Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) é um tipo de revestimento aplicado na manutenção preventiva de pavimentos que tem sido usado com sucesso em outros estados do Brasil e no mundo, desde que não existam problemas estruturais na rodovia. Para a composição do MRAF tem sido empregados agregados locais que em alguns casos se tornam escassos e com custos elevados. Essa realidade tem motivado pesquisadores a estudarem novos materiais para serem empregados em revestimentos asfálticos. Sendo assim, a pesquisa aqui proposta tem o objetivo geral de verificar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso do Agregado Siderúrgico (AS) e do material fresado na aplicação do MRAF. Para tanto, elaborou-se um programa experimental desenvolvido em quatro etapas. Na primeira etapa, procedeu-se a coleta e a caracterização de agregados convencionais e alternativos (AS e material fresado) e da emulsão modificada por polímeros de ruptura controlada (RC1C-E). Na segunda etapa, foram realizados estudos de dosagem, de desgaste superficial e de tempo de cura em laboratório através de ensaios usualmente empregados. Na terceira etapa, foi analisado o comportamento do MRAF, aplicado diretamente sobre uma base de pavimento asfáltico de comportamento mecânico conhecido, quando submetido a um simulador de tráfego de laboratório. Na quarta etapa, foi realizado um comparativo de custos de aplicação do MRAF utilizando os agregados convencionais e alternativos. A partir dos resultados, observou-se que os agregados alternativos estudados têm potencial para serem empregados em serviços de MRAF, sem diminuição de sua vida útil e propiciando uma redução nos custos de aplicação.

Palavras-chave: Microrrevestimento Asfáltico, Agregado Siderúrgico, Fresado, Simulador de Tráfego.

ABSTRACT

Microsurfacing is a type of bituminous wearing course applied in pavement preventive maintenance that has been used successfully in states of Brazil and the world, but cannot be applied in structurally deficient pavements. For microsurfacing composition it is used local aggregates that in some cases become scarce and expensive. This situation has motivated researchers to study new materials to be used this bituminous wearing course. Therefore, the main objective of the present research is to verify the technical, economic and environmental viability of using steel slag and recycled asphalt aggregates in microsurfacing applications. To reach the main objective, a laboratory procedure was developed in four steps. In the first step, the collection and characterization of conventional and alternative aggregates (steel slag and recycled asphalt aggregates) and polymer-modified emulsified asphalt were made. In the second step, mix design, surface abrasion resistance and set time tests were performed. In the third step, the microsurfacing performance was analyzed by a laboratory traffic simulator when it is applied over a base material with a known mechanical behavior. In the fourth step, a comparative cost study of microsurfacing application using conventional and alternative aggregates was performed. The laboratory procedure results indicated that the alternative aggregates studied have the potential to be used in microsurfacing applications without service life decreasing, providing a reduction in implementation costs.

Keywords: Microsurfacing, Steel Slag, Recycled Asphalt Aggregates, Laboratory Traffic Simulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença de espessura entre MRAF e LA	11
Figura 2 – Comparativo de desgaste de pavimentos com LA e MRAF	12
Figura 3 – Aplicação de MRAF para preenchimento de ATR	15
Figura 4 – Aplicação do MRAF sobre base imprimada no estado do Rio Grande do Norte ...	16
Figura 5 – Aplicação do MRAF na Paraíba	16
Figura 6 – Aplicação do MRAF em pistas de aeroportos.....	17
Figura 7 – Faixas granulométricas do DNIT para o MRAF	18
Figura 8 – Trecho de MRAF executado com faixa I e faixa II do DNIT	20
Figura 9 – Esquema de produção da emulsão asfáltica	22
Figura 10 – Remoção manual de impurezas do pavimento	30
Figura 11 – Umedecimento do pavimento antes da aplicação do MRAF	30
Figura 12 – Correções de pequenos defeitos superficiais.....	31
Figura 13 – Elementos rodoviários a serem retirados antes da execução do MRAF	31
Figura 14 – Usina móvel de MRAF atrelada a um cavalo mecânico	33
Figura 15 – Silo para armazenamento dos agregados	33
Figura 16 – Silo para armazenamento do filler	33
Figura 17 – Tanques de armazenamento de emulsão, água e aditivos	34
Figura 18 – Misturador da usina de MRAF	34
Figura 19 – Caixa distribuidora	35
Figura 20 – Detalhe da régua de corte, hastes reguladoras e tira de borracha.....	35
Figura 21 – Carregamento da usina de MRAF	36
Figura 22 – Definição da largura e da altura da caixa distribuidora.....	36
Figura 23 – Controle e dosagem da aplicação do MRAF.....	37
Figura 24 – Fabricação do MRAF	38
Figura 25 – Aplicação do MRAF em campo.....	39
Figura 26 – Liberação do trecho ao tráfego.....	40
Figura 27 – Diferenças entre AS produzido em EAF e LD	42
Figura 28 – Processo de produção do aço	43
Figura 29 – Produção do AS	44
Figura 30 – Problemas em revestimentos devido à expansão do AS	45
Figura 31 – Principais aplicações do AS	46
Figura 32 – Granulometria do material antes e depois da fresagem	51
Figura 33 – Alteração da granulometria pelo sentido de rotação do cilindro.....	52
Figura 34 – Localização da pedreira onde foram coletados os agregados minerais.....	57
Figura 35 – Vista geral da pedreira onde o agregado do tipo 1 foi coletado.....	58
Figura 36 – Agregado Siderúrgico coletado para a pesquisa	59
Figura 37 – Material fresado fracionado para coleta	60
Figura 38 – Tanques de armazenamento de emulsão asfáltica na Asfaltos Nordeste	61
Figura 39 – Repartidor de amostras utilizado na pesquisa	62
Figura 40 – Peneiramento e descarte do material não utilizado	63
Figura 41 – Série de peneiras para realização do ensaio de granulometria	63
Figura 42 – Índice de forma	64
Figura 43 – Equipamento Los Angeles	64
Figura 44 – Ensaio de azul de metileno.....	65
Figura 45 – Ilustração da realização do ensaio de equivalente de areia	65
Figura 46 – Realização do ensaio de expansão da escória	67
Figura 47 – Procedimento de extração de ligante com equipamento rotarex.....	68
Figura 48 – Extração de betume com equipamento Sohlet	70

Figura 49 – Procedimento de moldagem do corpo de prova para ensaio WTAT	73
Figura 50 – Procedimento de moldagem do corpo de prova para ensaio LWT	74
Figura 51 – Procedimento de moldagem do corpo de prova para ensaio de coesão	75
Figura 52 – Exemplo de definição do teor de projeto de ligante.....	77
Figura 53 – Realização do ensaio WTAT	78
Figura 54 – Realização do ensaio de adesão de areia.....	79
Figura 55 – Ensaio de adesividade	80
Figura 56 – Aspecto do MRAF após realização do ensaio de tempo mínimo de misturação ..	80
Figura 57 – Realização do ensaio de coesão	82
Figura 58 – Detalhe da amostra de MRAF após ensaio de coesão	83
Figura 59 – Simulador de tráfego de laboratório utilizado.....	84
Figura 60 – Material utilizado para o solo-brita.....	85
Figura 61 – Determinação do GC da base de solo-brita.....	85
Figura 62 – Moldagem da base de solo-brita	86
Figura 63 – Moldagem do MRAF sobre a base de solo-brita imprimada	88
Figura 64 – Medição dos afundamentos no simulador.....	89
Figura 65 – Ensaio de Mancha de Areia	90
Figura 66 – Realização do ensaio de Pêndulo Britânico	91
Figura 67 – Curva granulométrica do AS.....	96
Figura 68 – Ilustração do resultado do Azul de Metileno para o AS	97
Figura 69 – Curva de Compactação do AS	99
Figura 70 – Expansão do AS	100
Figura 71 – Curva granulométrica do material fresado com ligante	102
Figura 72 – Curva granulométrica do material fresado sem ligante.....	103
Figura 73 – Curva granulométrica do MRAF com 30% de fresado.....	105
Figura 74 – Curva granulométrica do MRAF com 70% de fresado.....	106
Figura 75 – Aspecto do material fresado após o ensaio de Abrasão Los Angeles	107
Figura 76 – Ilustração dos resultados do Azul de Metileno para o material fresado com e sem ligante	108
Figura 77 – Formação de película do material fresado	108
Figura 78 – Dificuldade de mistura do fresado com solução do Equivalente de Areia	109
Figura 79 – Definição do teor de projeto para o MRAF com AS	114
Figura 80 – Torques obtidos para as amostras de AS.....	116
Figura 81 – Definição do teor de projeto para o MRAF com 30% de fresado.....	118
Figura 82 – Torques obtidos para as amostras de MRAF com 30% de fresado.....	120
Figura 83 – Definição do teor de projeto para o MRAF com 70% de fresado.....	121
Figura 84 – Torque obtido nas amostras do MRAF com 70% de fresado	124
Figura 85 – Granulometria do solo-brita usado como base.....	126
Figura 86 – Realização do ensaio de densidade <i>in situ</i> na base de solo-brita	127
Figura 87 – Evolução da deformação acumulada para MRAF – AM.....	128
Figura 88 – Deformação acumulada para o <i>cape seal</i> – AM	129
Figura 89 – Deformação permanente para MRAF – AM.....	130
Figura 90 – Ensaio de Pêndulo Britânico após 10000 ciclos para o MRAF com AM.....	131
Figura 91 – Deformação acumulada para MRAF – AS	132
Figura 92 – Deformação acumulada para o <i>cape seal</i> – AS.....	133
Figura 93 – Deformação permanente para MRAF – AS	133
Figura 94 – Deformação acumulada para MRAF – Fresado 30%	134
Figura 95 – Deformação acumulada para MRAF - Fresado 70%	136
Figura 96 – Problemas ocorridos nas placas com 70% de fresado.....	137
Figura 97 - Comparativo de evolução das deformações permanentes	139

Figura 98 – Comparativo de custos de aplicação do MRAF com diferentes agregados testados	141
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas granulométricas para MRAF	18
Tabela 2 – Defeitos originados pelos agregados	21
Tabela 3 – Especificações da emulsão asfáltica do tipo RC1C-E	23
Tabela 4 – Defeitos originados pela emulsão	23
Tabela 5 – Granulometria do material de enchimento (fíler)	24
Tabela 6 – Ensaio para projeto e dosagem do MRAF	27
Tabela 7 – Especificações de quantidade de material para MRAF	27
Tabela 8 – Defeitos originados pela dosagem	28
Tabela 9 – Defeitos originados pelo clima	29
Tabela 10 – Defeitos originados pelo estado do pavimento	32
Tabela 11 – Classificação da Macrotextura	91
Tabela 12 – Classificação da Microtextura	92
Tabela 13 – Granulometria do AS	96
Tabela 14 – Granulometria do material fresado com ligante	102
Tabela 15 – Granulometria do material fresado sem ligante	103
Tabela 16 – Granulometria do MRAF com 30% de fresado	104
Tabela 17 – Granulometria do MRAF com 70% de fresado	105
Tabela 18 – Percentual de betume existente no fresado coletado	110
Tabela 19 – Quadro resumo da caracterização dos agregados	111
Tabela 20 – Resultados da caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E	112
Tabela 21 – Resultados do ensaios LWT e WTAT para o MRAF com AS	114
Tabela 22 – Resultados dos desgastes para o MRAF com AS	115
Tabela 23 – Resultados do ensaio de coesão para o MRAF com AS	116
Tabela 24 – Resultados do ensaios LWT e WTAT para MRAF com 30% de fresado	117
Tabela 25 – Resultados dos desgastes para o MRAF com 30% de fresado	119
Tabela 26 – Resultados do ensaio de coesão para o MRAF com 30% de fresado	120
Tabela 27 – Resultados do ensaios LWT e WTAT para o MRAF com 70% de fresado	121
Tabela 28 – Resultados dos desgastes para o MRAF com 70% de fresado	122
Tabela 29 – Resultados do ensaio de coesão para o MRAF com 70% de fresado	123
Tabela 30 – Quadro resumo da dosagem das misturas	124
Tabela 31 – MR da base estudada	127
Tabela 32 – Resumo dos ensaios do simulador de tráfego de laboratório	139
Tabela 33 – Comparativo de custos de aplicação do MRAF	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAUF	Areia Asfalto Usinada a Frio
AAUQ	Areia Asfalto Usinada a Quente
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMA	<i>Asphalt Emulsion Manufacturers Association</i>
AS	Agregado Siderúrgico
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CREMA	Contratos de Manutenção e Restauração
CA	Concreto Asfáltico
CALTRANS	<i>California Department of Transportation</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CS	<i>Cape Seal</i>
DAER-RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
DER-CE	Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FLHD	<i>Federal Lands Highway Division</i>
GC	Grau de Compactação
IABr	Instituto Aço Brasil
ISSA	<i>International Slurry Surfacing Association</i>
LA	Lama Asfáltica
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LWT	<i>Loaded Wheel Tester</i>
MR	Módulo de Resiliência
MRAF	Microrrevestimento Asfáltico a Frio
OPSS	<i>Ontario Provincial Standard Specification</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RPM	Rotações por Minuto
RT	Resistência à Tração
SEINFRA-CE	Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará
SISTRAN	Sistema Integrado de Simulação de Tráfego Normatizado
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSP	Tratamentos Superficiais por Penetração
TSS	Tratamento Superficial Simple
TST	Tratamento Superficial Triplo
UFC	Universidade Federal do Ceará
VRD	Valor de Resistência à Derrapagem
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Problema de Pesquisa	5
1.3	Questões de Pesquisa	6
1.3.1	<i>Questão Principal</i>	6
1.3.2	<i>Questões Pertinentes</i>	6
1.4	Justificativa	6
1.5	Objetivos	7
1.5.1	<i>Objetivo Geral</i>	7
1.5.2	<i>Objetivos Específicos</i>	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	Considerações Iniciais	10
2.2	Microrrevestimento Asfáltico a Frio.....	10
2.2.1	<i>Conceituação</i>	10
2.2.2	<i>Histórico</i>	12
2.2.3	<i>Principais Aplicações do MRAF</i>	14
2.2.4	<i>Materiais Empregados no MRAF</i>	17
2.2.4.1	<i>Agregados</i>	17
2.2.4.2	<i>Emulsão Asfáltica</i>	22
2.2.4.3	<i>Material de Enchimento ou Filer</i>	24
2.2.4.4	<i>Água</i>	24
2.2.4.5	<i>Aditivos</i>	25
2.2.4.6	<i>Fibras</i>	25
2.2.5	<i>Projeto e Dosagem do MRAF</i>	26
2.2.6	<i>Método Executivo</i>	28
2.3	Agregado Siderúrgico e seu emprego na pavimentação	40
2.4	Fresagem de Revestimentos Asfálticos e sua Aplicação em Novos Pavimentos	49
2.5	Considerações Finais	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	Considerações Iniciais	56
3.2	Escolha dos Materiais	57
3.2.1	<i>Agregado Mineral</i>	57
3.2.2	<i>Agregado Siderúrgico</i>	58
3.2.3	<i>Material Fresado</i>	59
3.2.4	<i>Emulsão Asfáltica</i>	60
3.2.5	<i>Cimento Portland</i>	61
3.2.6	<i>Aditivo Controlador do Tempo de Ruptura da Emulsão</i>	61
3.3	1ª Etapa do Programa Experimental – Caracterização dos Agregados e da Emulsão Asfáltica	62
3.3.1	<i>Ensaios de Caracterização dos Agregados</i>	62
3.3.2	<i>Ensaios de Caracterização dos Agregados – Exclusivo para Agregado Siderúrgico</i>	66
3.3.3	<i>Ensaios de Caracterização dos Agregados – Exclusivo para Material Fresado</i>	67
3.3.4	<i>Ensaios Realizados na Emulsão Asfáltica</i>	70
3.4	2ª Etapa do Programa Experimental – Dosagem e Análise do Comportamento do MRAF em Laboratório	71

3.4.1	<i>Moldagem do Corpo de Prova para o ensaio WTAT</i>	71
3.4.2	<i>Moldagem do Corpo de Prova para o ensaio LWT</i>	74
3.4.3	<i>Moldagem do Corpo de Prova para o ensaio de Coesão</i>	74
3.4.4	<i>Procedimento de Dosagem do MRAF</i>	75
3.4.5	<i>Análise do Comportamento do MRAF em Laboratório</i>	81
3.5	3ª Etapa do Programa Experimental – Análise do Comportamento do MRAF Através do Simulador de Tráfego de Laboratório.....	83
3.5.1	<i>Escolha dos Materiais e Construção da Base</i>	85
3.5.2	<i>Moldagem do MRAF sobre a Base de Solo-Brita Imprimada</i>	87
3.5.3	<i>Avaliação do Comportamento das Placas de MRAF através do Simulador de Tráfego</i> 88	
3.6	4ª Etapa do Programa Experimental – Análise Econômica de Soluções Alternativas Propostas para o MRAF.....	93
3.7	Considerações Finais.....	93
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
4.1	Considerações Iniciais.....	95
4.2	Resultados da 1ª Etapa do Programa Experimental.....	95
4.2.1	<i>Agregado Siderúrgico</i>	95
4.2.1.1	<i>Granulometria</i>	95
4.2.1.2	<i>Índice de Forma</i>	96
4.2.1.3	<i>Abrasão Los Angeles</i>	97
4.2.1.4	<i>Azul de Metileno</i>	97
4.2.1.5	<i>Equivalente de Areia</i>	98
4.2.1.6	<i>Ensaio de Expansão</i>	98
4.2.1.7	<i>Ensaio de Lixiviação e Solubilização</i>	100
4.2.2	<i>Material Fresado</i>	101
4.2.2.1	<i>Granulometria</i>	101
4.2.2.2	<i>Índice de Forma</i>	106
4.2.2.3	<i>Abrasão Los Angeles</i>	106
4.2.2.4	<i>Azul de Metileno</i>	107
4.2.2.5	<i>Equivalente de Areia</i>	109
4.2.2.6	<i>Determinação do Teor de Betume do Material Fresado</i>	109
4.2.3	<i>Comparativo dos Resultados acerca da Caracterização dos Agregados</i>	110
4.2.3	<i>Resultados da Caracterização da Emulsão Asfáltica</i>	111
4.3	Resultados da 2ª Etapa do Programa Experimental.....	112
4.3.1	<i>Agregado Siderúrgico</i>	112
4.3.1.1	<i>Verificação da Compatibilidade Agregado-Emulsão</i>	112
4.3.1.2	<i>Determinação do Teor de Aditivo</i>	113
4.3.1.3	<i>Determinação do Teor de Projeto de Ligante</i>	113
4.3.1.4	<i>Análise do Comportamento em Laboratório – Desgaste WTAT</i>	115
4.3.1.5	<i>Análise do Comportamento em Laboratório – Ensaios de Coesão</i>	116
4.3.2	<i>MRAF com 30% de Fresado</i>	117
4.3.2.1	<i>Verificação da Compatibilidade Agregado-Emulsão</i>	117
4.3.2.2	<i>Determinação do Teor de Aditivo</i>	117
4.3.2.3	<i>Determinação do Teor de Projeto de Ligante</i>	117
4.3.2.4	<i>Análise do Comportamento em Laboratório – Desgaste WTAT</i>	118
4.3.2.5	<i>Análise do Comportamento em Laboratório – Ensaios de Coesão</i>	119
4.3.3	<i>MRAF com 70% de Fresado</i>	120
4.3.3.1	<i>Verificação da Compatibilidade Agregado-Emulsão</i>	120

4.3.3.2	<i>Determinação do Teor de Aditivo</i>	121
4.3.3.3	<i>Determinação do Teor de Projeto de Ligante</i>	121
4.3.3.4	<i>Análise do Comportamento em Laboratório – Desgaste WTAT</i>	122
4.3.3.5	<i>Análise do Comportamento em Laboratório – Ensaio de Coesão</i>	123
4.3.4	<i>Resumo dos Resultados da 2ª Etapa do Programa Experimental</i>	124
4.4	Resultados da 3ª Etapa do Programa Experimental	125
4.4.1	<i>Caracterização da Base de Solo-Brita</i>	126
4.4.2	<i>Avaliação do comportamento do MRAF no simulador</i>	127
4.4.2.1	<i>Avaliação do Comportamento do MRAF no Simulador – AM</i>	128
4.4.2.2	<i>Avaliação do Comportamento do MRAF no Simulador – AS</i>	131
4.4.2.3	<i>Avaliação do Comportamento do MRAF no Simulador – Fresado 30%</i>	134
4.4.2.4	<i>Avaliação do comportamento do MRAF no simulador – Fresado 70%</i>	135
4.4.3	<i>Resumo dos Resultados da 3ª Etapa do Programa Experimental</i>	139
4.5	Resultados da 4ª Etapa do Programa Experimental	139
4.6	Considerações Finais	142
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	144
5.1	Considerações Iniciais	144
5.2	Resumo das Principais Conclusões	144
5.3	Principais Constatações	146
5.3.1	<i>Quanto aos Ensaio de Caracterização dos Agregados e Ligante</i>	146
5.3.2	<i>Quanto ao Processo de Dosagem do MRAF</i>	146
5.3.3	<i>Quanto ao Comportamento do MRAF em Laboratório</i>	147
5.3.4	<i>Quanto ao Comportamento do MRAF no Simulador de Tráfego de Laboratório</i>	147
5.3.5	<i>Quanto à Viabilidade Econômica</i>	150
5.4	Recomendações para Trabalhos Futuros	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Uma rodovia é concebida para atender às solicitações do tráfego durante um determinado tempo previsto em seu projeto. Entretanto, na prática esse período normalmente é menor do que o estimado em projeto. Visando garantir boas condições de trafegabilidade para o usuário de rodovias, manutenções periódicas devem ser realizadas em sua superfície. As técnicas comumente empregadas são os Tratamentos Superficiais por Penetração (TSP), a Lama Asfáltica (LA), o Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e o *Cape Seal* (CS). Os Tratamentos Superficiais serão chamados de TSP, neste trabalho, para evitar confusões com outros revestimentos que compõem a família dos tratamentos de superfície.

Os TSPs são utilizados para recuperar superfícies de pavimentos desgastadas que não apresentam defeitos estruturais. A aplicação do TSP consiste na distribuição, em sequência simples ou múltipla, de camada de ligante e de uma camada de agregado, sendo essa última aplicação seguida de uma compactação. Os tipos de TSP variam com a quantidade de camadas de ligante e agregados aplicadas. Os tratamentos podem ser do tipo simples (TSS), duplo (TSD) ou triplo (TST) (ABEDA, 2010).

A Lama Asfáltica (LA) é outra técnica adotada para a manutenção preventiva de pavimentos. Consiste em uma mistura a frio de agregados com dimensão máxima de 9,5mm, material de enchimento (filer), emulsão asfáltica e água. Em casos específicos, é permitida a adição de até 20% de areia na composição. Essa mistura é espalhada de maneira uniforme sobre a superfície do pavimento. A LA tem uma aplicação limitada, uma vez que apresenta desgaste elevado em rodovias de tráfego pesado (ABEDA, 2010).

O Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) tem uma aplicação similar a da LA. As diferenças surgem na granulometria dos agregados, com dimensões maiores para o MRAF (dimensão máxima do agregado de 12,5mm), no tipo de emulsão utilizada (somente do tipo ruptura controlada modificada por polímeros RC1C-E) e na ausência da areia lavada de rio. Sua durabilidade também é maior, sendo aplicado com sucesso em rodovias de tráfego pesado (ABEDA, 2010).

O *Cape Seal* (CS) consiste na aplicação sucessiva de TSS e MRAF. Além de ser utilizado em manutenções preventivas, este tipo de revestimento também é empregado em

construções de novas rodovias. O CS tem como principal diferencial unir a boa flexibilidade característica dos revestimentos tipo TS com um bom acabamento e boa resistência ao desgaste do MRAF (ABEDA, 2010).

As ações de manutenção e recuperação de vias vem se intensificando com o intuito de melhorar a trafegabilidade das rodovias federais e estaduais. No Estado do Ceará, de acordo com o Relatório Gerencial 2014 – Manutenção da Malha Rodoviária Federal Pavimentada Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), estão sendo recuperados cerca de 1500 km de rodovias federais no Estado através de Contratos de Manutenção e Restauração (CREMA).

Segundo Castro (2011), foi realizado um levantamento pelo Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará (DER-CE) no ano de 2011 que comprovou que a condição da superfície da malha rodoviária estadual se encontrava na seguinte situação: 71,8% estavam em boas condições de trafegabilidade; 18,9% estavam em uma condição regular; 7,2% eram consideradas ruins e 2,1% encontravam-se em péssimo estado.

Silva *et al.* (2009) relatam que rodovias em más condições geram prejuízos para os usuários, aumentando o consumo de combustível, custo de manutenção, tempo de viagem e número de acidentes. O incremento do custo operacional ainda acarreta em reajustes dos preços dos fretes, impactando diretamente nos preços dos produtos que dependem do transporte rodoviário para chegar ao consumidor final.

Nesta dissertação, o revestimento asfáltico a ser estudado é o MRAF. Essa técnica vem ganhando espaço no cenário nacional desde o início da década passada e no âmbito local desde o início dessa década, sendo considerada uma solução adequada para manutenção de rodovias. Nos últimos 5 anos, o MRAF vem sendo adotado em larga escala em programas CREMA do DNIT.

Segundo Reis (2005), o MRAF tem sido aplicado em correção de defeitos funcionais do pavimento e os resultados obtidos foram satisfatórios. O DNIT denomina essa tecnologia como Microrrevestimento Asfáltico a Frio com Emulsão Modificada por Polímeros (DNIT-ES 035/2005). O emprego do MRAF proporciona um incremento na vida útil das rodovias onde o mesmo foi utilizado, garantindo um pavimento em boas condições de trafegabilidade durante o seu período de projeto.

O MRAF possui vantagens quando comparado à outras técnicas, como os TSPs. A sua aplicação se dá através de um equipamento específico, minimizando a interferência humana no processo executivo. O processo da mistura dos materiais é realizado em uma usina móvel. Nessa usina ocorre a fabricação de uma massa fluida onde a mesma é espalhada sobre

o revestimento existente, conferindo um melhor acabamento da superfície do pavimento quando comparado às aplicações de TSPs. Essa maior uniformidade também contribui para a redução dos níveis de ruído, gerando um maior conforto para o usuário (ABEDA, 2010).

Nas aplicações de MRAF, em geral não é necessário realizar a compactação da camada aplicada. As exceções aplicam-se em situações como estacionamentos e rodovias de alto volume de tráfego onde verifica-se afundamentos de trilha de roda. Finalizada a aplicação, a liberação ao tráfego do trecho executado ocorre em média uma hora após a aplicação. Ceratti e Reis (2011) citam que dependendo das condições climáticas ou da espessura do MRAF aplicado, esse tempo de liberação pode ocorrer em até 2 horas. Os curtos espaços de interrupção ao tráfego em aplicações de MRAF minimizam os impactos gerados em rodovias de grande circulação de veículos e em centros urbanos.

Outro fator que torna o MRAF uma opção vantajosa é o fato de se usar uma emulsão modificada por polímeros de ruptura controlada, do tipo RC1C-E. O processo de ruptura desse ligante é um processo químico e não depende diretamente das condições climáticas. Com isso, a técnica pode ser executada em períodos noturnos ou em dias com alta umidade do ar sem grandes alterações no tempo de cura do revestimento.

Pode-se considerar que a adição de polímeros no ligante asfáltico proporcionou um avanço na utilização de revestimentos delgados como solução de manutenção preventiva de rodovias. Segundo Vale (2003), a introdução de polímeros nas emulsões asfálticas possibilitou o emprego de camadas delgadas em projetos de manutenção dos pavimentos existentes. Atualmente é possível realizar manutenções preventivas em pavimentos desgastados com custos reduzidos quando comparados aos custos de aplicação de misturas a quente.

O MRAF é composto de cerca de 90% a 95% de agregados. A diminuição da oferta de agregados na natureza já se mostra presente em alguns locais, ocasionando inevitavelmente um aumento do seu preço. A elevação do custo dos agregados pode em alguns casos inviabilizar a execução de uma obra, visto que em pavimentos delgados os custos com agregados têm valor relevante.

Além de se estudar novas tecnologias para serem empregadas na revitalização dos pavimentos, outro desafio que os engenheiros enfrentam atualmente é a escassez de materiais, em especial dos agregados. Sabendo disso, mostra-se cada vez mais necessário o estudo de novos materiais que possam ser empregados na pavimentação, diminuindo o consumo de materiais naturais, promovendo a preservação do meio ambiente.

Segundo Loiola (2009), alguns tipos de agregados alternativos originados a partir de resíduos industriais vêm sendo aplicados na pavimentação. A reciclagem desses materiais gera benefícios diretos ao meio ambiente e ainda possibilita uma redução de custos na execução de obras quando há facilidade de se obter esses tipos de agregados. Um dos materiais potenciais a serem empregados, na pavimentação, em substituição ao agregado mineral é o Agregado Siderúrgico (AS), originado como resíduo durante o processo de fabricação do aço.

O AS é produzido em larga escala em regiões onde existem indústrias siderúrgicas e é considerado um resíduo, sendo portanto necessárias pesquisas visando uma destinação mais adequada para esse material. O emprego do AS já vem sendo realizado na pavimentação desde a década dos anos 90, sendo utilizado tanto em camadas granulares como em revestimentos asfálticos. Apesar disso, estudos que analisam o comportamento do AS em aplicações de MRAF são incipientes no país, portanto os conhecimentos do comportamento do AS nesse tipo de revestimento são limitados.

Bonfim (2011) também alerta para o emprego da técnica da fresagem de pavimentos asfálticos, que vem sendo aplicada como uma solução no processo de restauração de pavimentos com elevados índices de deterioração. Além disso, o material oriundo do processo de fresagem, devido às suas propriedades nobres, pode ser reutilizado como matéria-prima na construção de novos pavimentos, ocasionando também em benefícios ao meio ambiente na diminuição da exploração de jazidas para a obtenção de agregados minerais.

A fresagem de pavimentos auxilia na retirada de pavimentos envelhecidos, trincados, garantindo que não exista a reflexão dos defeitos existentes na nova camada asfáltica aplicada. Em centros urbanos, a fresagem contribui para a manutenção do greide de ruas e avenidas. Entretanto, com o crescimento da utilização dessa técnica, a quantidade de resíduo gerado também aumentou, sendo necessário então estudar alternativas de reaproveitar esse material.

Estudos estão sendo desenvolvidos para o emprego do fresado tanto em reciclagem de pavimentos como na pavimentação de novas rodovias. O emprego do material fresado como agregado em misturas asfálticas vem ganhando espaço desde a década passada, porém o seu emprego tem uma maior aplicação em misturas a quente. No Brasil, os estudos direcionados para aplicação desse material em misturas a frio são limitados, especificamente em revestimentos do tipo MRAF.

Após realizar visitas no campo e conversar com técnicos e especialistas da área, constatou-se que em alguns estados do Nordeste, como o Rio Grande do Norte e na Paraíba,

foram realizadas experiências bem sucedidas de utilização do MRAF como técnica construtiva de pavimentos, sendo o revestimento executado diretamente sobre uma base imprimada. Sendo assim, podem ser realizados estudos mais aprofundados com o intuito de se considerar essa possibilidade como alternativa aos métodos construtivos tradicionais de revestimentos esbeltos.

Nesse sentido, foram estudados neste trabalho dois tipos de agregados alternativos para aplicação em MRAF: o agregado siderúrgico e o agregado oriundo do processo de fresagem. Na presente dissertação de mestrado, estudou-se a técnica de MRAF de forma a contribuir com o desenvolvimento e a aplicação da mesma no estado do Ceará. Além disso, foi verificado seu comportamento quando aplicado diretamente sobre uma base granular. Para isso, foram realizados estudos para verificar o comportamento desse revestimento quando solicitado pela ação do tráfego em simuladores de tráfego em laboratório.

Motivado pelo apelo ambiental, testou-se também o emprego do agregado siderúrgico e do material fresado como agregados alternativos no MRAF, possibilitando realizar um comparativo dos mesmos com misturas constituídas de agregados minerais. Para isso, ensaios específicos foram realizados, além dos estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização desses agregados. A viabilidade do uso desses tipos de agregados além de favorecer a conservação do meio ambiente, pode contribuir com o emprego da técnica em locais onde a oferta de agregados minerais de qualidade seja fator limitante para a sua aplicação.

1.2 Problema de Pesquisa

A construção de pavimentos que utilizam revestimentos esbeltos como camada final de rolamento são executados tradicionalmente com a família dos TSPs. São soluções consagradas, especialmente na região Nordeste, onde seu comportamento e técnicas construtivas são difundidas no meio rodoviário. Entretanto, existem outras alternativas que podem apresentar boa competitividade, como a utilização de MRAF, porém seu comportamento é pouco conhecido quando utilizado para esse fim.

Além disso, sabe-se que obras rodoviárias geram grandes impactos ambientais como a exploração de reservas naturais de agregados e que em alguns locais a escassez desses materiais na natureza se faz presente, sendo necessário buscar materiais em outras jazidas. Essa ação pode aumentar, substancialmente, em alguns casos, os custos de transporte, inviabilizando a realização de obras rodoviárias.

Pelo exposto nos parágrafos anteriores pode-se enunciar o problema que motivou a realização desta pesquisa: há carência de estudos, no Estado do Ceará, sobre o emprego da técnica do MRAF para construção de pavimentos esbeltos, bem como da aplicação de agregados alternativos (AS e fresado) nesse tipo de serviço.

1.3 Questões de Pesquisa

1.3.1 Questão Principal

Existe a possibilidade de se aplicar o MRAF, utilizando agregados alternativos, como opção de revestimento na construção de rodovias?

1.3.2 Questões Pertinentes

- Qual o estado da arte da aplicação do MRAF no Brasil e no mundo?
- Quais os procedimentos para dosagem e avaliação do MRAF?
- Como avaliar preliminarmente se agregados alternativos podem ser empregados em revestimentos do tipo MRAF?
 - Qual a variação no consumo de ligante quando utilizados agregados alternativos na composição de MRAF?
 - Quais as variações observadas no comportamento do MRAF quando se utiliza agregados alternativos em sua composição?
 - Como se comporta o MRAF, utilizando agregados convencionais e alternativos, quando executado diretamente sobre uma base granular?
 - Qual a variação de custos de aplicação do MRAF quando empregados agregados convencionais e alternativos?

1.4 Justificativa

Realizar obras rodoviárias, principalmente nos arredores dos grandes centros urbanos, vem se tornando complicado devido à escassez de materiais naturais. Essa situação já é enfrentada por engenheiros em algumas regiões do país, especialmente a escassez de agregados minerais. Existe então a necessidade de se pesquisar novos tipos de materiais que

possam ser empregados na pavimentação, visando minimizar esse problema. A proposição do emprego de agregados alternativos, como o siderúrgico e o fresado, no MRAF pode auxiliar na redução dos impactos econômicos e ambientais provocados pelas obras de engenharia.

Os estudos existentes sobre o MRAF mostram que esse tipo de revestimento apresenta um bom desempenho, resistindo bem às solicitações do tráfego e por esse motivo ele vem sendo adotado como uma técnica bem sucedida na manutenção de pavimentos. Porém, apesar de já terem ocorrido aplicações de MRAF como método construtivo em algumas rodovias da região Nordeste, não se tem acompanhado a eficácia desta solução. A carência de estudos sobre MRAF aplicado diretamente sobre camadas de bases e de investigações sobre o emprego de agregados alternativos justifica a execução da presente dissertação.

O agregado siderúrgico já vem sendo aplicado na pavimentação em camadas granulares e em revestimentos asfálticos, mas ainda não é conhecida a viabilidade do seu emprego em MRAF, relevando a importância do estudo aqui proposto. Já o material fresado vem sendo aplicado como parte dos agregados de misturas asfálticas a quente e os resultados obtidos nas primeiras aplicações estão sendo considerados satisfatórios. Porém, o mesmo não foi testado como agregado aplicações a frio do tipo MRAF, o que desperta o interesse de se realizar estudos para investigar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso desses materiais.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

Verificar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso de agregados alternativos (siderúrgico e fresado) em revestimentos do tipo MRAF, analisando seu comportamento quando utilizado como método construtivo de rodovias.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Levantar o estado da arte da aplicação do MRAF no Estado do Ceará, no Brasil e no mundo.

- Verificar na literatura os procedimentos para dosagem e avaliação de comportamento do MRAF.
- Investigar a possibilidade de emprego de agregados alternativos (siderúrgico e fresado) em serviços de MRAF.
- Verificar qual o teor de projeto de ligante a ser adotado no MRAF quando empregado o agregado siderúrgico e o material fresado, comparando com o adotado quando utiliza-se o agregado convencional.
- Comparar o comportamento do MRAF utilizando agregados alternativos com o comportamento utilizando agregados convencionais através de ensaios de laboratório.
- Analisar o comportamento do MRAF, utilizando agregados convencionais e alternativos, executado sobre uma base granular através de simuladores de tráfego de laboratório.
- Comparar os custos da aplicação do MRAF utilizando agregados convencionais e alternativos.

1.6 Estrutura do Trabalho

O trabalho aqui apresentado está dividido em cinco capítulos, brevemente descritos a seguir:

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, contextualizando o tema abordado, sendo apresentados alguns dados e informações que motivaram a realização da presente dissertação. Além disso, neste capítulo estão relatados o problema, as questões de pesquisa, a justificativa e os objetivos gerais e específicos da pesquisa proposta.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados nesta dissertação. Esta revisão contém a conceituação da técnica do MRAF, abordando os principais aspectos desse revestimento. Com relação ao AS, são apresentadas suas características, propriedades e principais aplicações na área de pavimentação. Realizou-se também uma revisão sobre o procedimento de fresagem de pavimentos asfálticos, abordando os principais conceitos, além de apresentar as principais aplicações do material fresado em rodovias.

No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos empregados para a realização deste trabalho. São apresentados em detalhe todos os ensaios realizados com o intuito de atingir os objetivos propostos.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados parciais obtidos através dos ensaios realizados em laboratório. No Capítulo 5 constam as principais conclusões obtidas, assim como sugestões para desenvolvimentos futuros. Na última parte do trabalho, as referências bibliográficas que balizaram o desenvolvimento deste estudo estão expostas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais assuntos a serem estudados nesta dissertação. Serão abordados conceitos sobre Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), mostrando também um breve histórico sobre sua aplicação no estado do Ceará, no Brasil e no mundo. As principais aplicações do MRAF também serão discutidas de modo a delimitar o universo onde esse tipo de revestimento deve ser utilizado.

Apresenta-se uma breve revisão sobre a utilização do agregado siderúrgico na pavimentação, onde serão apresentadas algumas soluções adotadas com o emprego desse material em substituição ao agregado mineral. Os conceitos sobre fresagem de pavimentos asfálticos também serão abordados, assim como será mostrado como esse material vem sendo aplicado na restauração e revitalização de pavimentos deteriorados.

2.2 Microrrevestimento Asfáltico a Frio

2.2.1 Conceituação

O MRAF é um dos tipos de revestimento asfáltico esbelto utilizado na manutenção preventiva e na reabilitação funcional de pavimentos. De acordo com Vale (2003), o MRAF é empregado em diversos países como uma técnica de manutenção de pavimentos. No Brasil, suas aplicações tem ganhado destaque a partir da década dos anos 90. Segundo a norma da *International Slurry Surfacing Association* (ISSA A-143/2010a), o MRAF é composto de emulsão asfáltica modificada por polímeros, agregados minerais, água e aditivos misturados e aplicados de maneira uniforme sobre uma superfície preparada para receber a mistura.

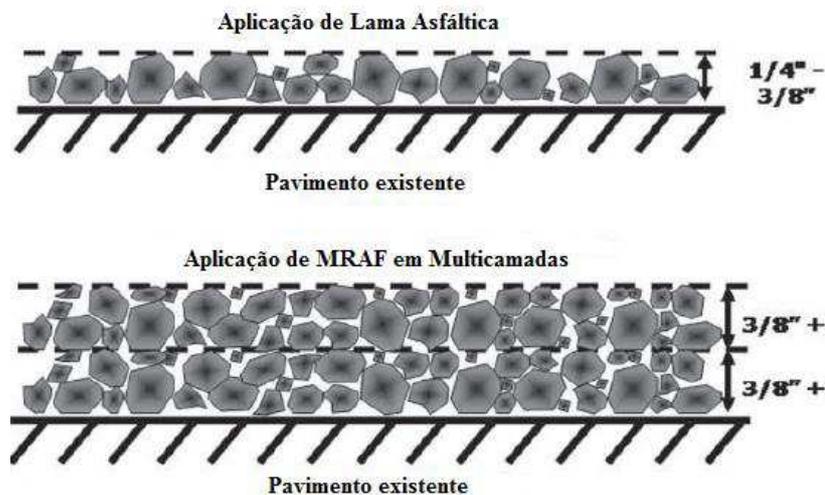
O DNIT (DNIT ES-035/2005) define o MRAF como sendo “*uma associação de agregado, material de enchimento (fíler), emulsão asfáltica modificada por polímero do tipo SBS, água, aditivos se necessários, com consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada, podendo ser empregado como camada selante,*

impermeabilizante, regularizadora e rejuvenescedora ou como camada antiderrapante de pavimentos”.

A ABEDA (2010) define o MRAF como uma mistura a frio contendo emulsão modificada por polímeros SBR (látex de estireno butadieno) ou SBS (copolímero de estireno butadieno), agregados minerais, material de enchimento (fíler), água e aditivos para controle do tempo de ruptura da emulsão, além da utilização das fibras, que têm a função de aumentar a flexibilidade do revestimento.

O MRAF é considerado uma evolução da Lama Asfáltica (LA), mas com diferenças na especificações da emulsão asfáltica, na qualidade dos agregados utilizados e na durabilidade. Enquanto revestimentos do tipo LA são aplicados com espessuras de no máximo uma vez e meia a dimensão máxima do agregado, para o caso do MRAF espessuras maiores podem ser adotadas devido à estabilidade da massa ser considerada maior, conforme ilustrado na Figura 1. O processo de cura da massa é rápido (cerca de uma hora) pelo fato da emulsão asfáltica romper e curar através de um processo eletroquímico, não sofrendo grande influência das variações climáticas, favorecendo aplicações durante períodos noturnos (FHWA, 1994; METCALF, 2007; BICKFORD, 2008; NCHRP SYNTHESIS 411, 2010).

Figura 1 – Diferença de espessura entre MRAF e LA

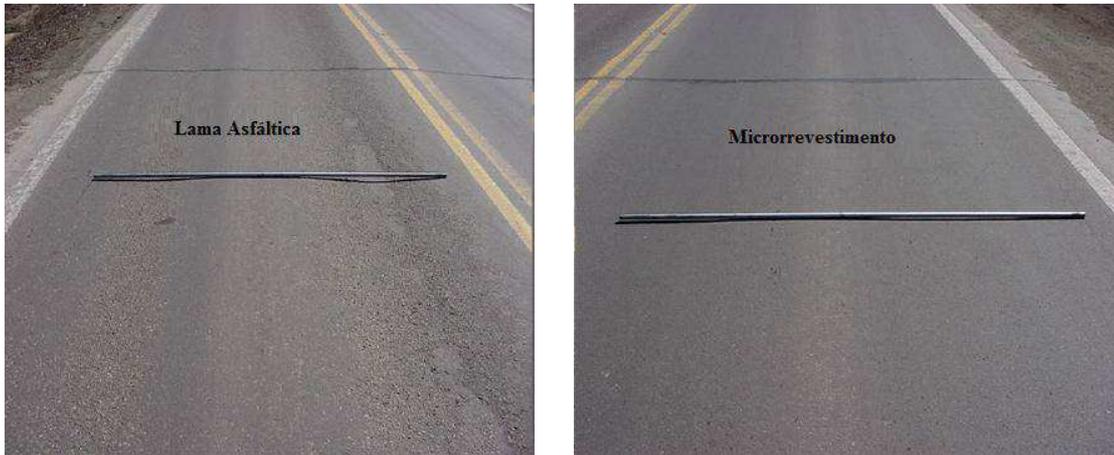


Fonte: Adaptado de Bickford (2008)

Apesar da diferença entre os materiais aplicados, o método de aplicação do MRAF e da LA é similar, o que pode causar dificuldade para engenheiros rodoviários ou técnicos que não possuem afinidade com a técnica identificarem qual tipo de revestimento está sendo executado. De acordo com Hick *et al.* (1999), Austroads (2003), *Federal Lands Highway Division* (FLHD, 2003), CALTRANS (2009) e ISSA (2010b), as principais diferenças entre os dois tipos de revestimento estão (i) no ligante, para o MRAF emulsão obrigatoriamente modificada por polímeros, (ii) nos agregados, que para o caso do MRAF

devem ser britados e de qualidade superior. O MRAF é mais apropriado para aplicações em rodovias com maior volume de tráfego. A Figura 2 ilustra o comparativo da diferença do desgaste superficial de uma rodovia submetida à um alto volume de tráfego quando utilizado LA e MRAF como soluções de revitalização.

Figura 2 – Comparativo de desgaste de pavimentos com LA e MRAF



Fonte: adaptado de Metcalf (2007)

2.2.2 Histórico

O MRAF foi inicialmente desenvolvido na Europa. Segundo a ISSA A-143 (2010), o MRAF teve seu início na década dos anos 70. De acordo com o relatório técnico publicado pelo CALTRANS, nomeado *Slurry Seal / Micro-surface Mix Design Procedure* (2004), o MRAF foi desenvolvido na Alemanha no final da década dos anos 60, onde foram empregadas emulsões modificadas por polímeros e agregados de melhor qualidade. Nos Estados Unidos, as primeiras aplicações de MRAF ocorreram por volta do ano de 1980, onde foram obtidos bons resultados na correção de afundamento de trilhas de roda e de defeitos superficiais de revestimentos asfálticos.

Santo e Reis (1996) relatam que o desenvolvimento das emulsões asfálticas auxiliou na evolução do microrrevestimento. Segundo a FHWA (1994), na década dos anos 70, uma empresa francesa com o nome de *Screg Route* desenvolveu um material tipo cola selante, um micro concreto asfáltico que foi posteriormente melhorado pela empresa alemã Raschig. A empresa alemã comercializou esse produto no mercado norte-americano com o nome de Ralumac no início dos anos 80.

No final da década dos anos 80, uma empresa espanhola com o nome de Elsamex também desenvolveu e comercializou o MRAF nos Estados Unidos, mas com uma nomenclatura diferente, que ficou conhecida como *Macro Seal*. Nos Estados Unidos, a

aplicação do MRAF iniciou-se no estado do Kansas. Posteriormente, outros estados norte-americanos e diversas agências locais adotaram o MRAF como uma técnica de manutenção de pavimentos para aplicação em rodovias de tráfego médio e alto. O MRAF foi amplamente difundido nos estados de Kansas, Ohio, Oklahoma, Pensilvânia, Tennessee, Texas e Virgínia (FHWA, 1994).

Hein *et al.* (2003) citam que o MRAF teve suas primeiras aplicações no Canadá no início da década dos anos 90 sendo aplicado em aeroportos, centros urbanos e rodovias de médio e alto volume de tráfego. De acordo com AppaRoa *et al.* (2013), na Índia as primeiras execuções de obra de MRAF ocorreram no início dos anos 2000, e veio substituindo aos poucos a aplicação de misturas a quente em manutenção de pavimentos asfálticos.

No Brasil, as primeiras aplicações de MRAF ocorreram no ano de 1994 em trechos sob jurisdição do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER-RS). Segundo a ABEDA (2010), o primeiro trecho de rodovia de alto volume de tráfego devidamente monitorado pelo DNIT ocorreu no ano de 1997. Nesse mesmo ano, foi construído no estado de São Paulo um trecho experimental na rodovia Presidente Dutra.

A partir dessa experiência, o MRAF passou a ganhar destaque no cenário brasileiro, despertando o interesse dos órgãos rodoviários em adotá-lo em larga escala nos anos seguintes. Os resultados obtidos nesse trecho experimental foram considerados satisfatórios comparando-se com outras técnicas de manutenção de pavimentos como o TSD, constatando-se, também, a efetividade econômica do MRAF em garantir um acréscimo de vida útil ao pavimento.

As boas condições de suporte das rodovias concedidas do estado de São Paulo aliadas à necessidade da reabilitação funcional das mesmas impulsionaram o crescimento do MRAF no Estado. Entre os anos de 1998 e 2002, foram executados cerca de 15.000.000 metros quadrados de MRAF nas estradas paulistas, o que equivale a mais de 4.100 km de faixa (ABEDA, 2010). Vale e Suzuki (2004) relatam que o MRAF tem se destacado no país como uma técnica de reabilitação de pavimentos que apresenta bons resultados em suas aplicações, oferecendo um pavimento durável e resistente às solicitações do tráfego.

Na região Nordeste do Brasil, de acordo com dados fornecidos pela empreiteira TECNOPAV, entre os anos de 2006 e 2010, foram executados pouco mais de 16.000.000 de metros quadrados (aproximadamente 4600 km de faixa) de MRAF nas estradas dessa região, mais especificamente nos estados da Paraíba, Piauí e Rio Grande do Norte. Nos últimos 2 anos, no estado do Ceará, foram aplicados cerca de 450 km de MRAF em rodovias estaduais de acordo com informações levantadas em projetos de CREMA.

Vale (2003) estudou a técnica do MRAF através da realização de ensaios laboratoriais e do acompanhamento do desempenho em campo por meio do monitoramento de trechos construídos em rodovias do estado de São Paulo. Nesse trabalho, o autor concluiu que o MRAF, quando aplicado e projetado de forma correta, permite que as características de aderência e de prevenção de afundamento de trilhas de roda sejam melhoradas. Além disso, o autor ainda ressaltou que a qualidade dos materiais empregados, em especial dos agregados e da emulsão asfáltica, é fator decisivo para o sucesso de suas aplicações.

Reis (2005) avaliou o desempenho de misturas do tipo MRAF utilizando três faixas granulométricas distintas e avaliou o comportamento dos corpos de prova quanto ao deslocamento lateral e vertical, submetidos a um carregamento através de um simulador de tráfego de pequeno porte. Nesse trabalho, o autor concluiu que os corpos de prova moldados utilizando os agregados na faixa III do DNIT foram os que apresentaram os piores resultados, ultrapassando os limites estabelecidos nas normas no que tange ao deslocamento lateral e vertical dos mesmos quando submetidos à carga aplicada pelo simulador.

Silva *et al.* (2009) utilizaram o MRAF para corrigir defeitos funcionais da rodovia estadual ES-440. Nessa rodovia, verificou-se o intenso tráfego de caminhões devido à existência de poços de petróleo da Petrobras na região, situada próximo ao Porto de Regência-ES. O MRAF foi escolhido para essa situação devido à sua rápida liberação ao tráfego, pois uma possível interdição por um período mais prolongado da rodovia geraria prejuízos para o tráfego local.

2.2.3 Principais Aplicações do MRAF

O MRAF é geralmente aplicado nas seguintes situações: selagem de trincas, manutenção de superfícies oxidadas, ausência de aderência entre pneu e pavimento, impermeabilização do pavimento, revitalização de superfícies desgastadas e preenchimento de trilhas de roda. O MRAF também pode ser utilizado como camada intermediária para retardamento do processo de reflexão de trincas e para o preenchimento de panelas, mas nesse caso somente quando a profundidade das mesmas for pequena.

De acordo com Hein *et al.* (2003) e o *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA), o MRAF pode ser empregado, como alternativa às misturas asfálticas a quente, para corrigir problemas de afundamentos de trilha de roda (ATR). Porém, segundo Ceratti e Reis (2011), é possível corrigir problemas de ATR com profundidades de até 40mm, desde que seja utilizada uma caixa distribuidora especial com dois compartimentos separados

(Figura 3), onde o MRAF é somente aplicado nos locais onde houve o afundamento. Vale ressaltar que essa técnica é aplicada somente para corrigir problemas que ocorrem com a camada asfáltica, não sendo recomendado seu emprego quando o afundamento ocorre por consolidação da base. Vale ressaltar também que para esse caso o tempo de liberação ao tráfego é maior, podendo chegar a 3 horas.

Figura 3 – Aplicação de MRAF para preenchimento de ATR



Fonte: Ceratti e Reis (2011)

De acordo com a FHWA (1994), o MRAF também é aplicado sobre pavimentos rígidos e sobre pontes e viadutos. Nesses casos, faz-se esse tipo de intervenção com o intuito de melhorar o coeficiente de atrito da superfície e regularizar possíveis depressões longitudinais criadas pela carga imposta por pneus de veículos pesados.

O MRAF tem como funções estabelecer as condições ideais da superfície de rolamento, eliminar a perda do material pétreo do pavimento desgastado e retardar a reflexão de trincas, prolongando a vida útil do pavimento desgastado. De acordo com Uhlman *et al.* (2010), o emprego do MRAF na manutenção de pavimentos é considerado um sistema ecologicamente correto, gerando uma redução no consumo energético de até 40% quando comparado com soluções que utilizam misturas a quente. No caso dessas soluções, há a necessidade do aquecimento do ligante e dos agregados e nesse processo de aquecimento ocorre liberação de gases tóxicos para a atmosfera provenientes da queima de combustível.

No Brasil, tem-se utilizado o MRAF para outras finalidades, porém ainda em caráter experimental e sem um monitoramento adequado para aferir a eficácia dessas aplicações. Além de ser uma técnica de revitalização de pavimentos já consagrada no mundo e em expansão no Brasil, nos últimos anos o MRAF vem sendo empregado também na pavimentação de rodovias, principalmente em alguns estados da região Nordeste do país.

Castro (2011) relata que já ocorreram casos onde o MRAF foi aplicado diretamente sobre base imprimada em um trecho de 18 km situado no litoral do Rio Grande do Norte. O trecho foi executado no ano de 2007 e liga a praia de Ponta do Mel à praia de Porto do Mangue, conforme ilustrado na Figura 4. Relatos atuais indicam que o trecho se encontra em boas condições de trafegabilidade atualmente.

Figura 4 – Aplicação do MRAF sobre base imprimada no estado do Rio Grande do Norte



Fonte: Castro (2011)

Castro (2011) também comenta sobre a construção de um pavimento situado no interior do estado da Paraíba sendo realizada com MRAF sobre uma camada de TSD, ligando as cidades de Mamaguape e Araçagi (ver Figura 5). A execução do mesmo ocorreu no início do ano de 2011 e possui uma extensão aproximada de 30 km, porém ainda não se tem relatos sobre a eficácia dessa experiência da aplicação de MRAF sobre o TSD.

Figura 5 – Aplicação do MRAF na Paraíba



Fonte: Castro (2011)

O MRAF também é utilizado na revitalização de pistas de aeroportos. Além de conferir bom acabamento superficial, a aplicação desse revestimento nessas situações se deve às características de macro e microtextura, conferindo um bom coeficiente de atrito e boa

drenabilidade, garantindo uma operação segura para aeronaves. Um exemplo dessa aplicação foi a aplicação do MRAF no aeroporto de Iguatu-CE, ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Aplicação do MRAF em pistas de aeroportos



Fonte: Castro (2011)

2.2.4 Materiais Empregados no MRAF

2.2.4.1 Agregados

Os agregados constituem cerca de 90 a 95% em peso do MRAF. Para garantir uma boa durabilidade do revestimento, a qualidade dos agregados empregados é fator relevante. Portanto, deve-se ter o cuidado de selecionar agregados de qualidade, enquadrados em todos os padrões das normas, para garantir que a mistura tenha o comportamento esperado. Segundo a FHWA (1994), os agregados devem ser 100% britados, limpos, com partículas de boa durabilidade, areia e impurezas que possam afetar a mistura e a aplicação. Preferencialmente, os agregados devem ter formas angulares e não possuir partículas muito alongadas.

De acordo com a especificação do DNIT ES 035/2005, o MRAF pode conter agregados, pó de pedra ou os dois agregados misturados, mas desde que sejam resistentes, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Os agregados devem apresentar as seguintes características: desgaste Los Angeles (DNER – ME 035/98) igual ou inferior a 40%, durabilidade com perda inferior a 12% (DNER – ME 089/94) e equivalente de areia igual ou superior a 60% (DNER – ME 054/97).

A ISSA A-143 (2010) é mais conservadora quando comparada aos limites dos ensaios citados acima, pois a mesma estabelece limites de 30% para o desgaste Los Angeles e para o equivalente de areia o valor mínimo de 65%. Outros ensaios também são

recomendados com a finalidade de realizar uma caracterização completa dos agregados que serão empregados na mistura tais como: índice de forma (DNER – ME 086/94), densidade (DNER – ME 084/95) e azul de metileno (NBR 14949/2003).

VALE (2003) recomenda que os ensaios citados no parágrafo anterior sejam realizados também durante a execução da obra. Em alguns casos pode ocorrer variação na composição do agregado e na natureza química, mesmo mantendo-se o local de sua extração. Qualquer mudança na composição dos agregados pode influenciar diretamente o comportamento do MRAF, podendo apresentar resultados diferentes dos previstos em laboratório ou no projeto.

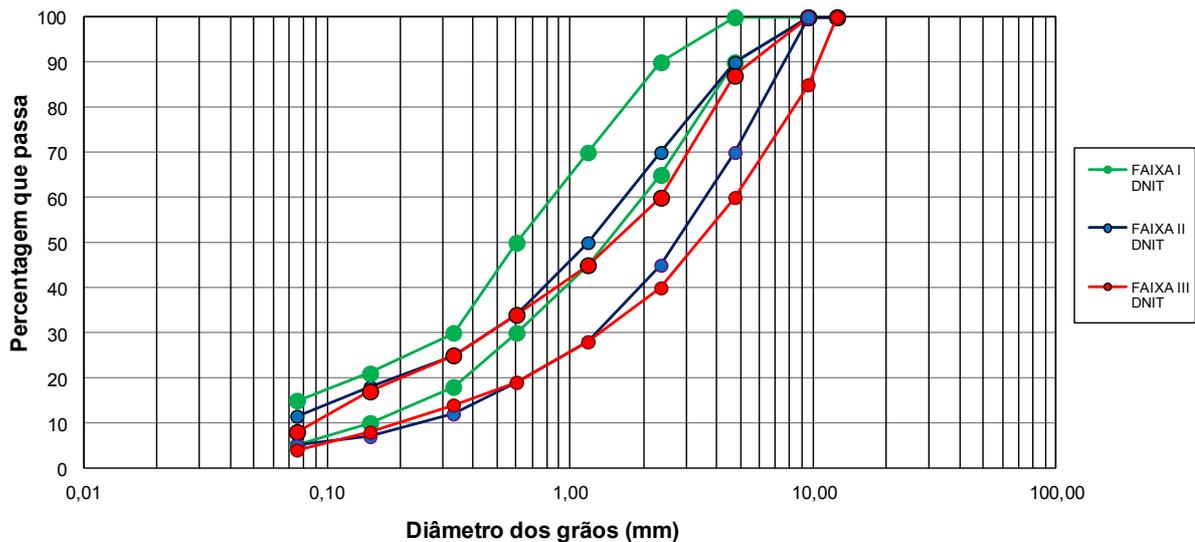
Ressalta-se que a presença de quantidade em excesso de contaminantes nos agregados, tais como argila e impurezas, pode causar problemas na aplicação do MRAF. Os materiais não desejáveis podem alterar o tempo de ruptura da emulsão, podendo em alguns casos inviabilizar a execução da obra. Para a seleção da dimensão dos agregados a serem utilizados no MRAF, a especificação do DNIT contempla três faixas granulométricas possíveis para serem utilizadas, correspondentes às três faixas adotadas pela ISSA, como pode ser observado na Tabela 1 e na Figura 7.

Tabela 1 – Faixas granulométricas para MRAF

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

Fonte: DNIT ES 035/2005, ISSA A-143 /2010 e OPSS 336/2009

Figura 7 – Faixas granulométricas do DNIT para o MRAF



Fonte: Castro (2011)

De acordo com Santo e Reis (1999), a escolha da faixa granulométrica muda conforme a utilização do MRAF. No caso de uma graduação mais fina, como a da faixa I do DNIT, geralmente é aplicada sobre superfície de pavimentos envelhecidos trincados visando restabelecer suas características impermeabilizantes. Nos casos de pavimentos com superfícies desgastadas e com problemas de aderência pneu-pavimento, empregam-se graduações mais grossas e agregados com maior dureza, restabelecendo as condições originais do pavimento.

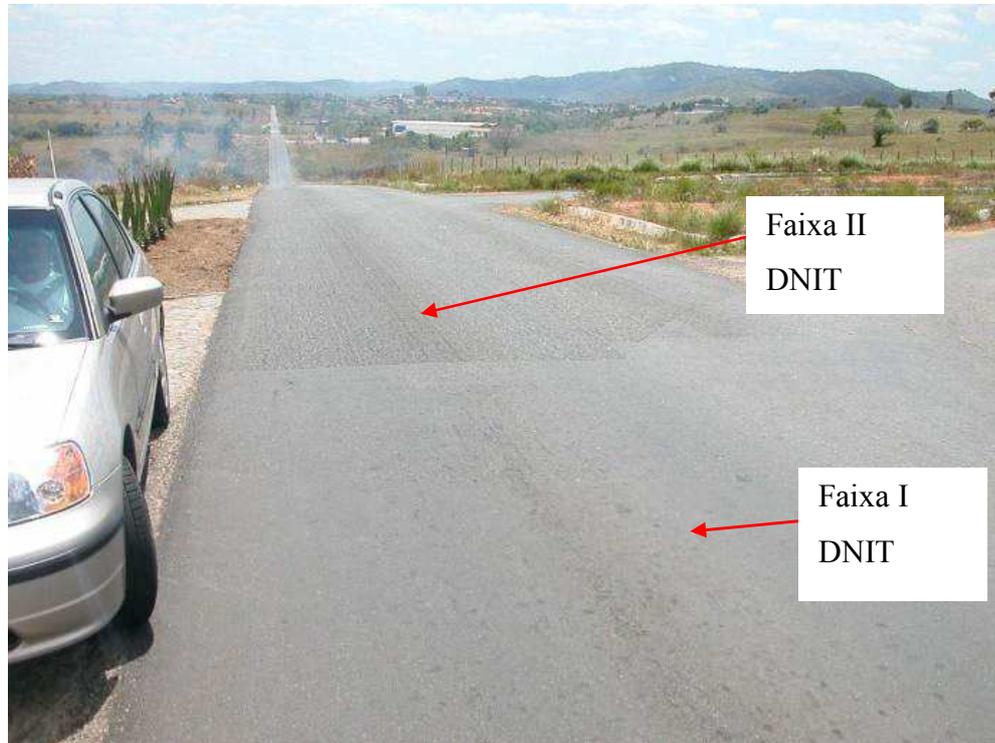
Segundo a especificação DNIT-ES 035/2005, recomenda-se utilizar a faixa I em vias urbanas, residenciais e aeroportos. Não recomenda-se essa faixa quando a aplicação for somente em uma camada para rodovias de alto volume de tráfego. Nesse caso, recomenda-se a aplicação de duas camadas de MRAF, utilizando na primeira camada agregados enquadrados na faixa II e a segunda na faixa I, garantindo uma boa aderência da nova camada ao pavimento existente e conferindo um bom acabamento superficial.

A faixa II é mais aplicada em rodovias de tráfego maior e em áreas que possuem grande amplitude térmica. Essa graduação confere ao pavimento uma superfície com coeficiente de atrito elevado (SANTO e REIS, 1999). A faixa III proporciona uma melhor macrotextura comparada com as outras faixas granulométricas. Aplica-se esta faixa em regularizações ou restaurações superficiais sobre base granulares, pavimentos fresados ou em pavimentos com elevado desgaste. Entretanto, Santo e Reis (1999) ressaltam que no caso de aplicação sobre bases, a imprimação da camada deve ser realizada antes da aplicação do MRAF.

De acordo com Castro (2011), no estado do Ceará, a faixa mais utilizada é a faixa II, representando cerca de 80% das aplicações de MRAF. Atualmente, essa tendência

continua, sendo grande parte dos projetos executados utilizando granulometria enquadrada na faixa II. A Figura 8 ilustra a execução de um trecho com duas faixas distintas. Pode-se observar que a faixa I apresenta uma textura mais lisa e a faixa II mais rugosa.

Figura 8 – Trecho de MRAF executado com faixa I e faixa II do DNIT



Fonte: Castro (2011)

Segundo Santo e Reis (1999), algumas patologias causadas por agregados podem ocorrer em execução de obras de MRAF. A Tabela 2 mostra algumas causas e possíveis efeitos relacionados a esse tipo de material.

Tabela 2 - Defeitos originados pelos agregados

CAUSAS	POSSÍVEIS EFEITOS	CONTROLES
<ul style="list-style-type: none"> Falta de Finos 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa consistência da mistura com possíveis escurecimentos da água ou emulsão. Mistura fluida. Tempo de ruptura elevado. Migrações de ligante para a superfície e em consequência falta de adesão à base (ou substrato). Desprendimento de material graúdo. 	<ul style="list-style-type: none"> Granulometria: passada na peneira nº 200.
<ul style="list-style-type: none"> Excesso de Finos 	<ul style="list-style-type: none"> Velocidade de ruptura rápida. Surgimento de estrias no sentido transversal em toda a extensão da aplicação. Massa muito consistente dificultando o seu espalhamento. Elevado consumo de aditivo. Má adesão ao substrato (base). 	<ul style="list-style-type: none"> Granulometria: passada na peneira nº 200.
<ul style="list-style-type: none"> Segregação do filer na mistura de agregados 	<ul style="list-style-type: none"> Aparecimento de ranhuras claras na massa espalhada devido à presença de grumos de filer. Aparecimentos de manchas claras localizadas em pontos determinados. Textura irregular. 	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual do monte de agregados. Granulometria dos agregados.
<ul style="list-style-type: none"> Qualidade inadequada dos finos, muito contaminados ou excessivamente finos 	<ul style="list-style-type: none"> Velocidade de ruptura muito rápida. Falta de adesividade. Diferenças na coloração da superfície (manchas ou riscos). Excessivo consumo de aditivo. Má adesão ao substrato (base). 	<ul style="list-style-type: none"> Ensaio da emulsão asfáltica. Granulometria: passada na peneira nº 200. Inspeção visual dos agregados.
<ul style="list-style-type: none"> Qualidade inadequada dos finos, puros ou excessivamente grossos 	<ul style="list-style-type: none"> Velocidade de ruptura lenta. Falta de adesão. Má adesão ao substrato (base) e migração do ligante para a superfície da massa (falsa exsudação). 	<ul style="list-style-type: none"> Ensaio da emulsão asfáltica. Granulometria: passada na peneira nº 200. Inspeção visual dos agregados
<ul style="list-style-type: none"> Contaminação do agregado com outros granulometricamente maiores 	<ul style="list-style-type: none"> Listras longitudinais na massa aplicada. Segregação de agregados graúdos na superfície da massa espalhada. 	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual dos montes de agregados. Verificação da granulometria.

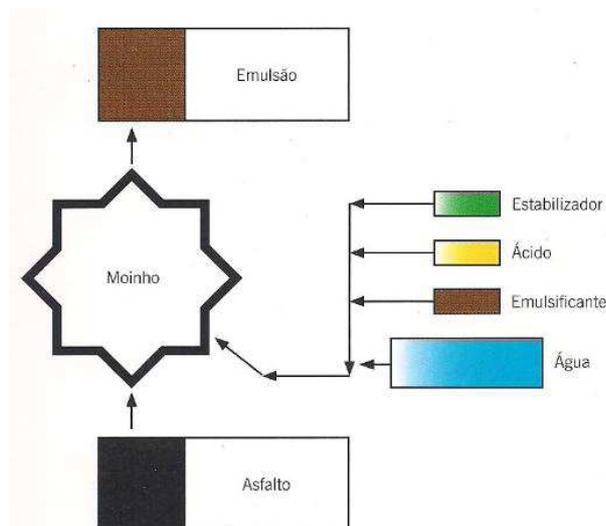
Fonte: Adaptado de Santo e Reis (1999)

2.2.4.2 Emulsão Asfáltica

As emulsões asfálticas são dispersões de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), cisalhados em pequenos glóbulos, água e agentes emulsificantes. Os agentes emulsificantes funcionam como um agente tensoativo, que mantém os glóbulos em uma suspensão estável, tendo como resultado um líquido de coloração marrom e de consistência um pouco maior que a água (ABEDA, 2010).

De acordo com a ABEDA (2010), a composição química das emulsões varia conforme sua utilização, sendo geralmente composta por 30% a 50% de água, 50% a 70% de CAP e de 0,1% a 2,5% de agentes emulsificantes. A quantidade e o tipo de agente emulsificante é que define o tempo de ruptura. A ruptura de uma emulsão é o momento onde ocorre a separação das fases de CAP e da fase aquosa. Pode ser observada uma mudança de coloração da emulsão de marrom para uma cor mais escura. No caso da viscosidade, a quantidade de CAP contido tem influência direta na sua variação. A Figura 9 ilustra de forma resumida o processo de fabricação da emulsão.

Figura 9 – Esquema de produção da emulsão asfáltica



Fonte: ABEDA (2010)

Segundo a especificação DNIT-ES 035/2005, a emulsão para executar o MRAF é do tipo ruptura controlada modificada por polímeros. O tipo e a concentração dos agentes emulsificantes estão diretamente relacionados com a estabilidade da emulsão. Segundo a ISSA A 143 (2010), a quantidade de polímero que a emulsão deve conter é em torno de 3% do peso de asfalto residual. De acordo com Santo e Reis (1999), os asfaltos modificados por polímero começaram a ser comercializados no Brasil por volta do início da década dos anos

90. O tipo de polímero atualmente não é mais especificado. A Tabela 3 mostra as especificações da emulsão do tipo RC1C-E.

Tabela 3 – Especificações da emulsão asfáltica do tipo RC1C-E

NORMAS	ENSAIOS	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO	
		MÍNIMO	MÁXIMO
NBR 14491 (2000)	Viscosidade Saybolt Furol 25°C, s	-	70
NBR 6570 (2000)	Sedimentação, 5 dias, % peso	-	5
NBR 14393 (1999)	Peneiração, % peso	-	0,10
NBR 6567 (2000)	Carga de partícula	Positiva	-
NBR 14376 (1999)	Resíduo seco, % peso	62	-
NBR 6299 (1999)	Determinação de Ph	-	6,5
ENSAIOS NO RESÍDUO ASFÁLTICO			
NBR 6576 (1998)	Determinação da Penetração (0,1mm)	45	150
NBR 6560 (2000)	Ponto de amolecimento, °C	55	-
NBR 15086 (2006)	Recuperação elástica (%)	70	-

Fonte: DNIT-ES 128/2010

Segundo Santo e Reis (1999), alguns defeitos causados pela emulsão asfáltica podem surgir no MRAF. A Tabela 4 mostra algumas causas e possíveis efeitos.

Tabela 4 – Defeitos originados pela emulsão

CAUSAS	POSSÍVEIS EFEITOS	CONTROLES
<ul style="list-style-type: none"> • Emulsão com baixa estabilidade química 	<ul style="list-style-type: none"> • Rupturas parciais da mistura com formação de grumos. • Excessivo consumo de aditivo. • Má adesão ao substrato (base). 	<ul style="list-style-type: none"> • Com emulsão aniônica: mistura com cimento. • Com emulsão catiônica: tempo de fluidez.
<ul style="list-style-type: none"> • Emulsão com alta estabilidade química 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de ruptura muito lenta. • Escorrimento da emulsão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Com emulsão aniônica: mistura com cimento. • Com emulsão catiônica: tempo de fluidez.
<ul style="list-style-type: none"> • Emulsão com sedimentação 	<ul style="list-style-type: none"> • Diferenças de coloração no espalhamento de massa por teor diferente de ligante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção visual do tanque de armazenamento.
<ul style="list-style-type: none"> • Emulsão com peneira 	<ul style="list-style-type: none"> • Entupimento em bombas e filtros dos usina aplicadora. • Formação de sedimentos ou nata insolúveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de peneiramento. • Inspeção visual do tanque de armazenamento.
<ul style="list-style-type: none"> • Emprego de emulsão quente 	<ul style="list-style-type: none"> • Prematura ruptura da emulsão da mistura. • Má adesão ao substrato (base). 	<ul style="list-style-type: none"> • Medição da temperatura da emulsão antes da aplicação.
<ul style="list-style-type: none"> • Inadequado conteúdo de ligante 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta ou excesso de ligante na mistura com suas correspondentes consequências. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de resíduo asfáltico por evaporação.

Fonte: adaptado de Santo e Reis (1999)

2.2.4.3 Material de Enchimento ou Fíler

Segundo a especificação do DNIT ES 035/2005, o fíler deve ser constituído por materiais finamente divididos, não plásticos, secos e isentos de grumos. Como exemplo de materiais empregados tem-se o cimento Portland e a cal. A adição de fíler tem o intuito de minimizar a segregação do agregado e o afloramento do ligante, melhorar a coesão da massa e auxiliar na graduação do MRAF. O fíler também é responsável por alterar o tempo de ruptura da emulsão. O tipo de fíler mais empregado no Brasil é o cimento Portland do tipo CP-II, o mesmo utilizado na construção civil.

De acordo com a ISSA A-143 (2010), determinou-se como quantidade máxima de fíler o valor de 3% em relação ao peso do agregado. Teores acima do limite máximo provocam uma rigidez excessiva da massa, tornando-a quebradiça e favorecendo o surgimento de trincas no pavimento. Entretanto, Vale (2003) relata que o teor de fíler pode ser alterado em até 1% em relação ao valor determinado em projeto quando for necessário realizar ajustes no tempo de ruptura da emulsão. A composição granulométrica utilizada para materiais de enchimento está representada na Tabela 5.

Tabela 5 – Granulometria do material de enchimento (fíler)

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		% QUE PASSA
ABNT	Abertura (mm)	
Nº 40	0,42	100
Nº 80	0,18	95-100
Nº 200	0,075	65-100

Fonte: DNER-ES 389/99

2.2.4.4 Água

De acordo com a FHWA (1994) e a especificação DNIT – ES 035/2005, a água utilizada no MRAF deve ser limpa, isenta de matéria orgânica, óleos e outras substâncias prejudiciais à ruptura da emulsão asfáltica. No processo de mistura, a quantidade de água a ser empregada deve ser suficiente para promover uma consistência adequada.

Geralmente, a teor de água necessário para realizar a mistura dos componentes do MRAF está situada entre 4% e 12% do peso do agregado seco. Dependendo das condições meteorológicas e da taxa de absorção do agregado, ajusta-se esse teor de água de molhagem.

Em dias mais frios e úmidos, são aplicadas teores menores enquanto as taxas elevadas são aplicadas em dias de temperaturas maiores.

Teores reduzidos de água torna o MRAF difícil de espalhar na pista, além de dificultar a adesão da massa sobre a superfície do pavimento existente. Em caso de excesso de água, o MRAF adquire uma consistência muito fluida, ocasionando em segregação dos agregados e exsudação, prejudicando o seu desempenho e diminuindo a segurança dos usuários (FHWA, 1994; ABEDA, 2010).

2.2.4.5 Aditivos

Segundo a ISSA A 143 (2010), os aditivos são empregados no MRAF com o único intuito de acelerar ou retardar o tempo de ruptura da emulsão asfáltica. Entretanto, seu emprego nem sempre será necessário. A necessidade de aplicação do mesmo depende de ensaios que serão realizados em laboratório para verificar sua compatibilidade com os materiais que compõem o MRAF.

Geralmente, emprega-se aditivos para retardar o tempo de ruptura. Com relação à sua composição química, não existem restrições estabelecidas pelos órgãos rodoviários. A quantidade de aditivo adicionada na mistura varia entre 0% e 2%. Em dias mais frios, a quantidade de aditivo requerida é mínima ou não é necessária a utilização do mesmo devido ao tempo de ruptura da emulsão, nessas situações, ser maior (FHWA, 1994).

2.2.4.6 Fibras

As fibras são incorporadas ao MRAF com o intuito de proporcionar maior flexibilidade ao revestimento, tornando-o mais resistente à ruptura por fadiga. Segundo Santo e Reis (1999), o MRAF que possui fibras apresenta melhor comportamento quando aplicado sobre pavimentos trincados, retardando intervenções de reforço estrutural. As fibras podem ser de origem orgânica ou inorgânica. Os tipos mais comuns de fibras utilizadas são: de vidro, de poliéster, acrílica e de polipropileno.

O MRAF adicionado de fibras apresenta bom comportamento em regiões de grandes amplitudes térmicas devido à melhora das propriedades reológicas do ligante. Além disso, nota-se um ganho na resistência mecânica e um aumento da flexibilidade do pavimento. As fibras exercem uma ação de microarmadura que, juntamente com a emulsão modificada

por polímeros, aumentam a coesão do sistema, proporcionando ganhos na resistência à tração e ao cisalhamento (SANTO e REIS, 1999).

2.2.5 Projeto e Dosagem do MRAF

Segundo Vale (2003), o projeto do MRAF consiste em selecionar os materiais adequados, determinando a quantidade de cada material a ser empregado. Como o revestimento tem somente a função de recuperação funcional da rodovia, não é necessário um dimensionamento estrutural para a mistura, uma vez que já são padronizadas as espessuras de acordo com a quantidade de camadas a serem aplicadas. Já os teores de aditivos e água devem ser selecionados de acordo com a qualidade dos materiais e condições climáticas do local onde será executado a obra.

Assim como para qualquer revestimento asfáltico, o emprego de materiais de qualidade é fator decisivo no sucesso da execução de obras rodoviárias. Agregados de baixa qualidade, com altos teores de argila e impurezas, são incompatíveis com a emulsão asfáltica, impactando diretamente no tempo de ruptura da mesma. Nesses casos é necessário a utilização de aditivos em maior quantidade que, devido ao seu alto custo, acabam por inviabilizar o emprego da técnica.

Segundo a norma NBR 14948 (2003) e a ISSA A-143 (2010), para realizar corretamente um projeto de MRAF são necessários a realização de alguns ensaios laboratoriais com o intuito de verificar o comportamento e a compatibilidade entre os materiais selecionados. A metodologia de dosagem está descrita no Capítulo 3 desta dissertação. A Tabela 6 mostra os ensaios utilizados para realizar o projeto e a dosagem do MRAF.

Tabela 6– Ensaios para projeto e dosagem do MRAF

ENSAIOS	NORMAS	ESPECIFICAÇÃO
Tempo mínimo de misturação	TB-113 (1990) NBR-14758 (2001)	120 seg. (mínimo)
Determinação da adesividade	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	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: ISSA A-143(2010) e NBR 14948 (2003)

A especificação DNIT (DNIT-ES 035/2005) estabelece limites para os teores de asfalto residual, polímeros, fíler, taxa de agregados e espessura de camadas conforme mostrado na Tabela 7. Os intervalos dos teores de asfalto residual mostrados na Tabela 7 são correspondentes às três faixas granulométricas empregadas no MRAF.

Tabela 7 – Especificações de quantidade de material para MRAF

ITENS	UNID.	FAIXA I	FAIXA II	FAIXA III	TOLERÂNCIA
Asfalto residual	% em peso do agregado	7,5-13,5	6,5-12,0	5,5-7,5	±2
Fíler	% em peso do agregado	0-3	0-3	0-3	±0,3
Polímeros	% em peso do asfalto residual	3% mín	3% mín	3% mín	-
Taxa de aplicação	kg/m ²	5-19	8-16	15-30	-
Espessura	mm	4-15	6-20	12-37	
Utilização		Áreas urbanas e aeroportos	Rodovias de tráfego pesado e trilhas de roda	Regularização de rodovias de tráfego pesado	

Fonte: DNIT-ES 035/2005

O teste de pH também é realizado. Realiza-se esse procedimento para monitorar o pH da água que é expulsa da massa recém fabricada durante o processo de ruptura da emulsão. Após a ruptura, espera-se que ocorra uma mudança de pH de 2 para 10. Além disso, realiza-se essa aferição em campo para verificar se o processo de cura da massa está de acordo com o esperado (FHWA, 1994).

Segundo Santo e Reis (1999), alguns defeitos causados pela dosagem incorreta da mistura podem surgir no MRAF. A Tabela 8 mostra algumas causas e possíveis efeitos relacionados à dosagem ineficiente, bem como a forma de controlar esse tipo de problema.

Tabela 8 – Defeitos originados pela dosagem

CAUSAS	POSSÍVEIS EFEITOS	CONTROLES
<ul style="list-style-type: none"> Excesso de aditivo ou emprego de aditivo inadequado 	<ul style="list-style-type: none"> Má adesividade. Má coesão a curto prazo. Velocidade de ruptura lenta. 	<ul style="list-style-type: none"> Verificação da quantidade de aditivo em laboratório.
<ul style="list-style-type: none"> Quantidade inadequada de aditivo ou emprego de aditivo inadequado 	<ul style="list-style-type: none"> Ruptura prematura. Mistura com pouca trabalhabilidade. Rupturas parciais de massa espalhada com falta de homogeneização adequada. 	<ul style="list-style-type: none"> Verificação da quantidade de aditivo em laboratório.
<ul style="list-style-type: none"> Excesso de água de molhagem 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa consistência da mistura (muito fluida). Migração superficial de água ou emulsão da mistura espalhada. Diminuição da resistência ao desgaste. Desprendimento de partículas grossas. Diferenças de coloração. Baixas taxas de aplicação da mistura. 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar o bom funcionamento do sistema de dosagem de água. Verificação da umidade dos agregados utilizados. Baixa absorção de água pelos agregados.
<ul style="list-style-type: none"> Falta de água de molhagem 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de homogeneidade da mistura (má trabalhabilidade). Altas taxas de aplicação da mistura. Má adesão ao substrato (base). 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar o bom funcionamento do sistema de dosagem de água. Verificação da umidade dos agregados utilizados. Alta absorção de água pelos agregados.

Fonte: Santo e Reis (1999)

2.2.6 Método Executivo

A execução do MRAF consiste no espalhamento da massa fluida sobre superfícies de revestimentos asfálticos desgastados, com fissuras consolidadas e superfícies com baixo coeficiente de atrito. Segundo a especificação do DNIT (DNIT ES 035/2005), a aplicação do

MRAF é realizada a uma velocidade constante, sendo a mais reduzida possível. A velocidade de deslocamento da usina de aplicação da mistura é em torno de 6 km/h.

Durante o processo de execução do MRAF, a consistência da massa deve ser mantida de tal forma que o espalhamento da mesma ocorra de maneira uniforme. Esse controle é realizado pelo operador da usina, controlando a vazão da água de molhagem. O procedimento de mistura e aplicação do revestimento é realizado por um equipamento apropriado, sendo a interferência humana reduzida. Entretanto, a qualidade do serviço está diretamente ligada à calibração do equipamento, de modo que a dosagem do MRAF seja feita corretamente durante a execução.

Mudanças climáticas também devem ser observadas com atenção, requerendo atenção dos engenheiros e encarregados responsáveis pela aplicação do MRAF. Assim como atestado em testes de laboratório, mudanças na temperatura ambiente e na umidade do ar também interferem nas condições de usinagem do MRAF. Em dias de temperaturas elevadas, sabe-se que o tempo de ruptura da emulsão asfáltica é reduzido. Nesses casos, deve-se aumentar o teor de água na mistura ou adicionar aditivos. Em dias mais frios, ocorre o inverso, o tempo de ruptura da emulsão aumenta, tendo-se que reduzir a quantidade de água ou aditivos. Santo e Reis (1999) mostram, através da Tabela 9, alguns possíveis defeitos que ocorrem durante a aplicação do MRAF devido à mudanças no clima.

Tabela 9 – Defeitos originados pelo clima

CAUSAS	POSSÍVEIS EFEITOS	CONTROLES
<ul style="list-style-type: none"> • Chuva 	<ul style="list-style-type: none"> • Molhagem dos agregados proporcionando misturas de ruptura lenta. Lavagem da mistura aplicada em processo de ruptura. • Diferença de coloração. • Segregação dos agregados em montes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar condições meteorológicas antes de iniciar o serviço.
<ul style="list-style-type: none"> • Clima quente 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de ruptura alta. • Migrações do ligante da superfície com ruptura superficial do mesmo. • Má adesão ao substrato (base). 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar condições meteorológicas antes de iniciar o serviço.
<ul style="list-style-type: none"> • Clima frio 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de ruptura lenta da emulsão, ocasionando demora da liberação da pista ao tráfego. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar condições meteorológicas antes de iniciar o serviço.

Fonte: Santo e Reis (1999)

Antes de se iniciar a obra, o pavimento sobre o qual será aplicado a camada de MRAF deverá ser limpo, retirando-se todas as impurezas existentes. Além de dificultar a adesão da nova camada de revestimento aplicada, o excesso de impurezas pode reduzir o

tempo de ruptura da emulsão, dificultando o espalhamento da massa. A limpeza pode ser feita manualmente (Figura 10) ou mecanicamente. Em dias muito quentes, a superfície do pavimento pode ser umedecida (Figura 11), reduzindo sua temperatura, evitando a ruptura prematura da emulsão.

Figura 10 – Remoção manual de impurezas do pavimento



Fonte: Castro (2011)

Figura 11 – Umedecimento do pavimento antes da aplicação do MRAF



Fonte: Castro (2011)

Reis (2005) comenta que devem ser tomadas outras ações previamente à aplicação do MRAF. Alguns defeitos do pavimento devem ser corrigidos como selagem de fissuras e correções de pequenas deformações existentes (Figura 12). A retirada de elementos de sinalização, tais como os tachões refletivos, deve ser realizada conforme ilustrado na Figura 2.13.

Figura 12 – Correções de pequenos defeitos superficiais



Fonte: Castro (2011)

Figura 13 – Elementos rodoviários a serem retirados antes da execução do MRAF



Fonte: Castro (2011)

Santo e Reis (1999) listam alguns problemas executivos que podem ocorrer causados pelo estado do pavimento existente. A Tabela 10 mostra algumas causas e possíveis efeitos relacionados a esse problema.

Tabela 10 – Defeitos originados pelo estado do pavimento

CAUSAS	POSSÍVEIS EFEITOS	CONTROLES
<ul style="list-style-type: none"> • Agregados soltos na superfície a ser tratada 	<ul style="list-style-type: none"> • Estrias longitudinais no espalhamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Varrição da superfície.
<ul style="list-style-type: none"> • Deformações superficiais do revestimento asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogeneidade na quantidade de massa aplicada. • Heterogeneidade no processo de aquisição das propriedades normais da mistura espalhada. • Heterogeneidade de texturas. • Diferença de coloração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regularização da superfície.
<ul style="list-style-type: none"> • Pavimento com exsudações 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparecimento de novas exsudações. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção visual. • Determinação do teor de ligante.
<ul style="list-style-type: none"> • Pavimento sujo e/ou quente 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de aderência da mistura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Varrição da superfície.
<ul style="list-style-type: none"> • Pavimento polido 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de aplicação baixa. • Baixa aderência ao substrato. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar granulometria.

Fonte: Santo e Reis (1999)

A aplicação do MRAF é realizada por uma usina móvel específica para executar o MRAF. Segundo o DNIT (DNIT-ES 035/2005), o equipamento deve ter as seguintes características:

- silo para agregado miúdo;
- depósitos separados para água, emulsão asfáltica e aditivos controladores do tempo de ruptura;
- depósito para material de enchimento (filer), com alimentador automático;
- sistema de circulação e alimentação do ligante asfáltico, interligado por acoplagem direta ou não, com sistema de alimentação do agregado miúdo, de modo a assegurar perfeito controle do traço;
- sistema misturador capaz de processar uma mistura uniforme e de despejar a massa diretamente sobre a pista, em operação contínua, sem processo de segregação;
- chassi – todo o conjunto descrito nos itens anteriores é montado sobre um chassi móvel autopropulsado, atrelado a um cavalo mecânico ou trator de pneus;
- caixa distribuidora – peça apoiada diretamente sobre o pavimento atrelada ao chassi. Essa peça deve ter largura regulável até 3,50m e ser suficientemente pesada para garantir a uniformidade de distribuição e bom acabamento da superfície. A Figura 14 ilustra uma usina de MRAF no campo.

Figura 14 – Usina móvel de MRAF atrelada a um cavalo mecânico



Fonte: Castro (2011)

A usina de MRAF possui silos para armazenamento de todos os materiais que compõem o revestimento. Os silos para armazenamento dos agregados (Figura 15), filer (Figura 16) e tanques de água, emulsão e aditivos (Figura 17) são carregados manualmente antes do início de cada aplicação do revestimento.

Figura 15 – Silo para armazenamento dos agregados



Fonte: Castro (2011)

Figura 16 – Silo para armazenamento do filer



Fonte: Castro (2011)

Figura 17 – Tanques de armazenamento de emulsão, água e aditivos



Fonte: Castro (2011)

A mistura dos materiais ocorre na própria usina por um equipamento denominado misturador (Figura 18). Os materiais depositados são homogeneizados até garantir uma uniformidade da massa. O misturador está situado na parte traseira da usina. Vale (2003) comenta que o tempo de mistura dos materiais ocorre em um período de 5 a 10 segundos a uma velocidade de 300 RPM. Tempos excessivos de mistura podem causar uma segregação do ligante e do agregado.

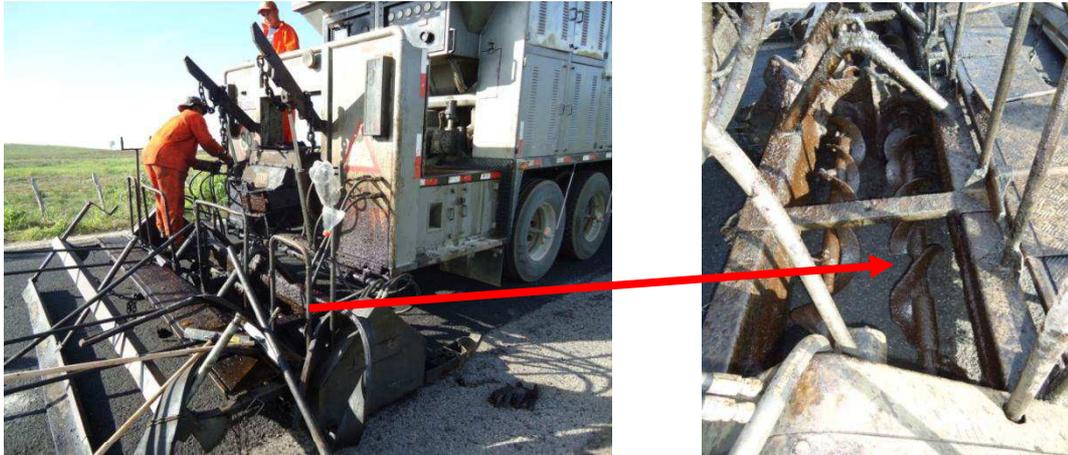
Figura 18 – Misturador da usina de MRAF



Fonte: Castro (2011)

Finalizado esse procedimento, o MRAF com consistência fluida é despejado na caixa distribuidora, situada também na parte traseira da usina (Figura 19). Nesse local ocorre a distribuição da massa no pavimento. A caixa distribuidora possui uma vedação nas extremidades laterais, confinando a massa na largura compatível com a faixa a ser pavimentada. No interior da caixa estão posicionados dois eixos metálicos compostos de helicóides que rotacionam em sentidos opostos. Esses dois eixos auxiliam na homogeneização do MRAF e no preenchimento completo da caixa, garantindo uma uniformidade de distribuição da mistura no pavimento.

Figura 19 – Caixa distribuidora



Fonte: Castro (2011)

Acoplado à caixa distribuidora está a régua de corte, equipamento que define a espessura da camada de MRAF a ser aplicada (Figura 20). Controla-se a altura dessa régua através de três hastes situadas na caixa distribuidora (Figura 21). Existe ainda uma tira de borracha situada após a caixa distribuidora que confere um acabamento de melhor qualidade ao MRAF (ver novamente a Figura 20). Essa tira visa eliminar possíveis irregularidades que possam surgir no espalhamento da massa.

Figura 20 – Detalhe da régua de corte, hastes reguladoras e tira de borracha



a) régua de corte e tira de borracha

b) hastes reguladoras

Fonte: Castro (2011)

Todo o processo da aplicação do MRAF é controlado pelo operador da usina. Inicialmente procede-se com o carregamento da usina. Como foi citado nos parágrafos anteriores, esse equipamento é dotado de silos e tanques apropriados para armazenar os materiais necessários para a fabricação do MRAF.

Em caso de utilização de filer na composição granulométrica, o DNIT exige que a mistura desses materiais ocorra em uma usina misturadora (ex: usina de solos), visando

garantir que não ocorra a segregação dos agregados. Sabe-se que o problema da segregação impacta diretamente na qualidade da obra e na vida útil do revestimento, devendo a fiscalização da obra ficar atenta para evitar que este problema ocorra durante a execução. Para o caso do emprego de materiais alternativos, objetos de estudo desta pesquisa, recomenda-se também utilizar usina misturadora visando garantir a granulometria definida em laboratório para as aplicações no campo. Em seguida, procede-se com o carregamento dos tanques de água, emulsão e aditivos. Este procedimento de preparação dos materiais e carregamento da usina está ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Carregamento da usina de MRAF



a) carregamento dos agregados

b) abastecimento dos tanques

Fonte: Castro (2011)

Finalizado o deslocamento até o local da aplicação do MRAF, iniciam-se os procedimentos de acionamento da usina para começar a execução. Primeiramente é efetuado o alinhamento e regulagem da caixa distribuidora. O operador da usina regula a altura da mesa que sustenta a caixa distribuidora e controla também a largura da mesma, adaptando-se à largura da faixa da rodovia a ser pavimentada como pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Definição da largura e da altura da caixa distribuidora



Fonte: Castro (2011)

Finalizado o procedimento de posicionamento da caixa distribuidora, são acionados os comandos de bombeamento dos materiais, sendo eles direcionados ao

misturador. Com o auxílio do painel de controle (Figura 23), é possível monitorar todos os parâmetros de funcionamento do equipamento. A dosagem dos materiais definida em projeto é controlada automaticamente através de um painel eletrônico presente na usina. Através desse painel, controla-se a quantidade de cada material que irá compor o MRAF.

Figura 23 – Controle e dosagem da aplicação do MRAF



Fonte: Castro (2011)

Definida a programação da dosagem dos materiais, a usina está pronta para iniciar a execução do MRAF. Através do painel de controle, aciona-se a esteira responsável por transportar os agregados dos silos ao misturador e inicia-se o bombeamento da emulsão, água e aditivos. Após passar pelo misturador, o MRAF é despejado na caixa distribuidora que nesse momento já deve estar com os helicoides acionados para promover o preenchimento uniforme do volume da caixa. Esse procedimento está ilustrado da Figura 24.

Figura 24 – Fabricação do MRAF



a) transporte dos agregados para o misturador

b) MRAF pronto na caixa distribuidora

Fonte: Castro (2011)

Após o preenchimento completo da caixa distribuidora pelo MRAF recém misturado, inicia-se o deslocamento da usina e a aplicação do revestimento. Conforme citado anteriormente, a velocidade média de deslocamento da usina é de aproximadamente 6 km/h. O MRAF recém aplicado possui uma coloração marrom, característica da emulsão asfáltica não rompida. Essa coloração tende a mudar para um tom mais escuro, indicando o rompimento da emulsão. É aconselhado manter uma equipe dotada de rodos e vassouras para realizar eventuais correções de irregularidades na execução com o objetivo de garantir a uniformidade da superfície. A aplicação do MRAF na pista está ilustrada na Figura 25.

Figura 25 – Aplicação do MRAF em campo



a) aplicação do revestimento



b) aspecto geral da coloração pós-aplicação



c) correção de irregularidades na camada

Fonte: Castro (2011)

Quando utilizados materiais de qualidade no MRAF, o tempo médio para liberação ao tráfego é em média de 1 hora após a realização da aplicação. Quando se atinge esse tempo, recomenda-se que uma equipe percorra o trecho executado com a finalidade de verificar se o processo de cura do revestimento está finalizado. Não havendo desprendimento dos agregados ao trafegar sobre o pavimento, autoriza-se a liberação do trecho. A Figura 26 mostra o pavimento sendo liberado ao tráfego após autorização da equipe de campo.

Figura 26 – Liberação do trecho ao tráfego



Fonte: Castro (2011)

Com relação ao controle de qualidade do MRAF no campo, são realizados ensaios nos agregados, no ligante e no revestimento aplicado. Para os agregados, para cada 100 m³ de material que chega ao canteiro de obras, devem ser realizados o controle granulométrico (DNER-ME 083/98) e o ensaio de equivalente de areia (DNER-ME 054/97). No caso do ligante, para cada carregamento de emulsão recebido deve-se realizar os ensaios de resíduo seco, recuperação elástica, ponto de amolecimento e carga da partícula.

Durante a execução do MRAF, a taxa de aplicação deve ser controlada. O controle da taxa da mistura é realizado usualmente pelo método da bandeja. Após conhecida essa taxa, determina-se o teor de ligante residual através do equipamento rotarex ou sohxlet. Após a extração do ligante, a granulometria deve ser verificada com o objetivo de verificar se o mesmo atende ao especificado no projeto.

2.3 Agregado Siderúrgico e seu emprego na pavimentação

A escassez de agregados minerais em algumas regiões do país, principalmente em regiões densamente povoadas, mostra a necessidade de pesquisar novos materiais para substituir o agregado tradicionalmente utilizado. Entretanto, essa mudança não deve causar prejuízos no desempenho dos pavimentos.

A escória de aciaria é um produto que vem ganhando destaque na área da pavimentação, pois sua utilização tem sido bastante pesquisada para finalidades rodoviárias. Atualmente, a escória também é conhecida como Agregado Siderúrgico (AS).

A NBR 5019/2001, define escória como sendo um produto líquido ou pastoso, fabricado durante operações metalúrgicas, geralmente contendo sílica, o que a torna sólida à

temperatura ambiente. De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr), em seu relatório de sustentabilidade de 2012, o aço é composto basicamente de uma liga de ferro e carbono. O ferro é encontrado na crosta terrestre, onde está associado ao oxigênio e à sílica. Já o minério de ferro é considerado um óxido de ferro misturado com areia fina. O carbono é também relativamente abundante na natureza e pode ser encontrado sob diversas formas.

Tavares (2012) relata que o AS tem uma vasta utilização sendo empregado na pavimentação de rodovias, como lastro ferroviário, na produção de peças de concreto, na contenção de encostas, construção de gabiões, em obras de drenagem, fabricação de fertilizantes e corretivos de solo. Essas aplicações visam substituir parcialmente, ou em sua totalidade, a utilização de materiais naturais.

De acordo com Loiola (2009), a siderurgia é dividida em dois ramos: a íntegra, que possui como principais matérias-primas o ferro e o carvão, e a elétrica, que possui como principal matéria prima a sucata ferrosa. O ramo da elétrica é mais utilizado devido ao fato de possuir como matéria-prima um material com um custo reduzido e por ser encontrado em maior quantidade.

Além das vantagens mencionadas, Loiola (2009) relata que o emprego da sucata é benéfico por apresentar características mecânicas superiores quando comparada com outras matérias-primas utilizadas no processo de fabricação do aço. O fato é explicado porque a produção de escórias que utiliza a sucata possui maior quantidade de cobre, níquel, cromo e estanho na composição.

De acordo com Filev (2003), o AS é um subproduto da produção do aço. Esse fato tem como resultado a agregação de elementos que não devem fazer parte da composição do aço. O AS possui em sua composição a presença de óxidos como o CaO e MgO. Esses óxidos possuem uma característica expansiva, devido às reações químicas ocorrentes. As limitações encontradas no material são basicamente: heterogeneidade, alto teor de cal livre e a ausência de atividade hidráulica.

As escórias de aciaria são compostas basicamente por óxidos básicos. Podem ser verificadas alterações na composição do AS produzido em diferentes locais. Essa variação na sua composição química depende da matéria-prima utilizada, com a tecnologia de produção do aço e até mesmo o revestimento do alto forno. Existem basicamente três processos de produção do AS: o convertedor LD, fornos de arco elétrico (EAF) e o Siemens-Martin (Open Heart – OH) (Rohde, 2002; Filev, 2003). Tavares (2012) relata que o AS produzido pelos EAF apresentam diferenças na coloração, sendo mais escura e apresenta grãos com

porosidade maior, enquanto os produzidos pelo convertedor LD apresentam coloração mais clara e textura mais lisa como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Diferenças entre AS produzido em EAF e LD



Fonte: Tavares (2012)

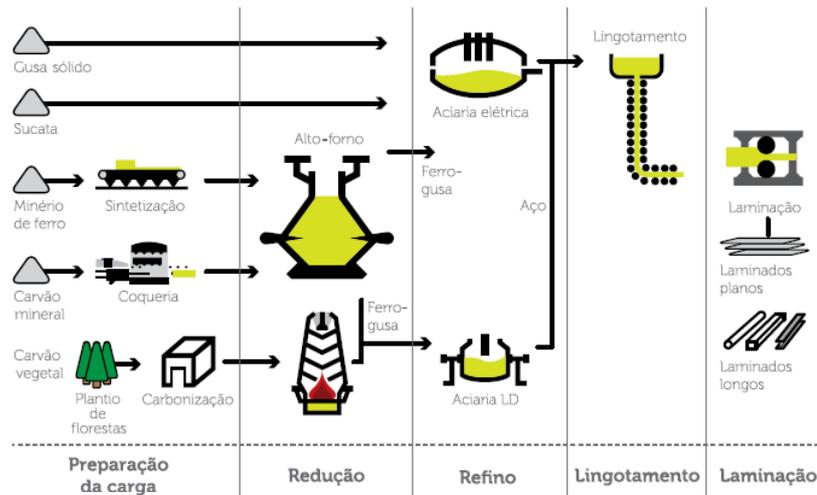
Rocha (2011) também relata que as propriedades físicas e químicas do AS variam de acordo com o processo de produção do aço, do grau metalúrgico do aço produzido e do processamento da própria escória após vazamento. Baseado nisso, as propriedades do AS estão relacionadas ao processo produtivo e ao forno onde é produzido, ocasionando em mudanças na sua composição.

Na siderurgia geralmente utiliza-se o carvão mineral como fonte energética. Cerca de somente 11% da produção do aço é obtida através da queima de carvão vegetal. Aproximadamente 80% do carvão vegetal produzido é oriundo de florestas plantadas por empresas do setor, minimizando os impactos gerados ao meio ambiente. O carvão realiza mais de uma função na fabricação do aço. Como combustível permite alcançar altas temperaturas em torno de 1.500°C necessárias à fusão do minério. Outra função é sua atuação como redutor, associando-se ao oxigênio presente. O oxigênio é liberado do minério devido à alta temperatura. O processo da remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono denomina-se redução e o mesmo ocorre dentro do alto forno (IABr, 2012).

Previamente à etapa da redução, ocorre a preparação da carga. O minério e o carvão são previamente preparados visando maior rendimento e economia do processo. O minério é transformado em pelotas e o carvão é destilado, para obtenção do coque. 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 (IABr, 2012).

A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas e adições. A última fase do processo de fabricação do aço é a 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. (IABr, 2012). A Figura 28 ilustra um resumo dessas etapas.

Figura 28 – Processo de produção do aço



Fonte: IABr (2012)

Loiola (2009), Cavalcante, Pereira e Barroso (2011) relatam que a produção de AS no Ceará representa cerca de 15% da produção anual de aço do Estado, que é de aproximadamente 120 mil toneladas. Porém essa capacidade tende a aumentar em grande escala com a implantação da siderúrgica na região do Complexo Portuário e Industrial do Pecém (CIPP) nos próximos anos.

O AS produzido no Estado do Ceará é proveniente da única siderúrgica no Estado, a Gerdau Cearense S.A., situada no município de Maracanaú-CE. Loiola (2009) relata que o processo produtivo dessa unidade consiste na utilização de fornos do tipo EAF, gerando agregados com textura porosa, sendo mais aptos a serem aplicados na área da pavimentação. De acordo com Castelo Branco (2004), a sucata ferrosa corresponde a 90% da matéria-prima utilizada, enquanto o ferro gusa representa os 10% restantes.

Com relação ao processo produtivo da siderúrgica cearense, inicialmente é realizado o processo de prensamento da sucata leve e para o caso da sucata pesada são realizados cortes para diminuir o volume das peças. Em seguida, este material é colocado em uma espécie de cestão com capacidade para dez toneladas e os mesmos são levados aos fornos (CASTELO BRANCO, 2004).

No forno elétrico, são realizadas as adições de grafite, carbono e oxigênio. Ainda nesse forno é gerada a escória de refino oxidante, representando cerca de 80% da escória produzida. No forno panela, são adicionadas as ligas ferro-silício, ferro-manganês e cal e é gerada a escória de refino redutor. Um exemplo da matéria-prima empregada e dos fornos utilizados pela siderúrgica estão ilustrados na Figura 29.

Figura 29 – Produção do AS



Fonte: Castelo Branco (2004)

Um dos problemas que são enfrentados para utilizar o AS em obras rodoviárias é o caráter expansivo que esse material possui. De acordo com Parente *et al.* (2002), a expansão do AS ocorre pelo processo de hidratação, devido a concentração de CaO e MgO (tidos como óxidos expansivos) e pode chegar a 10%, dificultando sua aplicação. Pode-se identificar problemas de expansão através do surgimento de trincas radiais e do estufamento do revestimento asfáltico. Essas patologias podem ocorrer independente do AS ser empregado em camadas granulares de pavimentos ou em revestimento asfálticos (CASTELO BRANCO, 2004). A Figura 30 ilustra situações onde ocorreram problemas de expansão.

Figura 30 – Problemas em revestimentos devido à expansão do AS



Fonte: Castelo Branco (2004)

Visando contornar esse problema da expansão, o AS deve ser submetido a um processo de cura através de uma pré-hidratação, podendo ser realizado a céu aberto, empilhando o material em alturas reduzidas (cerca de 1,5 a 2,0 metros) ou manter esse material em contato permanente com a água. Geralmente a cura completa do AS ocorre a partir do terceiro mês de produção podendo se estender até um ano, dependendo da composição química do material (Machado, 2000; Parente *et al.*, 2002; Castelo Branco, 2004).

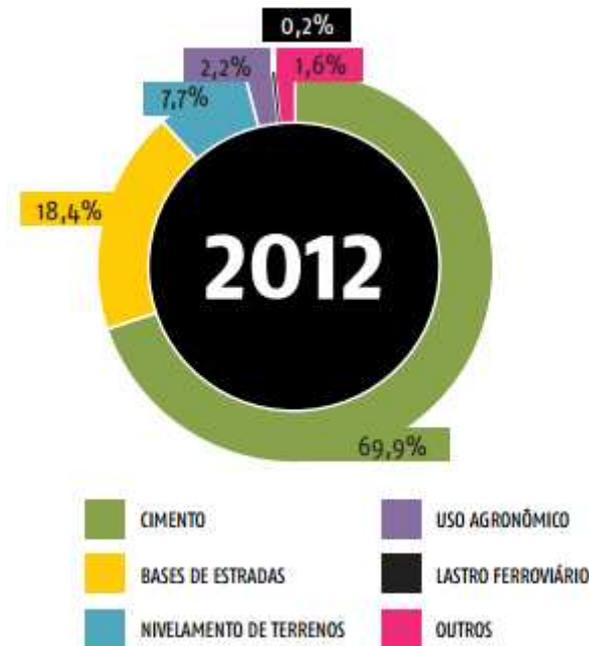
Segundo o relatório de sustentabilidade do IABr (2013), no ano de 2012, foram produzidos cerca de 34,5 milhões de toneladas de aço bruto no Brasil, número ligeiramente inferior ao registrado em 2011 que foi de 35,2 milhões de toneladas. Para cada tonelada de aço bruto produzido, foram gerados 600 kg de resíduos e coprodutos, quantidade igual ao do ano anterior. Os agregados siderúrgicos representam cerca de 63% dos resíduos e coprodutos do setor (11 milhões de toneladas em 2012).

O relatório de sustentabilidade do IABr (2013) ainda mostra que, em 2012, do total de resíduos e coprodutos gerados, 0,4% foi destinado à disposição final e 5,7% mantido em estoque, aguardando por futura destinação. Os agregados siderúrgicos gerados têm como principal destinação a venda. Cerca de 80% desse tipo de resíduo/coproduto é comercializado. As principais aplicações das escórias siderúrgicas vendidas, doadas ou recicladas internamente nas usinas são a produção de cimento (70%) e o uso para base e sub-base de rodovias (18,4%).

Após consultar os relatórios do IABr dos anos anteriores, pode-se constatar que o percentual de AS empregado em bases e sub-bases de rodovias vem diminuindo. No ano de 2007, o percentual era de 31% caindo para 18,5% em 2012. Vasconcelos (2013) cita que esse motivo pode ser explicado pelo fato do seu uso ser majoritariamente aplicado em camadas granulares de pavimentos. O emprego desse resíduo em camadas mais nobres tenderia a

valorizar mais o seu emprego, ocasionando um aumento de sua demanda para a área de pavimentação. A Figura 31 ilustra os percentuais de aplicação do AS no ano de 2012.

Figura 31 – Principais aplicações do AS



Fonte: Adaptado do IABr (2013)

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de viabilizar o emprego do AS tanto em camadas granulares de pavimentos como em revestimentos asfálticos. No Brasil, tem-se registro da primeira utilização desse resíduo na pavimentação no ano de 1986, mais precisamente no estado do Espírito Santo, onde foi empregado o AS em um trecho de mais de 100 km de extensão (Silva e Mendonça, 2001).

Rohde (2002) estudou o emprego da escória de aciaria elétrica em camadas de base e sub-base de pavimentos. Os resultados apresentados mostraram valores de Módulos de Resiliência (MR) superiores quando comparados com amostras contendo agregados convencionais. Nesse trabalho, a autora concluiu que o AS pode ser empregado na pavimentação, devendo-se atentar para eventuais correções granulométricas ou a utilização de aditivos.

Parente *et al.* (2002) avaliaram o comportamento mecânico de misturas de solo estabilizadas granulometricamente com o AS através de ensaios triaxiais e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Nesse estudo, foram testados diferentes percentuais de AS (50% e 70%) para o processo de estabilização. Foram também testadas misturas de solo-brita com o mesmo percentual empregado para o AS para que os resultados pudessem ser comparados. Os resultados obtidos mostraram que os valores de CBR e MR sempre foram maiores para a

mistura solo - AS, comprovando que esse tipo de agregado poderia ser empregado em camadas granulares de pavimentos sem prejuízos no seu comportamento mecânico.

Castelo Branco (2004) utilizou o agregado siderúrgico em misturas de Concreto Asfáltico (CA), caracterizando-as mecanicamente através de ensaios como: resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida. Esse estudo mostrou a possibilidade do emprego do AS em revestimentos asfálticos, devendo-se tomar os devidos cuidados na dosagem da mistura devido à natureza heterogênea do resíduo.

Apesar dos bons resultados obtidos com AS nos estudos que vêm sendo realizados para revestimentos asfálticos, Castelo Branco *et al.* (2004) alertam que existem algumas desvantagens do emprego do AS na pavimentação. Durante a produção do AS, pode ser verificada uma heterogeneidade do rejeito devido ao tipo de matéria-prima empregada, ao processo de fabricação, à forma de resfriamento e ao armazenamento desse tipo de material. Verifica-se também uma porosidade elevada do AS, que acaba gerando um aumento do consumo de ligante. Além disso, tem-se o problema da expansão desse material e a formação do tufo (precipitação do carbonato de cálcio), causando patologias em pavimentos que empregam o AS como agregado.

Santos Neto (2007) avaliou a utilização do agregado siderúrgico em camadas granulares de pavimento no município de Maracanaú-CE. Nesse trabalho, foi mostrado que o AS poderia ser considerado como alternativa técnica e economicamente viável em comparação aos agregados convencionais, devendo-se ter cuidado com o controle da expansão desse tipo de material para evitar-se futuras patologias no pavimento.

O DNIT (2008) utilizou o agregado siderúrgico produzido pela AcelorMittal de Tubarão-SC na construção de camadas de base e sub-base de rodovias. Os valores obtidos para CBR e os valores médios do MR foram considerados satisfatórios, mostrando que o emprego desse tipo de agregado em camadas granulares de pavimentos é viável.

Loiola (2009) também empregou o agregado siderúrgico em substituição ao agregado granítico em tratamentos superficiais duplo (TSD) visando empregar esse agregado em rodovias de baixo volume de tráfego no estado do Ceará. Os resultados obtidos mostraram a possibilidade do emprego desse resíduo em revestimentos delgados. O autor observou que o consumo de ligante com o agregado siderúrgico foi maior do que aquele com o agregado granítico, porém o custo final do TSD com AS foi inferior em função do agregado alternativo ser comercializado com valor inferior ao convencional.

Pedrosa (2010) avaliou o emprego do AS em substituição ao agregado convencional de origem gnaiss em revestimentos do tipo CA. Os resultados mostrados pelo autor comprovam o bom comportamento da mistura quando utilizado esse resíduo como agregado. Entretanto, foi constatado um maior consumo de ligante quando empregado o AS. O autor atenta para o fato de se realizar uma análise econômica antes de se decidir pelo uso do AS em revestimentos asfálticos.

Pereira (2010) avaliou o emprego do agregado siderúrgico para utilização em tratamentos superficiais por penetração (simples, duplo e triplo). Nesse trabalho, foi mostrado que esse tipo de agregado alternativo tem boas chances de ser empregado em serviços de TSP, apresentando bom desempenho quanto ao desgaste através dos ensaios de laboratório de desgaste por abrasão úmida (*Wet Track Abrasion Test - WTAT*). A metodologia de dosagem e confecção dos corpos de prova também foi aperfeiçoada em comparação com o método adotado por Loiola (2009).

Silva (2010) realizou um estudo analisando o comportamento mecânico de um revestimento asfáltico do tipo CA, utilizando como agregados o AS, brita convencional e como filer foi adotado o rejeito de minério de ferro. Os resultados apresentados mostraram que o comportamento mecânico das amostras analisadas pelo autor foram consideradas satisfatórias, encorajando seu uso em aplicações futuras.

Cavalcante, Pereira e Barroso (2011) avaliaram o uso do AS nas camadas de base e como agregado em revestimentos do tipo TSD. Os teores selecionados de AS para a camada de base foram de 40% e 50%. Com relação ao TSD, realizou-se um comparativo de comportamento do mesmo quando utilizado o AS e um agregado mineral. Os resultados apresentados mostraram que o AS é viável tecnicamente para as aplicações avaliadas no trabalho.

Rocha (2011) também avaliou o comportamento do agregado siderúrgico para emprego em tratamentos superficiais mostrando a viabilidade técnica do emprego desse tipo de material em revestimentos delgados. Foram utilizados diversos métodos de dosagem presentes na literatura de modo a comparar as taxas de agregado e ligante aplicadas. Foi construído um trecho experimental utilizando o AS, que apresentou bom desempenho durante o seu primeiro ano de serviço.

Vasconcelos (2013) avaliou o comportamento de dois revestimentos esbeltos, o TSD e o *Cape Seal* e realizou um comparativo do comportamento dos mesmos utilizando o AS e agregados convencionais. Foram moldados também corpos de prova representando o pavimento construído sobre uma base de solo-brita para serem submetidos à um simulador de

tráfego de pequeno porte. Foi constatado que quando utilizado o AS, os revestimentos apresentaram melhor comportamento com relação ao desgaste e às deformações sofridas com a passagem do simulador. Entretanto, para o caso do *Cape Seal*, que considera o uso de MRAF, verificou-se um custo maior que o esperado devido ao aumento do consumo de ligante quando se utilizou o AS como agregado.

2.4 Fresagem de Revestimentos Asfálticos e sua Aplicação em Novos Pavimentos

O pavimento asfáltico, ao longo de sua vida útil, sofre um desgaste imposto tanto pelo tempo (oxidação do ligante) como pelas cargas dos veículos que trafegam sobre o mesmo. Quando a sua estrutura entra em estado de deterioração, é necessário que haja uma intervenção em sua superfície para restabelecer a sua função estruturar e/ou funcional, dando novamente condições de trafegabilidade à rodovia.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a restauração de um pavimento pode ocorrer através da colocação de espessuras adicionais de camadas de revestimento ou através da retirada da camada deteriorada existente e a posterior colocação de um novo revestimento. Esse processo da retirada da camada existente é conhecido como fresagem.

O DNIT (2007) define o procedimento da fresagem como “desbastamento a quente ou a frio de superfície asfáltica, como parte de um processo de reciclagem do pavimento asfáltico”. Já Bonfim (2011) define a fresagem como sendo o “corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção visando a restauração de pavimentos”. Araújo (2004) cita que “o termo fresagem, no meio rodoviário, pode ser entendido como o corte de uma ou mais camadas do pavimento, com uso de equipamento denominado fresadora, dotado de cortador giratório, por processo mecânico contínuo”.

De acordo com Araújo (2004), os primeiros procedimentos de fresagem tiveram início na década dos anos 60. Esses serviços foram executados na Europa, mais especificamente na Alemanha Ocidental, onde a malha viária se encontrava em estado de deterioração avançado. No início da década dos anos 70, a técnica da reciclagem de pavimentos ganhou impulso devido ao embargo do petróleo. O incremento no seu preço, aliada à necessidade de realização de restaurações nos pavimentos existentes fizeram com que a técnica ganhasse destaque na época (Jimenez, 1980 *apud* Araújo, 2004).

De acordo com Campos (1987), *apud* Araújo (2004), as primeiras aplicações de fresagem foram no Estado de São Paulo por volta do ano de 1980. O início das atividades de

reciclagem de pavimentos também ocorreu neste Estado, em trechos da Via Anhaguera, com extensão aproximada de 90 km. Nessa obra, fresou-se o revestimento asfáltico existente e a reciclagem ocorreu em usinas do tipo *drum mix*. Segundo Trichês (2011), no Brasil a utilização da fresagem com o intuito de reciclar o pavimento teve crescimento no início na década dos anos 90, sendo adotada inicialmente por concessionárias de rodovias.

Para Bonfim (2011), a fresagem de pavimentos pode ser classificada de acordo com a espessura de corte ou quanto à rugosidade da pista após a realização do procedimento. Com relação à espessura de corte, a fresagem pode ser superficial, rasa e profunda. Com relação à rugosidade, a fresagem é classificada como padrão, fresagem fina ou microfresagem.

Na fresagem superficial, o processo ocorre somente para que sejam corrigidos pequenos defeitos superficiais do pavimento, sendo, em boa parte dos casos, dispensada a colocação de uma nova camada. Na fresagem rasa são retiradas as camadas superiores do pavimento, obtendo-se uma espessura média de corte de 5 cm na maioria dos casos. Esse procedimento (fresagem rasa) é indicado para correção de defeitos funcionais e de remendos superficiais do pavimento. Além disso, com a fresagem rasa é possível realizar intervenções na via sem alterar o seu greide, o que é desejável principalmente em vias urbanas.

A fresagem profunda é empregada quando deseja-se realizar intervenções estruturais no pavimento, atingindo as camadas inferiores do mesmo (base e sub-base). Essa técnica também é utilizada para corrigir problemas de greide de rodovias, quando a fresagem rasa não é suficiente.

A rugosidade final da via varia de acordo com o cilindro de fresagem empregado durante a realização do procedimento e com a velocidade de operação. Atualmente existem vários cilindros disponíveis no mercado, resultando em fresagens realizadas de várias maneiras, proporcionando assim realizar fresagens do tipo padrão, fina ou microfresagem.

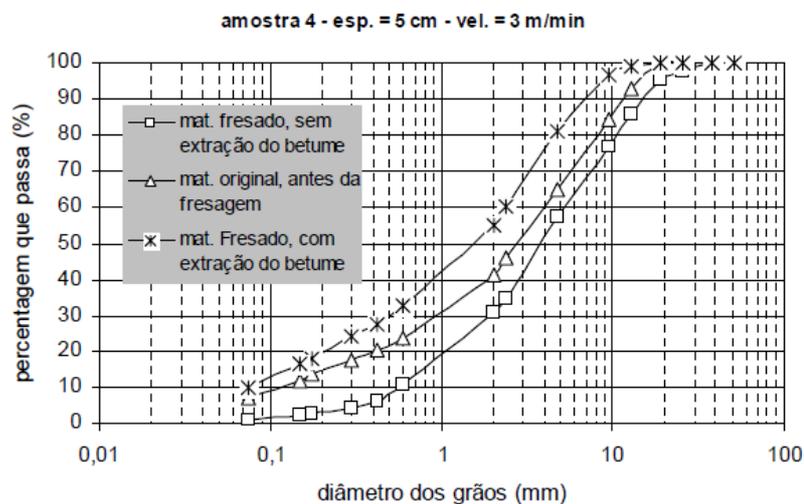
A fresagem padrão recebeu essa designação por ser introduzida primeiramente no mercado, além do que o procedimento era realizado com os cilindros originais vindos nos equipamentos. Ela caracteriza-se por uma distância lateral de 15mm entre os dentes de corte. Em geral utiliza-se esse tipo para a retirada da camada existente para colocação de uma nova camada.

Na fresagem fina os dentes de corte estão espaçados por cerca de 8mm, o que acarreta em menores sulcos no pavimento e conseqüentemente uma menor rugosidade. Esse tipo (fresagem fina) é recomendado para a regularização de vias, proporcionando melhorias na trafegabilidade. Na microfresagem, a separação dos dentes de corte é em torno de 2 a 3mm

e a mesma é aplicada na correção de perfis longitudinais ou na retirada da sinalização horizontal de rodovias quando há necessidade de mudança ou correção da mesma.

De acordo com Bonfim (1999), o processo de fresagem faz com que ocorra alteração na granulometria do agregado presente na mistura asfáltica. Este fato ocorre devido a fresagem provocar a quebra de parte dos agregados. Dessa maneira, ao realizar o ensaio granulométrico do fresado após realizar a extração do ligante tem-se geralmente um maior teor de finos quando comparado com a granulometria original projetada para aquela rodovia. Para o caso da granulometria realizada com a amostra envolvida por ligante, ocorre o contrário. Nessa situação, a quantidade de finos observada é pequena, pois o ligante faz com que o tamanho desses grãos aumente. A Figura 32 ilustra essa diferença.

Figura 32 – Granulometria do material antes e depois da fresagem



Fonte: Adaptado de Bonfim (1999)

A granulometria do material fresado também sofre variações de acordo com a velocidade de avanço do equipamento que realiza a fresagem e com relação à profundidade do corte selecionado. Quanto menor a velocidade de avanço, o tempo de contato da mistura com o cilindro fresador aumenta, ocasionando em uma granulometria mais fina. Deve-se manter o controle da velocidade do equipamento, evitando o surgimento de grumos de tamanhos indesejáveis. Com relação aos finos presentes no material, não existe variação de sua quantidade, mesmo modificando-se a velocidade de operação (Bonfim, 1999).

Bonfim (2011) também relata que o sentido de rotação do cilindro fresador também causa modificações na granulometria do fresado. A rotação no sentido horário faz com que os grãos obtidos sejam de tamanhos menores. Entretanto, o autor afirma que a rotação neste sentido é desfavorável no procedimento de corte, principalmente em casos onde

a profundidade de corte é grande e o revestimento encontra-se em um estado avançado de oxidação. A Figura 33 ilustra o esquema de rotação do cilindro.

Figura 33 – Alteração da granulometria pelo sentido de rotação do cilindro



Fonte: Adaptado de Bonfim (2011)

Os materiais oriundos da fresagem são agregados envolvidos por ligante asfáltico envelhecido e que podem ser reaproveitados na pavimentação de novos trechos. O material fresado também é utilizado na confecção de novas bases, onde o revestimento é fresado e incorporado à base existente, dando origem a uma nova base. Esse procedimento é conhecido como reciclagem de pavimentos. Bernucci *et al.* (2010) definem reciclagem de pavimentos como o reaproveitamento de misturas asfálticas envelhecidas para a confecção de novas misturas. Adiciona-se aos materiais agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, emulsão asfáltica ou CAP para compor o revestimento a ser aplicado nas rodovias.

O processo da fresagem e da reciclagem de pavimentos vem ganhando importância especialmente em regiões de grande aglomeração populacional, pois são exatamente nessas áreas onde existem as maiores dificuldades de se encontrar materiais na natureza para a execução de obras rodoviárias. O emprego dessa técnica, além de beneficiar o meio ambiente, proporciona uma redução nos custos de aplicação. De acordo com Ttrichês (2011), na Alemanha a reciclagem de pavimentos tornou-se obrigatória em projetos de restauração de rodovias.

Uma série de pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Brasil e no mundo com o intuito de designar aplicações desse material na pavimentação. No geral, o fresado vem sendo aplicado como agregado em misturas asfálticas a quente e sendo incorporado à base em processo de reciclagem de pavimentos. Com relação à misturas asfálticas a frio, a ocorrência de estudos é menor, especificamente no que se diz respeito à aplicação desse material em revestimentos do tipo TS e MRAF.

Trichês *et al.* (2000) verificaram o comportamento de uma mistura asfáltica a frio empregando o material fresado como agregado. O revestimento estudado consistiu na utilização do fresado estabilizado com emulsão de ruptura média do tipo RM-1C. O intuito desse trabalho foi aplicar essa mistura em rodovias de baixo volume de tráfego. O fato da escolha desse tipo de ligante foi justificado pela presença de nafta na composição da emulsão utilizada. Os autores afirmaram que esse componente presente no ligante seria capaz de dissolver o ligante existente no fresado. Os resultados obtidos nessa pesquisa foram considerados satisfatórios. Foi verificado que o emprego do material fresado empregado nessas situações propiciou uma durabilidade do revestimento 70% maior quando comparado com trechos executados em TSD.

Já Oliveira (2002) realizou um estudo onde foi estabelecida uma comparação do uso de emulsões asfálticas de ruptura lenta e espuma de asfalto para serem aplicadas em misturas asfálticas recicladas a frio. O autor concluiu que o valor de estabilidade Marshall foi superior para as misturas que foram confeccionadas utilizando emulsão.

Araújo (2004) estudou o comportamento da adição do material fresado em camadas de base de pavimentos em trechos de vias de Brasília-DF. Foram testados diversos teores de fresado para compor a camada de base (16%, 20%, 25% e 35%). Após definição da mistura ótima, avaliou-se também o comportamento mecânico da estrutura quando estabilizado quimicamente com a cal e cimento. A autora mostra nos resultados que a forma de compactação da mistura com adição de fresado influencia o arranjo final das partículas e como consequência o comportamento mecânico da amostra. Verificou-se nesse trabalho incremento da resistência quando utilizado o processo de compactação giratório.

Além disso, Araújo (2004) ainda mostra que a presença do ligante no material fresado contribui para o escorregamento de uma partícula sobre a outra, tendo como consequência a perda de capacidade de suporte. Os valores dos CBRs das amostras adicionadas de fresado são alteradas inclusive pela velocidade de penetração do pistão durante o ensaio. Esse fato foi atribuído à componente viscosa do asfalto presente na composição. Entretanto, a adição de aditivos químicos empregados nessa pesquisa proporcionaram ganhos de resistência da mistura.

Moreira (2004) analisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a frio. A dosagem dessas misturas foi realizada através de adaptações do Método Marshall e Superpave. Nessa pesquisa foram testados três teores de fresado (25%, 50% e 75%). Foram realizados ensaios mecânicos nas amostras com diferentes teores de fresado selecionados e o autor concluiu que o aumento o teor de fresado gera prejuízos no

comportamento das misturas. Os valores de Resistência à Tração (RT) apresentados mostraram valores baixos quando comparados com os valores obtidos para misturas a quente do tipo CA.

Outra informação relevante apresentada por Moreira (2004) foi a pouca variação do teor de projeto nas três situações propostas pelo mesmo. Isso demonstrou que não houve efetiva reincorporação do ligante existente. O autor também concluiu que a mudança na metodologia de compactação dos corpos de prova provocou alterações no comportamento da mistura. Na compactação por impacto, o aumento do teor de emulsão implicou em perdas de parâmetros mecânicos enquanto para o caso de compactação por amassamento essa tendência não se repetiu. Com relação à resistência ao desgaste, as amostras confeccionadas através da compactação por amassamento indicaram uma melhor resistência quando submetidas ao desgaste Cantabro.

Bocci *et al.* (2010) utilizaram o fresado em camadas granulares e em revestimentos asfálticos. Nesse trabalho os autores propuseram a utilização da reciclagem a frio *in situ* para a construção de uma terceira faixa adicional em uma rodovia de alto volume de tráfego na Itália. O emprego do fresado se mostrou viável em processos de construção de pavimentos sem gerar prejuízos no desempenho mecânico do pavimentos.

Oliveira (2011) avaliou o desempenho de misturas asfálticas recicladas a quente com a adição de fresado em sua composição granulométrica. O autor realizou um comparativo de um CA composto de 15% de fresado com uma mistura padrão. O comportamento mecânico da mistura reciclada apresentou comportamento similar ao da mistura tradicional. Com relação aos ensaios de RT e Módulo de Resiliência (MR), a mistura de 15% de fresado apresentou maiores valores, o que o autor atribuiu à presença de ligante envelhecido na composição. Nesse trabalho, realizou-se ainda o acompanhamento de 6 meses de um trecho executado com material fresado. Durante esse período, o comportamento apresentado pelo trecho foi considerado satisfatório, entretanto os resultados de macro e micro textura não atenderam às normas vigentes. Porém o autor atribuiu esses problemas às falhas ocorridas durante o método executivo.

Trichês *et al.* (2011) utilizaram o material fresado como agregado em uma reciclagem de um pavimento deteriorado no estado de Santa Catarina. Nesse trabalho, o pavimento existente foi reciclado e incorporado à base, visando garantir uma maior capacidade de suporte da rodovia. Além disso, os autores propuseram estabilizar quimicamente a camada de base reciclada com o emprego de cimento. Os resultados desse estudo mostraram que a nova estrutura proposta propiciou uma redução na deflexão do

pavimento já nos primeiros dias de cura da camada, gerando ainda uma economia de 2,5% com relação ao custo original planejado, onde se previa uma restauração convencional da rodovia.

Com relação ao emprego do material fresado em revestimentos do tipo MRAF, o autor do presente trabalho não encontrou registros, na bibliografia consultada, da realização de estudos no país. Delfosse e Soliman (2010) estudaram o emprego do material fresado em MRAF em rodovias francesas. O percentual de fresado empregado na composição foi de até 80%. Os autores mostraram que o comportamento dos revestimentos onde foram aplicados percentuais de 70% a 80% de fresado foi considerado satisfatório quando comparado com situações onde se utilizou somente agregados minerais. Entretanto, os autores recomendam que o fresado seja submetido ao processo de britagem e homogeneização, buscando obter uma curva granulométricas e melhores propriedades dos materiais.

Os resultados apresentados por Delfosse e Soliman (2010) em rodovias francesas encorajam o desenvolvimento de estudos aqui no país sobre o emprego do fresado em MRAF. Além disso, o emprego desse material pode proporcionar a realização de manutenções preventivas com custos menores e gerar benefícios para o meio ambiente.

2.5 Considerações Finais

No Capítulo 2 do trabalho desenvolvido, realizou-se uma revisão bibliográfica dos principais assuntos abordados nesta dissertação. Foram apresentados os principais conceitos e aplicações do MRAF. Além disso, abordou-se detalhes sobre o AS como seu processo produtivo, suas principais características e aplicações na área da pavimentação. Por fim, apresentou-se uma breve revisão sobre fresagem de pavimentos asfálticos, onde foi mostrado como o mesmo é obtido e como vem sendo realizado o seu aproveitamento na reciclagem de pavimentos. No capítulo seguinte serão apresentados os materiais e métodos que foram empregados para elaboração do procedimento experimental da presente dissertação de mestrado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os materiais selecionados e a metodologia empregada para a realização desta dissertação. Primeiramente, serão mostrados os materiais que foram utilizados para a confecção dos corpos de prova de MRAF e para a camada de solo-brita que servirá como base granular no simulador de tráfego. Em seguida, todos os ensaios realizados na caracterização dos materiais, os ensaios de dosagem, análise do comportamento do revestimento em laboratório e quando submetido ao simulador de tráfego serão apresentados. Além disso, o método de moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios serão mostrados.

A metodologia de pesquisa aplicada à esta dissertação contém uma série de ensaios laboratoriais, aplicados em propósitos distintos com a finalidade de atingir os objetivos específicos aqui citados. Para que haja uma melhor organização do trabalho, optou-se por dividir o programa experimental em etapas, sendo elas: (1) a caracterização dos materiais, (2) o procedimento de moldagem e dosagem dos corpos de prova de MRAF, (3) avaliação do comportamento do revestimento em laboratório e através da utilização de um simulador de tráfego de laboratório e (4) uma análise econômica dos materiais alternativos empregados nessa dissertação.

Para atingir os objetivos da pesquisa, resumem-se abaixo as etapas metodológicas da pesquisa aqui apresentada:

- a) revisão bibliográfica sobre o MRAF, AS e fresado;
- b) coleta e caracterização dos agregados envolvidos na pesquisa;
- c) coleta e caracterização da emulsão asfáltica do tipo ruptura controlada modificada por polímeros elastoméricos (RC1C-E);
- d) confecção dos corpos de prova para realização dos ensaios de dosagem do MRAF;
- e) realização dos ensaios de laboratório utilizando os teores definidos nos procedimentos de dosagem do MRAF;
- f) realização dos ensaios em simulador de tráfego de laboratório;
- g) tratamento e análise dos dados obtidos nos ensaios realizados;
- h) realização de um comparativo dos resultados obtidos com os agregados investigados;

- i) levantamento e comparativo dos custos de aplicação do MRAF utilizando os agregados estudados;
- j) redação da dissertação de mestrado.

3.2 Escolha dos Materiais

3.2.1 Agregado Mineral

Os agregados minerais selecionados para realização da pesquisa foram a brita e o pó de pedra denominados agregados do tipo 1 por Castro (2011), cuja pedreira está situada na região de Caucaia-CE, distante cerca de 20 km de Fortaleza. O critério adotado para a escolha desse material foi que o mesmo apresentou-se como a melhor opção dentre as três testadas por Castro (2011) para emprego em revestimentos do tipo MRAF.

Segundo Bessa *et al.* (2011), os agregados provenientes dessa pedreira na região de Caucaia são do tipo gnaisse e a sua produção é dividida em duas fases, sendo que a primeira ocorre em um britador do tipo mandíbula e a segunda ocorre em um britador giroférico ou cônico. Nessa segunda fase, é possível modificar a forma dos agregados, fazendo com que os mesmos passem para uma forma mais cúbica, melhorando suas propriedades para serem empregados na pavimentação. A Figura 34 ilustra a localização da pedreira (representada pelo ponto azul) e a Figura 35 apresenta uma vista geral da mesma.

Figura 34 – Localização da pedreira onde foram coletados os agregados minerais



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

Figura 35 – Vista geral da pedreira onde o agregado do tipo 1 foi coletado



Fonte: Autor (2014)

3.2.2 Agregado Siderúrgico

O emprego do agregado siderúrgico em obras de pavimentação mostrou-se viável tanto em aplicações para camadas granulares como para alguns tipos de revestimentos asfálticos. Nesta pesquisa, o agregado siderúrgico selecionado para compor o MRAF foi produzido na empresa Gerdau Cearense S.A., localizada no município de Maracanaú-CE, distante cerca de 25 km da cidade de Fortaleza-CE. O ponto vermelho em destaque na Figura 34 ilustra a localização da fábrica onde o AS foi coletado.

Segundo Loiola (2009), o agregado produzido é britado e comercializado nas graduações de 1”, 3” e 8”. Para o trabalho em questão, a coleta realizada deste material pertence à fração de 1”, que foi posteriormente peneirada em laboratório com a finalidade de enquadramento nas faixas granulométricas das normas vigentes. A Figura 37 ilustra o material coletado para a realização do programa experimental.

Figura 36 – Agregado Siderúrgico coletado para a pesquisa



Fonte: Vasconcelos (2013)

3.2.3 Material Fresado

O material oriundo do processo de fresagem de pavimentos asfálticos também vem sendo utilizado em obras rodoviárias. Seu emprego é realizado no processo de reciclagem de bases e como agregados de misturas asfálticas a quente. No Brasil, sua aplicação em misturas a frio é utilizada em menor escala.

Para esta pesquisa, coletou-se o fresado armazenado na empresa Insttale Engenharia, responsável pela fresagem dos pavimentos asfálticos da Região Metropolitana de Fortaleza. Vale ressaltar a heterogeneidade desse material, pois o mesmo foi obtido através de fresagem de variados tipos de revestimentos asfálticos (como CA, AAUQ, AAUF etc.) e armazenado conjuntamente em diversas pilhas no terreno da referida empresa. Posteriormente, na empresa, o material é britado (caso haja necessidade) e peneirado nas frações de 1", ¾" e ½" conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Material fresado fracionado para coleta



Fonte: Autor (2014)

O material coletado para o programa experimental corresponde à fração passante na peneira de $\frac{1}{2}$ ". Esse material em seguida foi caracterizado de acordo com as normas vigentes. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram avaliadas duas porcentagens distintas de material fresado na composição granulométrica do MRAF, sendo a primeira com 30% de material fresado e 70% de agregado mineral tipo 01 e uma segunda com a aplicação de 70% de material fresado e 30% de agregado mineral tipo 01.

3.2.4 Emulsão Asfáltica

Para analisar o comportamento do MRAF com agregados alternativos de origens distintas, a emulsão asfáltica utilizada foi do tipo ruptura controlada modificada por polímeros (RC1C-E). Esse tipo de ligante é o empregado em obras que utilizam o MRAF como revestimento, não sendo permitido o uso de outro tipo de ligante, conforme determinado nas normas executivas vigentes.

A emulsão RC1C-E coletada é fabricada e comercializada pela empresa Asfaltos Nordeste, sediada no distrito industrial do município de Maracanaú-CE. A empresa cedeu gentilmente a emulsão para o desenvolvimento de todo o programa experimental proposto nesta dissertação. A Figura 38 ilustra os tanques onde esse tipo de emulsão é armazenada.

Figura 38 – Tanques de armazenamento de emulsão asfáltica na Asfaltos Nordeste



Fonte: Castro (2011)

3.2.5 Cimento Portland

O cimento Portland do tipo CP-II foi escolhido para atuar como filler.. Esse material tem a função de preencher os vazios da mistura, promovendo uma melhor graduação da mesma. O cimento do tipo CP-II é o mesmo aplicado em obras de construção civil para confecção de argamassas e fabricação de concreto estrutural.

3.2.6 Aditivo Controlador do Tempo de Ruptura da Emulsão

O aditivo químico é necessário para modificar o tempo de ruptura da emulsão, ou seja, seu objetivo único é não permitir que ocorra o rompimento da emulsão de maneira precoce, ocasionando problemas durante a execução do MRAF. O aditivo é adicionado previamente junto à água no processo de mistura. O produto também foi fornecido pela mesma empresa fabricante da emulsão, a Asfaltos Nordeste, que formulou o aditivo de modo a se adaptar da melhor maneira ao tipo de emulsão comercializada. A composição química deste produto possui semelhanças com a composição encontrada em agentes emulsificantes, porém cada fabricante de emulsão possui o seu produto específico para a mesma finalidade.

3.3 1ª Etapa do Programa Experimental – Caracterização dos Agregados e da Emulsão Asfáltica

3.3.1 Ensaios de Caracterização dos Agregados

Os ensaios de caracterização realizados nesta etapa tiveram o intuito de verificar se os materiais selecionados estavam enquadrados nos padrões estabelecidos pelas normas vigentes. Inicialmente todo o material foi coletado em quantidade compatível com o volume de ensaios definidos e posteriormente todas as amostras foram quarteadas utilizando um repartidor de amostras (Figura 39) e preparadas para a realização dos ensaios. Os ensaios para a caracterização dos agregados, incluindo os específicos para os agregados siderúrgicos e para o material fresado, serão descritos a seguir.

Figura 39 – Repartidor de amostras utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2014)

a) Granulometria (DNER-ME 083/98 - Agregados, análise granulométrica): os agregados selecionados foram submetidos a uma análise granulométrica por peneiramento, de modo a definir o enquadramento dos materiais analisados na faixa desejada. Para o caso dos agregados alternativos, foi realizado um peneiramento prévio utilizando somente a peneira de 9,5mm, descartando todo o material retido na mesma (Figura 40) pois o material coletado possuía agregados de tamanhos maiores que os empregados em MRAF. A Figura 41 ilustra a série de peneiras exigidas pela especificação do DNIT (DNIT ES 035/2005) utilizadas no ensaio.

Figura 40 – Peneiramento e descarte do material não utilizado



Fonte: Autor (2014)

Figura 41 – Série de peneiras para realização do ensaio de granulometria



Fonte: Autor (2014)

b) Índice de forma (DNER-ME 086/94 - Agregados, determinação do índice de forma): através desse ensaio define-se a forma do agregado como cúbica ou lamelar. Para a pavimentação, a importância da realização do ensaio consiste em selecionar agregados que possuam forma mais cúbica, de modo a garantir um maior intertravamento dos mesmos, tornando-os menos quebradiços quando solicitados pela ação do tráfego ou durante os processos de compactação. A Figura 42 mostra o ensaio sendo executado em laboratório.

Figura 42 – Índice de forma



Fonte: Castro (2011)

c) Abrasão Los Angeles (DNER – ME 035/98 - Agregados, determinação da abrasão Los Angeles): nesse método, os agregados selecionados são submetidos à quebra e ao desgaste por um período pré-determinado através de um equipamento denominado Los Angeles. Foi escolhida a Graduação C indicada na norma para o material a ser ensaiado. Em seguida os agregados são colocados no interior do tambor ilustrado na Figura 43 juntamente com esferas de aço de tamanho e peso conhecidos. A quantidade de esferas depende da graduação e da quantidade de material ensaiado. Em seguida o tambor é submetido a movimentos rotacionais provocando o choque das esferas com os agregados. Finalizado o ensaio, retira-se o material e pesa-se a quantidade de material retido na peneira de nº10. O resultado do ensaio é calculado através do percentual de material passante na referida peneira com relação à quantidade de material colocado no interior do equipamento antes do início do procedimento.

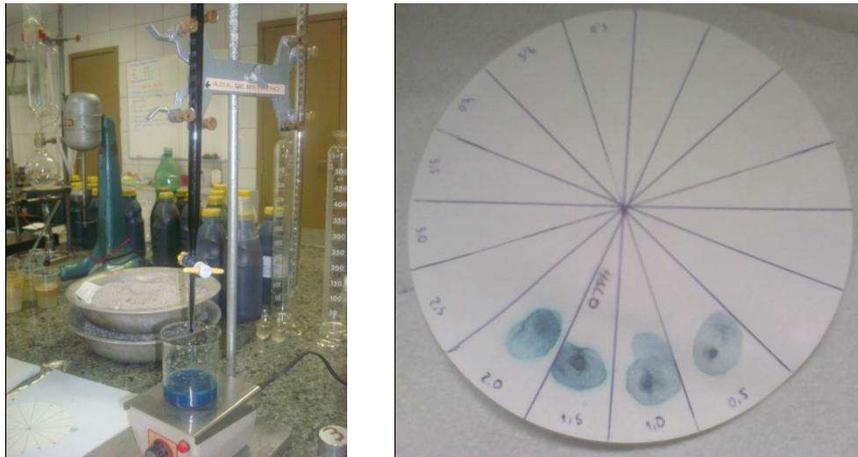
Figura 43 – Equipamento Los Angeles



Fonte: Autor (2014)

d) Azul de metileno (NBR 14949/2003 - Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno): nesse ensaio, mede-se a reatividade do agregado através da absorção do azul de metileno. Em geral, um agregado que possui uma reatividade muito alta, ou seja, alta absorção de azul de metileno, tende a não obter uma boa compatibilidade com a emulsão asfáltica. Esse problema de compatibilidade acarreta em tempos de ruptura reduzidos, prejudicando a aplicação e espalhamento do MRAF no campo. A Figura 44 ilustra a realização do procedimento em laboratório.

Figura 44 – Ensaio de azul de metileno



e) Equivalente de areia (DNER – ME 054/94 – Equivalente de areia): nesse método é verificada a qualidade do agregado com relação à quantidade de impurezas e argila presentes na fração miúda do mesmo. Para a realização do procedimento, são considerados apenas a fração do material passante na peneira de nº4. Resultados com valores superiores a 60% são considerados satisfatórios segundo as normas vigentes, indicando uma quantidade de argila e impurezas reduzidas. Agregados com teores aceitáveis de equivalente de areia são desejáveis para garantir a compatibilidade agregado-emulsão, viabilizando o seu emprego em revestimentos do tipo MRAF. A Figura 45 ilustra o ensaio de equivalente de areia sendo realizado.

Figura 45 – Ilustração da realização do ensaio de equivalente de areia



Fonte: Autor (2014)

3.3.2 Ensaios de Caracterização dos Agregados – Exclusivos para Agregado Siderúrgico

Os agregados siderúrgicos devem ser submetidos a alguns ensaios de caracterização adicionais para serem considerados aptos para emprego em obras de pavimentação pelo fato de se tratar de um resíduo sólido e por ter características peculiares devido à sua composição. Para complementar a caracterização do AS, são necessários os ensaios de solubilização, lixiviação e deve ser verificado também seu potencial de expansão.

A realização do ensaio de solubilização tem como intuito a verificação da concentração de substâncias presentes do AS que são solúveis em água, diferenciando os resíduos entre inertes (classe II A) ou não inertes (classe II B). O procedimento seguiu as diretrizes especificadas na NBR 10006/2004 – Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos.

O ensaio de lixiviação verifica a concentração de substâncias separadas do material através de procedimentos de lavagem e percolação, classificando os resíduos como perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). O procedimento seguiu as diretrizes especificadas na NBR 10005/2004 – Procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos.

O ensaio de expansão do AS foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 113/2009 – Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria. Esse método tem como objetivo determinar o potencial de expansão do AS, estabelecendo limites para que o resíduo possa ser empregado na pavimentação. Sabe-se que essa característica do AS pode ser prejudicial às obras rodoviárias, pois a expansão do mesmo gera problemas tanto em camadas granulares como em revestimentos asfálticos como foi mostrado no capítulo anterior. O

método brasileiro é baseado no método PTM-130 desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia.

Para a realização do procedimento, deve-se inicialmente determinar a curva de compactação do AS em três camadas iguais, sendo 56 golpes para cada camada. Em seguida são moldados três corpos de prova, sendo um no ramo seco, outro na umidade ótima e o último no ramo úmido. As amostras compactadas são submersas e mantidas na estufa a uma temperatura de 71°C, com tolerância de 3°C. A amostra é mantida por 7 dias submersa e depois por mais 7 dias em condição de saturação não submersa. As leituras do extensômetro devem ser acompanhadas diariamente, de preferência no mesmo horário. O ensaio é ilustrado na Figura 46.

Figura 46 – Realização do ensaio de expansão da escória



Fonte: Vasconcelos (2013)

3.3.3 Ensaios de Caracterização dos Agregados – Exclusivos para Material Fresado

Assim como foi necessário realizar ensaios específicos para o AS, por se tratar de um resíduo, para o caso do fresado também foi preciso. Sabe-se que a camada de ligante que está presente no resíduo pode causar alterações em algumas propriedades do material. Outra característica que se modifica é o teor de ligante adicionado em procedimentos de dosagem, onde a mesma é reduzida em função da utilização desse tipo de material na composição de um revestimento asfáltico visto que parte do ligante existente é reaproveitado.

Para complementar a caracterização do material fresado, além dos ensaios tradicionais, foi necessário determinar o percentual de betume contido no material coletado. A extração do ligante foi realizada para que os ensaios de caracterização dos agregados pudessem ser realizados antes e depois da extração. Dessa forma, foi possível determinar quais parâmetros são alterados, contribuindo para um melhor entendimento do

comportamento desse material quando o mesmo for selecionado para compor um projeto de MRAF. Nesta pesquisa, a determinação do teor de betume foi realizada através de dois métodos: DNER – ME 053/94 – Misturas betuminosas – percentagem de betume e o outro método utilizado foi o DNIT – ME 158/2011 – Determinação da percentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet.

No primeiro método, mais antigo e tradicional, é utilizado um extrator centrífugo, conhecido como Rotarex. Nesse procedimento é utilizado cerca de 1000 g de mistura asfáltica onde a mesma é aquecida em estufa a 100°C – 120°C e posteriormente é colocada no interior do prato que pertence ao extrator. É despejado no prato, inicialmente, cerca de 150 ml de solvente junto com a amostra e o conjunto (amostra + solvente) é deixado em repouso por cerca de 15 minutos.

De forma manual ou automática, inicia-se a rotação do aparelho de modo que sua velocidade de giro aumente gradativamente até atingir 3600 RPM. Durante esse procedimento será observado que o solvente irá escoar, carreando consigo o betume existente na amostra. Esse procedimento de abastecimento com solvente deve ser repetido até o solvente que comece a sair do equipamento com uma cor mais clara, indicando que todo o betume contido na amostra foi retirado. A fração de agregado que fica no equipamento é levada à estufa novamente para depois ser pesado e, assim, é calculada a diferença de peso sendo possível determinar o teor de betume contido na amostra ensaiada. Esse procedimento está ilustrado na Figura 47.

Figura 47 – Procedimento de extração de ligante com equipamento rotarex



a) equipamento rotarex



b) colocação da amostra no prato



c) adição de solvente inicial



d) amostra em repouso



e) velocidade de rotação



f) aspecto da amostra pós extração

Fonte: Autor (2014)

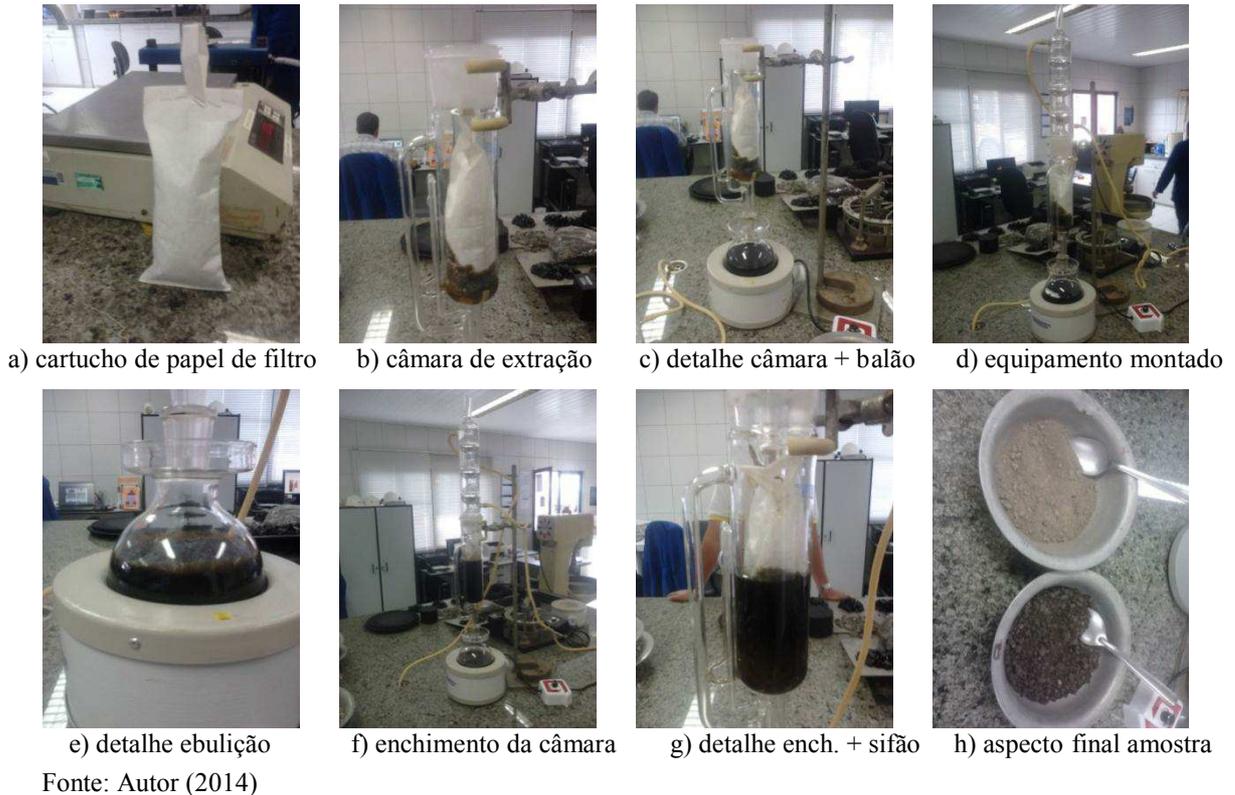
Apesar de bastante difundido no meio técnico, o uso do rotarex tem suas limitações que podem ocasionar divergências nos seus resultados. Uma das maiores críticas ao seu emprego é a possibilidade de ao longo do procedimento de extração ocorrer o carreamento de material fino junto com o ligante e solvente diluídos. Isso ocorre porque a vedação do prato feita pelo papel filtro pode não ser eficaz na contenção desses finos, que são carreados pelo solvente. Essa perda de material não desejada acaba por mostrar um resultado que difere da realidade, ou seja, o teor de ligante calculado acaba sendo maior do que aquele de fato existe na amostra.

O estado da prática do meio técnico no Ceará mostra que em obras onde se empregam ligantes modificados por polímeros, a fiscalização passou a exigir que a determinação do percentual de betume fosse realizada através de outro procedimento, com a utilização do equipamento Soxhlet. Além de ser considerada mais precisa, essa metodologia evita que o polímero presente no ligante se una à parte fina do agregado, dificultando sua retirada durante o movimento rotacional executado no equipamento rotarex. Nesta pesquisa foram executados os dois procedimentos para fins de comparação de resultados de percentagem de betume.

O procedimento com o extrator Soxhlet requer maiores cuidados durante a sua operação de modo a evitar acidentes, pois o equipamento é mais frágil e complexo de se utilizar. Inicialmente deve-se montar uma espécie de cartucho de papel de filtro que servirá como compartimento onde a amostra será inserida e ficará retida durante a realização do ensaio. Em seguida, insere-se a amostra no interior da câmara de extração e finaliza-se a montagem do equipamento.

Para iniciar o procedimento de destilação, a manta que está em contato com o balão do conjunto extrator (onde está contido o solvente) é aquecida provocando a ebulição do mesmo. O solvente em forma de vapor sobe até o condensador situado na parte superior do equipamento e em seguida penetra na câmara de extração, promovendo a separação do ligante da amostra. O solvente vai se acumulando na câmara e, juntamente com o ligante dissolvido, retorna ao balão por meio de um sifão para iniciar novamente o processo de ebulição. O procedimento de extração é finalizado quando verificado que o solvente está retornando ao balão com um aspecto límpido. Em seguida, a amostra contida no cartucho de papel de filtro é levada à estufa e posteriormente pesada para determinação do teor de betume. A realização deste ensaio é mostrada na Figura 48.

Figura 48 – Extração de betume com equipamento Soxhlet



3.3.4 Ensaios Realizados na Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada no desenvolvimento do programa experimental (ruptura controlada modificada por polímeros) também deve atender aos requisitos estabelecidos em padrões de normas vigentes. Para validação do material, foi necessária a realização de uma série de ensaios normatizados. Porém, vale ressaltar que todos os procedimentos foram conduzidos pela empresa fabricante da emulsão asfáltica e os resultados que serão apresentados no Capítulo 4 foram fornecidos pela mesma através de certificados de análise, sendo esses apresentados aos seus clientes e às fiscalizações de obras. Os ensaios realizados com a emulsão asfáltica estão listados a seguir.

- a) Viscosidade Saybolt Furol (NBR 14491/2000 – Emulsões Asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol).
- b) Sedimentação (DNER – ME 006/2000 – Emulsões asfálticas – Determinação da sedimentação).
- c) Peneiração (NBR 14393/99 – Emulsões Asfálticas – Determinação da peneiração).
- d) Carga de partícula (NBR 6567/2000 – Emulsões asfálticas – Determinação de carga da partícula).

- e) Resíduo por evaporação (NBR 14376/2007 – Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo asfáltico por evaporação – método expedito).
- f) Determinação do pH (NBR 6299/99 – Emulsões Asfálticas – Determinação do pH).
- g) Penetração (DNER – ME 003/99 – Material betuminoso – determinação da penetração).
- h) Recuperação elástica (DNER – ME 382/99 – Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos modificados por polímeros, pelo método do ductilômetro).
- i) Ponto de amolecimento (NBR 6560/2008 – Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola).

3.4 2ª Etapa do Programa Experimental – Dosagem e Análise do Comportamento do MRAF em Laboratório

Para a realização da segunda etapa do programa experimental desta dissertação, foi necessário moldar três tipos de corpos-de-prova: um para o ensaio de perda por abrasão úmida WTAT (NBR 14746/2001), outro para o ensaio de adesão de areia pela máquina *Loaded Wheel Tester* (LWT) (NBR 14841/2002) e o último para a realização do ensaio de determinação das características de cura do MRAF através da determinação da coesão da mistura (NBR 14798/2002) cujos procedimentos de execução serão explicados a seguir.

Além disso, para concluir o procedimento de dosagem foi necessário verificar a necessidade de se utilizar o aditivo controlador do tempo de ruptura através do ensaio de determinação do tempo mínimo de misturação (NBR 14758/2001) e também foi realizado o ensaio de determinação da adesividade da mistura (NBR 14757/2001), com o intuito de aferir a compatibilidade agregado emulsão no MRAF. Para esses dois últimos ensaios citados, não é necessária a moldagem de corpos de prova específicos.

3.4.1 Moldagem do Corpo de Prova para o ensaio WTAT

Para a realização do ensaio de perda por abrasão úmida WTAT (NBR 14746/2001), é necessário cerca de 1300g – 1400g de agregado para o caso de agregados minerais ou fresado. Para o caso de utilização do AS é necessário cerca de 1850g – 1950g. Os teores de emulsão, água, cimento e aditivos variam de acordo com o projeto de dosagem, definidos em laboratório.

O molde utilizado para o ensaio WTAT é um disco metálico de diâmetro interno de 279 mm. O MRAF fabricado com a ajuda de um recipiente é vertido sobre uma manta

asfáltica, que tem a função de servir de apoio para o molde e para o MRAF. O procedimento de moldagem seguiu a mesma metodologia adotada por Castro (2011) e está descrito a seguir, nos itens de *a* a *f*, conforme ilustrado na Figura 49:

- a) em um recipiente de capacidade adequada para a quantidade desejada, adiciona-se o cimento e o agregado e realiza-se a pesagem dos dois materiais. A pesagem dos outros materiais é realizada separadamente;
- b) com a ajuda de uma colher, realiza-se a homogeneização dos agregados e do cimento;
- c) adiciona-se água à mistura dos agregados e realiza-se a mistura dos mesmos até a molhagem completa dos materiais. Em caso de utilização de aditivo, o mesmo é adicionado previamente à água;
- d) a emulsão asfáltica é adicionada à mistura após a adição da água e o processo de mistura é realizado manualmente com a ajuda de uma colher em movimentos circulares a uma velocidade aproximada de 60RPM;
- e) a mistura de MRAF é vertida no interior do molde e sua superfície é regularizada com a ajuda de um bastão de madeira, devendo-se ter o cuidado para evitar a segregação de material;
- f) após a regularização da superfície da mistura, o molde é cuidadosamente retirado e o corpo-de-prova é levado à estufa a 60°C por no mínimo 15h (ou até atingir peso constante).

Figura 49 – Procedimento de moldagem do corpo de prova para ensaio WTAT



a) disco metálico (molde)



b) pesagem do agregado



c) pesagem da água



d) pesagem da emulsão



e) pesagem do aditivo



f) homogeneização dos agregados



g) adição da água



h) homogeneização



i) adição da emulsão



j) realização da mistura



l) despejo do MRAF



m) regularização da superfície



n) retirada do molde



o) corpo de prova moldado



p) corpo de prova curado

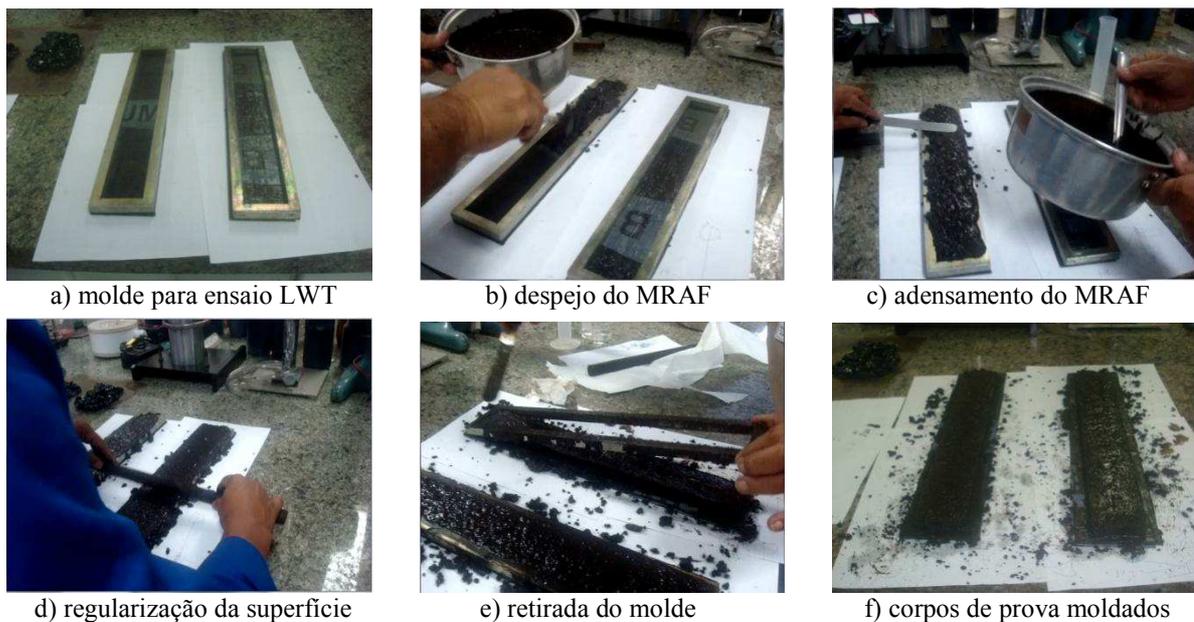
Fonte: Castro (2011)

3.4.2 Moldagem do Corpo de Prova para o ensaio LWT

O outro ensaio que deve ser realizado para determinar o teor de projeto de ligante para o MRAF é o ensaio de adesão de areia pela máquina LWT (NBR 14841/2002). Para a execução desse procedimento, deve ser moldado outro tipo de corpo de prova (ver Castro, 2011), cuja sequência de moldagem está ilustrada na Figura 50. Vale ressaltar que a altura do molde varia de acordo com a dimensão máxima do agregado utilizado.

Os materiais empregados são os mesmos do ensaio de WTAT, a diferença fica por conta da quantidade para preenchimento do molde, que neste caso é menor, sendo necessário cerca de 650g de agregado mineral ou fresado e 850g de AS. O processo de mistura também é realizado da mesma forma como citado no item anterior, sendo o MRAF vertido sobre uma manta asfáltica, que serve de apoio para o molde e para o revestimento.

Figura 50 – Procedimento de moldagem do corpo de prova para ensaio LWT



Fonte: Castro (2011)

3.4.3 Moldagem do Corpo de Prova para o ensaio de Coesão

Para o ensaio de determinação das características de cura do MRAF através da determinação da coesão da mistura (NBR 14798/2002), assim como nos ensaios citados anteriormente, os materiais empregados e o processo de mistura são os mesmos. Há variação somente na quantidade de material, que nesse caso é cerca de 300g em caso da utilização de agregado mineral ou fresado e 400g para AS, e no tipo de molde para a realização do ensaio.

Os moldes utilizados são anéis metálicos com alturas de 10mm e diâmetro interno de 60mm. Assim como nos ensaios anteriores, utiliza-se uma manta asfáltica onde o molde será apoiado e o MRAF despejado. O procedimento de moldagem é ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Procedimento de moldagem do corpo de prova para ensaio de coesão



a) molde para ensaio de coesão



b) despejo do MRAF



c) regularização da superfície



d) detalhe da regularização



e) limpeza da superfície



f) corpos de prova moldados

Fonte: Castro (2011)

3.4.4 Procedimento de Dosagem do MRAF

O processo de dosagem consiste em selecionar os materiais adequados e definir os teores de projeto para cada material que compõe o MRAF através de ensaios normatizados utilizados para tal finalidade. Vale (2003) e Reis (2005), realizaram também alguns procedimentos para definição do teor de fíler e de água, porém não foram considerados neste trabalho.

Vale (2003) utilizou o ensaio de determinação das características de cura do MRAF através de ensaios de coesão (NBR 14798/2002) para definir o teor de projeto de fíler. Nesta dissertação esse ensaio será utilizado somente para avaliar o tempo de cura do MRAF quando se utiliza agregados alternativos, sendo mantido o mesmo teor de fíler.

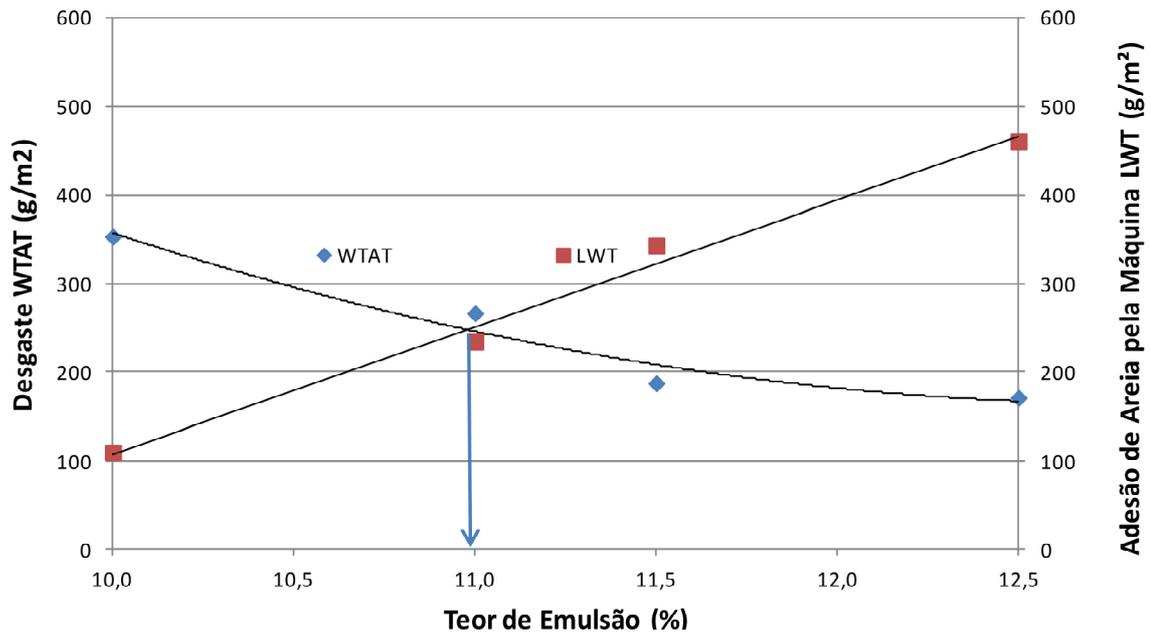
Reis (2005) utilizou a técnica do cone de consistência, explicada na norma do ensaio WTAT (NBR 14746/2001), com a finalidade de definir o teor de projeto de água a ser empregado na fabricação do MRAF. Porém, definir em projeto o teor de água a ser empregado pode ser arriscado, pois durante a execução do programa experimental proposto na dissertação ocorreram casos de variações do teor de água da ordem de 2%, em função das variações das condições climáticas.

Segundo Vale (2003), a definição do teor de projeto de ligante pode ser realizada de duas maneiras distintas. A primeira é baseada nas normas estabelecidas pela ISSA, procedimentos que também são abordados nas especificações do DNIT e pelas normas da ABNT. O segundo é realizado através de um procedimento definido como Marshall modificado. Esse procedimento consiste na determinação da estabilidade Marshall e da Fluência, similar ao aplicado em misturas a quente como o Concreto Asfáltico (CA). Assim como foi adotado por Reis (2005), Castro (2011) e Vasconcelos (2013), será adotado o procedimento da ISSA para definição do teor de projeto da mistura, pois esse é o processo mais utilizado e os resultados aqui obtidos poderão ser comparados com os obtidos nos trabalhos aqui citados.

Escolhida a metodologia de dosagem, o teor de projeto de ligante do MRAF é obtido a partir dos resultados do ensaio de WTAT (NBR 14746/2001) e da determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT (NBR 14841/2002). Apesar dos procedimentos dos ensaios de WTAT e LWT realizados existirem especificações nacionais, eles também são baseados nas normas americanas ISSA TB-100/1990 e ISSA TB-109/1990, respectivamente, fazendo com que os resultados obtidos aqui possam ser comparados com outros trabalhos internacionais que seguiram a mesma normativa.

Para a determinação do teor de ligante, são moldados corpos de prova com teores distintos (geralmente com uma variação de 0,5%) e os mesmos são submetidos aos dois ensaios. Os resultados obtidos desses ensaios são apresentados em um mesmo gráfico onde a interseção das duas curvas obtidas determina o teor de projeto a ser adotado. Pode-se observar que, na Figura 53, conforme indicado pela seta, pode-se observar que o teor de projeto é obtido para valores próximos de 11%.

Figura 52 – Exemplo de definição do teor de projeto de ligante



Fonte: Autor (2014)

No ensaio de perda por abrasão úmida (WTAT), mede-se o desgaste de um corpo de prova de MRAF e define-se também o teor mínimo de ligante a ser adotado. Inicia-se o ensaio pesando o corpo de prova e em seguida o mantém imerso em água durante 1h. Finalizado esse período de imersão, submete-se a amostra ao desgaste através do equipamento designado para o procedimento durante 5 minutos. Finalizado o tempo de desgaste, lava-se o corpo de prova para retirar todo o material solto e novamente a amostra é levada à estufa a uma temperatura de 60 °C até atingir peso constante.

O resultado do ensaio é obtido calculando a perda de peso sofrida pela amostra submetida ao desgaste. O DNIT (DNIT – ES 035/2005) estabelece uma perda máxima de 538 g/m². No caso da amostra ficar imersa em água por seis dias, a tolerância de desgaste se eleva para 807 g/m². Sabe-se que amostras com teores de ligante mais elevados têm uma tendência a sofrer um desgaste menor, pois os agregados nesse caso estão melhor envolvidos, dificultando o seu desprendimento durante a realização do ensaio. A realização desse processo está ilustrada na Figura 53.

Figura 53 – Realização do ensaio WTAT



Fonte: Castro (2011)

A realização do ensaio de adesão de areia pela máquina LWT permite aferir a exsudação do corpo de prova e determina o teor máximo de ligante a ser empregado no MRAF. O procedimento é dividido em duas partes. Na primeira parte, a amostra de MRAF é submetida à um carregamento de 56 kg durante 1000 ciclos na máquina LWT. Em seguida, lava-se a amostra e leva-se à estufa novamente a 60 °C até atingir peso constante. A segunda parte consiste em medir a adesão de areia à amostra que varia de acordo com a taxa de ligante empregada. Pesa-se cerca de 200 g de areia de granulometria conhecida (fração média fina) e aquece a mesma até a temperatura de 80 °C. Em seguida, essa areia aquecida é colocada sobre a amostra submetida à primeira parte e a mesma é submetida a mais 100 ciclos de carregamento na máquina LWT.

Ao final do segundo ciclo, o corpo de prova é pesado novamente e a diferença de peso é determinada pela areia aderida. O DNIT (DNIT ES 035/2005) especifica uma adesão máxima de 538 g/m², indicando para esse nível o teor máximo de ligante a ser adotado. Amostras com teores de ligante mais elevados exsudam mais facilmente, facilitando uma maior quantidade de areia aderida. A realização desse processo está ilustrado na Figura 54.

Figura 54 – Realização do ensaio de adesão de areia



a) amostras curadas



b) realização dos 1000 ciclos



c) amostra ensaiada (1ª parte)



d) realização 100 ciclos c/areia (2ª parte)



e) amostras após adesão da areia

Fonte: Castro (2011)

Definido o teor de ligante para o MRAF, a verificação da compatibilidade ligante-agregado é feita seguindo as diretrizes estabelecidas no ensaio de determinação da adesividade da mistura (NBR 14757/2001). Essa norma, baseada na norma americana ISSA TB-114/1990, determina a resistência à água do asfalto residual aderido ao agregado. A execução do procedimento consiste em submeter uma amostra curada de MRAF colocada em um béquer preenchido com 400 mL de água destilada em ebulição durante 3 minutos, conforme ilustrado na Figura 55. Em seguida, aguarda-se a secagem da amostra para posterior verificação da mesma.

O resultado desse ensaio é dado através de análise visual, verificando-se a área que se manteve recoberta pelo resíduo asfáltico. No caso de verificação de 90% ou mais de área recoberta, considera-se uma adesividade satisfatória. Já entre 75% e 90%, considera-se uma adesividade razoável e abaixo de 75% é considerada não satisfatória.

Figura 55 – Ensaio de adesividade



Fonte: Vasconcelos (2013)

O teor de aditivo é calculado através do ensaio de determinação do tempo mínimo de misturação (NBR 14758/2001). Essa norma é baseada na norma americana ISSA TB-113/1990 e consiste em aferir o tempo de ruptura da emulsão através da realização de uma mistura feita em laboratório. Para a realização desse ensaio, são necessários cerca de 300g de agregado. Confecciona-se uma amostra de MRAF, mantendo sua consistência fluida através de movimentos circulares a uma velocidade de aproximadamente 60RPM e com um cronômetro inicia-se a contagem do tempo do tempo de realização do ensaio.

Durante a execução do procedimento, o MRAF que inicialmente possui consistência fluida, inicia um processo de “endurecimento”, indicando o rompimento da emulsão, não sendo possível continuar misturando o material. A tendência é de que a mistura se consolide nesse momento, como está ilustrado na Figura 56. Quando ocorre esse fenômeno, significa que a emulsão rompeu, devendo ser registrado o tempo que decorreu do início da mistura até o momento da ruptura da emulsão. Esse tempo é definido como o tempo mínimo de misturação.

Figura 56 – Aspecto do MRAF após realização do ensaio de tempo mínimo de misturação



Fonte: Castro (2011)

A NBR 14758/2001 estabelece um tempo mínimo de 120 segundos para que se inicie o processo de rompimento da emulsão. Caso o tempo aferido seja menor, o que deve ser

feito é acrescentar uma quantidade de aditivo à água de modo que se atinja o tempo de 120 segundos. Após conversas com alguns técnicos e especialistas da área de pavimentação, foi constatado que esse tempo de 120 segundos preconizado pela norma não é suficiente para garantir a fluidez desejada para espalhamento do MRAF no campo. Eles alegam que o ensaio é realizado em laboratório em condições de temperatura e umidade controladas, não representando a realidade de regiões de clima muito quente como no estado do Ceará.

Sabe-se que a elevação da temperatura provoca uma redução do tempo de ruptura da emulsão. Um tempo de mistura de 120 segundos em laboratório será reduzido quando a mistura for concebida sob condições de forte calor. O rompimento precoce da emulsão acarreta em prejuízos durante o processo de aplicação do MRAF.

Baseado nisso, técnicos e especialistas em MRAF, assim como Ceratti e Reis (2011), indicam que o tempo de mistura em laboratório deve estar compreendido entre 180 a 300 segundos, garantindo assim um tempo adequado para o rompimento da emulsão nas aplicações de campo. Com base no que foi citado anteriormente, o tempo considerado neste trabalho foi de 240 segundos.

3.4.5 Análise do Comportamento do MRAF em Laboratório

Esta etapa da pesquisa foi realizada com o intuito de avaliar o desgaste superficial e o tempo de liberação ao tráfego baseado no tempo de cura do MRAF. Utilizou-se o ensaio de perda por abrasão úmida (WTAT) e o ensaio de determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro (NBR 14798/2002). O ensaio do coesímetro é baseado na norma americana ISSA TB-139/1990.

O ensaio de WTAT mediu o desgaste médio das amostras de MRAF. Finalizado o procedimento de dosagem, foram confeccionados 9 corpos de prova para serem submetidos ao mesmo ensaio, sendo repetido esse procedimento para todos os materiais ensaiados nesta pesquisa. Essa quantidade de amostras permite que se obtenha, além de um valor médio de desgaste para cada tipo de agregado, parâmetros estatísticos como desvio padrão, variância e coeficiente de variação, proporcionando uma melhor avaliação dos dados obtidos.

A definição do tempo de liberação ao tráfego foi realizada através dos resultados do ensaio de coesão da mistura. Esse ensaio consiste em medir a resistência ao arrancamento de agregados em uma superfície de uma amostra de MRAF durante o seu processo de cura. Foram moldadas e ensaiadas amostras nos tempos de 30min, 60min, 90min, 120min e 150min. Em cada período citado, foi medido o valor do torque obtido. O procedimento ocorre

com a utilização de um coesímetro e está descrito a seguir. Ceratti e Reis (2011) citam que o referido ensaio pode ser usado para otimizar a quantidade de filer que será utilizado na composição do MRAF.

Inicialmente, o coesímetro é calibrado regulando a pressão de entrada do aparelho para 1,7bar. Em seguida, a amostra de MRAF é colocada abaixo do pistão presente no equipamento e inicia-se uma compressão da amostra pelo mesmo. O tempo de compressão necessário é de 6 segundos. Utilizando um torquímetro, posicionado na parte superior do pistão, gira-se o mesmo em um movimento horizontal num ângulo de 90° no período de 1 segundo e anota-se o valor do torque obtido. O procedimento é repetido para as amostras seguintes nos tempos citados anteriormente.

De acordo com a especificação utilizada, para o tempo de 30min, é aceitável que o valor do torque obtido seja de no mínimo 12kg.cm, indicando que a cura está ocorrendo de forma satisfatória. Para o tempo de 60min, espera-se obter um torque com valor superior a 20kg.cm, valor mínimo aceitável para ocorrer a liberação ao tráfego. A sequência desse processo está ilustrada na Figura 57 e o aspecto da amostra ensaiada para o tempo de 60min pode ser observado na Figura 58.

Figura 57 – Realização do ensaio de coesão



a) torquímetro



b) calibração do equipamento



c) compressão da amostra



d) ajuste do torquímetro



e) aplicação do torque (90°)



f) decompressão da amostra

Fonte: Castro (2011)

Figura 58 – Detalhe da amostra de MRAF após ensaio de coesão



Fonte: Castro (2011)

3.5 3ª Etapa do Programa Experimental – Análise do Comportamento do MRAF Através do Simulador de Tráfego de Laboratório

A terceira etapa do procedimento experimental analisou o comportamento do MRAF submetido à ação do simulador de tráfego do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC). O intuito de submeter os materiais escolhidos nesta pesquisa ao simulador foi de analisar as variações sofridas no MRAF utilizando agregados minerais e alternativos quanto às deformações permanentes, desgaste superficial, além de parâmetros de macrotextura e microtextura, esses dois últimos ligados à drenabilidade e coeficiente de atrito do pavimento respectivamente.

Além disso, sabe-se que geralmente o MRAF é empregado como manutenção preventiva de pavimentos. No trabalho em questão, também foi analisado o comportamento desse tipo de revestimento quando utilizado como revestimento para pavimentos de baixo volume de tráfego. Visando estabelecer um comparativo com soluções comumente empregadas para pavimentos delgados, como os tratamentos superficiais duplos e o *Cape Seal*, os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com os resultados apresentados por Vasconcelos (2013).

Para eliminar variáveis que pudessem interferir na análise dos resultados obtidos, optou-se por empregar uma metodologia similar ao trabalho citado no parágrafo anterior. Os revestimentos do tipo MRAF foram moldados sobre uma base de solo-brita.

A base escolhida e os revestimentos a serem ensaiados foram construídos em placas com dimensões de 5cm de altura, 18cm de largura e 50cm de comprimento, tamanho padrão do simulador de tráfego utilizado. Nesse equipamento são ensaiadas duas placas ao

mesmo tempo e os resultados apresentados são as médias aritméticas das medições realizadas nas duas placas. O carregamento escolhido para ser aplicado nas placas foi de 75kg, seguindo as diretrizes indicadas na metodologia desenvolvida por Vasconcelos (2013) e o modo como o mesmo foi aplicado consistiu em duas rodas presas à um eixo transversal ao sentido de movimentação das mesmas. O simulador de tráfego de laboratório utilizado está ilustrado na Figura 59.

Figura 59 – Simulador de tráfego de laboratório utilizado



Fonte: Autor (2014)

O Sistema Integrado de Simulação de Tráfego Normatizado (SISTRAN) foi o simulador de tráfego de laboratório utilizado nesta pesquisa. Esse equipamento está em operação no Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LMP) da UFC. Através desse simulador acredita-se ser possível simular a carga e o tráfego para um período de projeto de 10 anos. Seu mecanismo de funcionamento de assemelha com o simulador desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC).

Projetado para simular misturas a quente com espessura de até 10cm, tem-se também utilizado esse equipamento para realizar estudos em revestimentos delgados executados sobre bases granulares imprimadas. Os primeiros trabalhos que empregaram o simulador para analisar o comportamento de revestimentos delgados foram Pereira (2013) e Vasconcelos (2013). Portanto, procurou-se seguir a metodologia de moldagem das desenvolvidas pelos autores aqui citados visando consolidar esta nova finalidade atribuída à esse equipamento.

Devido à diversidade de informações que serão apresentadas em seguida, o detalhamento dos procedimentos que foram executados durante a terceira etapa do programa experimental foram divididos em duas partes. A primeira parte consiste em apresentar os

materiais escolhidos para compor a base e a metodologia adotada na construção da mesma e a segunda parte apresenta a confecção do revestimento asfáltico sobre a base.

3.5.1 Escolha do Materiais e Construção da Base

O solo escolhido para ser utilizado na construção da base de solo-brita foi coletado na região de Maracanaú-CE. Esse material, de característica arenosa, foi caracterizado segundo a norma do Departamento de Estradas de Rodagem (DER) do estado de São Paulo (DER ET-DE-P00/006), assim como a brita $\frac{3}{4}$, a mesma utilizada nos trabalhos citados no tópico anterior. A proporção adotada no solo-brita foi de 50% – 50% . Os materiais utilizados como base estão ilustrados na Figura 60.

Figura 60 – Material utilizado para o solo-brita



a) solo arenoso

b) brita $\frac{3}{4}$

Fonte: Autor (2014)

Finalizada a caracterização do material, definiu-se a curva de compactação da mistura solo-brita na energia modificada para moldagem das placas. Decidiu-se realizar a compactação da base de uma vez só, já que a base teria a espessura de 3,5cm, restando 1,5cm para o revestimento. Para os 3,5cm de base, foram necessários cerca de 7,8kg de material e a quantidade de golpes para se atingir a energia modificada foi de 416 golpes. O Grau de Compactação (GC) foi obtido através do ensaio do frasco de areia (DNER – ME 092/94). O GC foi aferido na primeira placa moldada (Figura 61) visando constatar que a densidade do solo na placa era a mesma encontrada durante o processo de compactação do solo-brita.

Figura 61 – Determinação do GC da base de solo-brita



Após a compactação da base, as placas foram levadas para a estufa a uma temperatura de 60°C durante 24 horas para realizar a secagem das mesmas. Em seguida, as placas moldadas foram imprimadas seguindo a metodologia apresentada por Rabêlo (2006) que consiste em varrer a base, realizar uma irrigação prévia da mesma antes de receber o asfalto diluído de cura rápida do tipo CM-30. A temperatura de aplicação do ligante foi de 50°C com uma taxa em torno de 0,8L/m².

De acordo com alguns estudos realizados, como Rabêlo (2006), Vasconcelos (2009) e Silva (2010), a penetração considerada satisfatória do ligante na base imprimada deve ficar entre 4mm e 10mm. Valores inferiores a 4mm não promovem uma aderência adequada do revestimento à base e valores superiores a 10mm podem gerar o arrancamento da base com a ação contínua do tráfego. O procedimento de construção da base de solo-brita é apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Moldagem da base de solo-brita



a) homogeneização do material



b) material na umidade ótima



c) compactação da placa



d) aferição da espessura da camada



e) varrição da base



f) irrigação da base



g) imprimação da base



h) aspecto base imprimada

Fonte: Autor (2014)

3.5.2 Moldagem do MRAF sobre a Base de Solo-Brita Imprimada

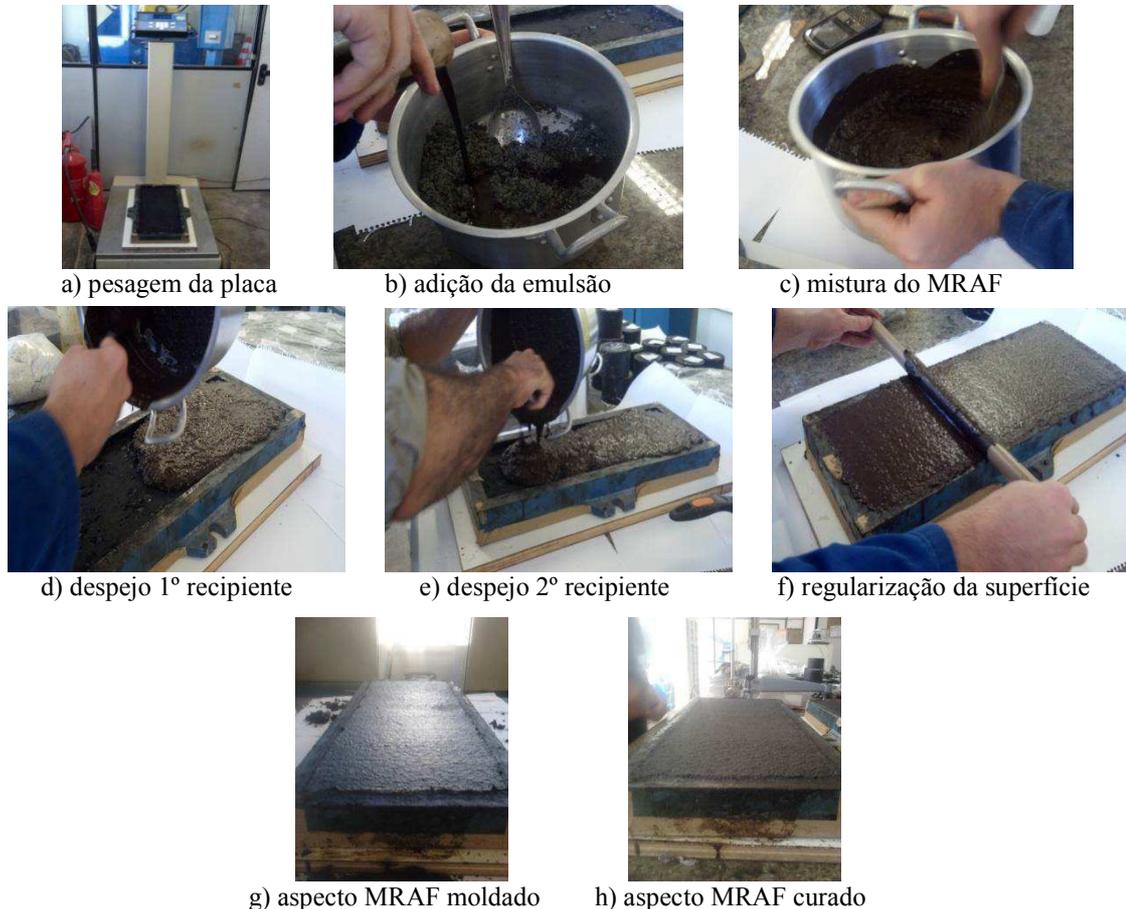
A moldagem e o processo de cura do MRAF ocorrem de maneira similar ao que foi apresentado no item 3.4.1 deste Capítulo. Devido à quantidade de material, cerca de 3,2kg para agregado mineral ou fresado e 4,5kg para o AS, são necessários 2 recipientes para promover uma mistura mais homogênea possível.

Um detalhe que deve ser mencionado neste item é que, diferente do que ocorre em campo, a aplicação do MRAF sobre a base se dará de uma vez só. Na prática, o método executivo exige que seja executada uma primeira camada (de aproximadamente 0,8cm), libera-se o tráfego para ocorrer uma compactação daquele revestimento e só depois de no mínimo 48h é que se aplica a segunda camada de MRAF na rodovia. Esse procedimento foi impossibilitado de ocorrer em laboratório pelo fato de não ser possível regular a altura da placa do simulador.

Visando minimizar essa diferença, os resultados dos afundamentos resultantes dos primeiros 100 ciclos do simulador não serão levados em consideração para o cálculo da

evolução das deformações sofridas pelo MRAF ao longo do processo, pois esse período foi considerado como a compactação do revestimento que é realizada pela ação do tráfego. A sequência de moldagem do MRAF está ilustrada na Figura 63.

Figura 63 – Moldagem do MRAF sobre a base de solo-brita imprimada



Fonte: Autor (2014)

3.5.3 Avaliação do Comportamento das Placas de MRAF através do Simulador de Tráfego

Após o término da moldagem das placas, submeteu-se as mesmas ao simulador de tráfego da UFC. O ensaio realizado seguiu as diretrizes da norma francesa NF P98-253-1 (AFNOR, 1991) – *Déformation Permanent des Mélanges Hydrocarbonés*. O emprego do simulador tem como objetivo avaliar os efeitos exercidos pelo carregamento imposto pelo tráfego.

Durante essa avaliação, os aspectos observados foram a deformação permanente acumulada, o desgaste superficial, a microtextura e a macrotextura. A macrotextura foi aferida através do ensaio de mancha de areia (ASTM-E-965-96) e a microtextura foi analisada através do ensaio de pêndulo britânico (ASTM-E-303-93). Deve ser mencionado que os ensaios de

pêndulo e mancha de areia foram executados antes e ao final do ciclo de ensaios do simulador.

De acordo com a norma francesa NF P98-253-1, a medição dos afundamentos deve ocorrer em posições padrões demarcadas na placa de ensaio e a carga recomendada de aplicação é de 500kg para misturas a quente com espessuras maiores do que as dimensionadas para revestimentos delgados voltadas para pavimentos de baixo volume de tráfego. Vasconcelos (2013) cita que, para o carregamento proposto pela norma, suas placas ensaiadas entraram em processo de ruptura nos primeiros 100 ciclos. No entanto, o referido autor optou em utilizar uma carga de 75kg onde foi possível avaliar a evolução do desgaste e da deformação ao longo dos ciclos.

Para o trabalho em questão, foi adotada a mesma magnitude de carregamento, onde ao final dos ciclos de ensaio foi possível estabelecer um comparativo do comportamento do MRAF com o TSD e *Cape Seal* ensaiados por Vasconcelos (2013). As leituras dos afundamentos foram realizadas em 100, 500, 1000, 3000, 5000, 7000 e 10000 ciclos conforme ilustrado na Figura 64. Adotou-se também como critério de parada do ensaio um afundamento de trilha de roda de 10 mm. Esse valor é o mesmo adotado como valor máximo admitido nos padrões de desempenho em obras do programa CREMA do DNIT, conforme indicado na Instrução de Serviço/DG N° 10 (2013).

Figura 64 – Medição dos afundamentos no simulador



Fonte: Autor (2014)

O ensaio de mancha de areia consiste em calcular a profundidade da textura superficial de uma rodovia. A mancha possui formato circular e a areia utilizada possui uma

granulometria conhecida, passante na peneira nº60 e retida na peneira nº80 (CERATTI e REIS, 2011).

O volume de areia a ser espalhado sobre o pavimento é padronizado. Através de um pistão de base circular, a mancha de areia é formada a partir de movimentos circulares, tendo o cuidado de se distribuir a areia de forma igualitária. Quando não for possível mais espalhar o material, mede-se o diâmetro da circunferência em quatro direções distintas. A profundidade média da textura (HS) é calculada através da Equação 1. O procedimento do ensaio está ilustrado na Figura 65.

$$HS = (4.V) / (D^2 . \pi) \quad (1)$$

Onde:

HS = altura média da mancha de areia;

V = volume de areia conhecido;

D = diâmetro médio da macha (medido).

Figura 65 – Ensaio de Mancha de Areia



a) pistão preenchido com areia



b) espalhamento da mancha



c) medição do diâmetro

Fonte: Autor (2014)

Como pode ser percebido na figura anterior, a quantidade de areia utilizada no ensaio faz com que o espalhamento da mancha seja prejudicado. Visando solucionar esse problema, utilizou-se o mesmo artifício empregado por Pereira (2010) e Rodrigues (2013). Para a realização do ensaio, o volume de 25 cm³ de areia necessário para o preenchimento do pistão foi reduzido à metade. Os referidos autores mostraram que os resultados não apresentam variações que impossibilitem a redução do volume de areia na realização do ensaio. Os resultados obtidos com os dois volumes foram comparados e estão apresentados no Capítulo 4.

Com relação aos parâmetros de drenagem, quanto maior for o valor da profundidade calculada, melhor será a capacidade do pavimento de drenar a água contida em sua superfície, diminuindo os riscos de acidentes por aquaplanagem de veículos. Ceratti e Reis (2011) comentam que a existência de um filme de água com espessuras maiores do que

5mm e velocidade de deslocamento de um veículo superior a 100km/h faz com que o risco de aquaplanagem seja iminente.

O DNIT (2006) em suas especificações cita que os valores de Hs devem estar situados entre 0,6mm e 1,2mm. Segundo Bernucci *et al.* (2010), valores acima de 1,2mm causam aumento do consumo de pneus e de combustível, além de favorecer o aumento do ruído ao trafegar em rodovias com essas características. A Tabela 11 estabelece uma classificação da macrotextura com relação à altura da mancha de areia.

Tabela 11 – Classificação da Macrotextura

Profundidade Média (mm)	Textura Superficial
HS < 0,20	Muito fina ou muito fechada
0,20 < HS < 0,40	Fina ou fechada
0,40 < HS < 0,80	Média
0,80 < HS < 1,20	Grosseira ou aberta
HS > 1,20	Muito grosseira ou muito aberta

Fonte: DNIT (2006)

O ensaio do pêndulo britânico foi utilizado para medir a microtextura dos revestimentos estudados. O equipamento utilizado fornece parâmetros de coeficiente de atrito pneu-pavimento, indicador importante quando se está estudando segurança viária. Tal indicador não poderia deixar de ser analisado quando se testa novos materiais em revestimentos asfálticos, pois além de serem resistentes às solicitações do tráfego, os materiais alternativos devem proporcionar ao usuário da rodovia padrões de segurança viária aceitáveis pelas normas vigentes.

Na extremidade do pêndulo, existe uma placa de borracha que simula o pneu de um veículo. Montado o equipamento, a haste que possui essa placa é presa na parte superior e posteriormente é liberada executando um movimento em forma de arco fazendo com que essa placa entre em contato com o pavimento. Existe uma escala gravada no equipamento que deve ser registrada até onde a haste foi deslocada depois do arraste da placa com o revestimento. Para efeito de determinação do resultado, são realizadas cinco medições para cada ciclo de ensaio, sendo descartada a primeira medida. Deve ser lembrado que o pêndulo deve ser calibrado e nivelado sempre que se iniciar um novo ensaio. A Figura 66 ilustra a realização do ensaio.

Figura 66 – Realização do ensaio de Pêndulo Britânico



a) detalhe molhagem prévia do revestimento



b) equipamento montado



c) realização do ensaio



d) aferição do resultado

Fonte: Autor (2014)

Ceratti e Reis (2011) comentam que os valores determinados no Pêndulo Britânico correspondem ao Valor de Resistência à Derrapagem (VRD) de um pneumático padrão derrapando sobre um pavimento com uma velocidade de 48 km/h. A Tabela 12 ilustra as classes de microtextura em função do valor do VRD. O Manual de Restauração do DNIT (2006) estabelece uma escala de classificação da rodovia quanto ao VRD medido com o Pêndulo Britânico. As classes estão mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 – Classificação da Microtextura

VRD	Classificação
VRD < 25	Perigosa
25 < VRD < 31	Muito Lisa
32 < VRD < 39	Lisa
40 < VRD < 46	Insuficientemente Rugosa
47 < VRD < 54	Medianamente Rugosa
55 < VRD < 75	Rugosa
VRD > 75	Muito Rugosa

Fonte: DNIT (2006)

De acordo com a especificação do DNIT (ES 031/2006), para execução de concreto asfáltico (CA), os valores mínimos recomendados devem ser no mínimo de um VRD maior ou igual a 45. Entretanto, Bernucci *et al.* (2007) ressaltam que o valor mínimo para um VRD deve ser de 47. Dessa forma, garante-se como condição mínima de aceitação um pavimento com microtextura considerada medianamente rugosa. Esse parâmetro deve ser

sempre levado em consideração em análise da condição de superfície de pavimentos, especialmente em rodovias de tráfego intenso.

3.6 4ª Etapa do Programa Experimental – Análise Econômica de Soluções Alternativas Propostas para o MRAF

A última etapa do programa experimental desta dissertação foi criada com o intuito de analisar a viabilidade econômica do emprego dos materiais alternativos estudados nesta dissertação. Nas etapas anteriores, foi possível avaliar a viabilidade técnica e ambiental dos mesmos, agora esta etapa complementa o objetivo geral proposto no primeiro Capítulo do trabalho.

Baseado em composições de custo criadas para os serviços de MRAF pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE), foram calculados os preços de aplicação do MRAF, por m² e por km considerando uma rodovia com largura de 7m, utilizando os materiais empregados nesta pesquisa. De acordo com a dosagem realizada e com os preços coletados no mercado do ligante, aditivo e dos agregados alternativos aqui estudados, foi possível estabelecer um comparativo de custos de aplicação quando modificada a matriz de agregado que compõe o MRAF. Os resultados aqui obtidos serão comparados com os resultados apresentados por Castro (2011), onde foram feitas composições de custo com o emprego do agregado mineral.

Deve-se atentar para o fato de que os coeficientes dos insumos para cada tipo de material estudado podem ser alterados devido às diferenças de taxas e teores calculados nas etapas anteriores do programa experimental. A análise econômica é indispensável em um trabalho como este, pois ressalta a importância de se buscar soluções alternativas para emprego em obras rodoviárias, mitigando os impactos ambientais gerados e proporcionando uma economia em suas aplicações.

3.7 Considerações Finais

Neste capítulo, a metodologia empregada na dissertação foi apresentada. Foram citados os materiais selecionados, além de todos os ensaios realizados para caracterização dos mesmos, garantindo assim o enquadramento nos padrões exigidos pelas normas vigentes. Além disso, foram detalhados os ensaios realizados com as misturas de MRAF necessários para a dosagem e avaliação do seu comportamento em laboratório. O procedimento de

avaliação do MRAF com simulador de tráfego de laboratório também foi apresentado. Por último, foi mostrada a metodologia adotada na avaliação econômica das soluções alternativas aqui propostas. No próximo capítulo, os resultados obtidos a partir da execução do programa experimental aqui descrito serão apresentados e discutidos.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos durante a realização do programa experimental desta dissertação. Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais coletados (agregados e emulsão), da dosagem do MRAF e dos ensaios que avaliam o comportamento do revestimento serão apresentados e discutidos. Além disso, será mostrado um levantamento de custos de aplicação por metro quadrado de MRAF quando utilizado agregados alternativos, sendo esses custos comparados com o emprego de agregados minerais.

4.2 Resultados da 1ª Etapa do Programa Experimental

4.2.1 Agregado Siderúrgico

4.2.1.1 Granulometria

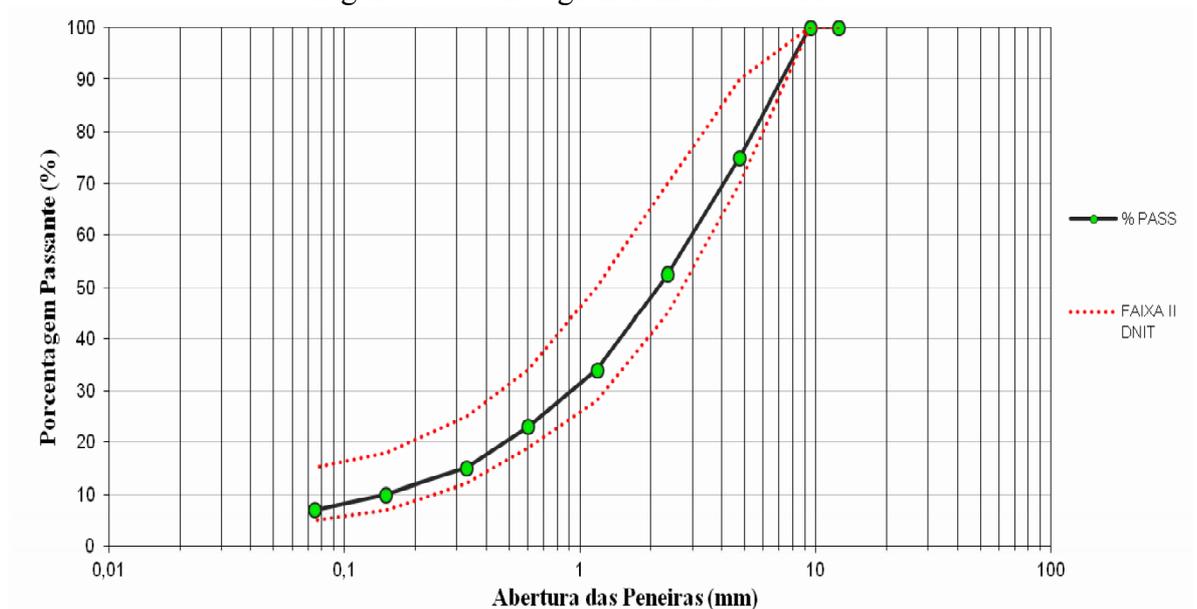
O AS, coletado na região de Maracanaú-CE, foi inicialmente submetido ao ensaio de granulometria por peneiramento. No entanto, verificou-se que a amostra coletada não se enquadrou em nenhuma faixa granulométrica do DNIT para MRAF. Para realizar o programa experimental, optou-se por fracionar o material de modo a se obter uma curva granulométrica de projeto contida na faixa II do DNIT (ver Tabela 13 e Figura 67). Essa faixa é indicada para rodovias que possuem tráfego mais elevado de acordo com a composição dos materiais selecionados (brita, pó de pedra e cimento).

Tabela 13 – Granulometria do AS

PENEIRAS	MATERIAL		COMPOSIÇÃO			LIMITES DNIT (FAIXA II)	
	AS (A)	CIMENTO (B)	A	B	% MISTURA	LIM INF	LIM. SUP
			99 %	1 %			
1/2"	100,0	100,0	99,0	1,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	100,0	100,0	99,0	1,0	100,0	100,0	100,0
Nº 04	74,7	100,0	74,0	1,0	79,0	70,0	90,0
Nº 08	52,0	100,0	51,5	1,0	54,3	45,0	70,0
Nº 16	33,3	100,0	33,0	1,0	40,8	28,0	50,0
Nº 30	22,2	100,0	22,0	1,0	32,9	19,0	34,0
Nº 50	14,1	100,0	14,0	1,0	24,4	12,0	25,0
Nº 100	9,1	100,0	9,0	1,0	14,7	7,0	18,0
Nº 200	6,1	100,0	6,0	1,0	8,6	5,0	15,0

Fonte: Autor (2014)

Figura 67 – Curva granulométrica do AS



Fonte: Autor (2014)

4.2.1.2 Índice de Forma

O agregado utilizado para o ensaio do Índice de Forma (DNER ME-086/94) foi a brita 3/8". Na realização do procedimento, esse tipo de agregado está enquadrado na graduação D. Obteve-se para o caso do AS o resultado de 0,96. Sabendo-se que a escala de resultados desse ensaio vai de 0 a 1. Quanto mais próximo o valor for de 1,

considera-se o formato mais cúbico, enquanto agregados lamelares têm resultados mais próximos de zero. Materiais de boa cubicidade são mais adequados para emprego em obras rodoviárias, pois a sua estrutura oferece uma maior resistência à solicitação do tráfego, garantindo um melhor intertravamento de sua estrutura. Já os agregados lamelares tendem a ser quebradiços, podendo essa quebra ocorrer logo nas primeiras passagens de tráfego, reduzindo a vida útil do pavimento.

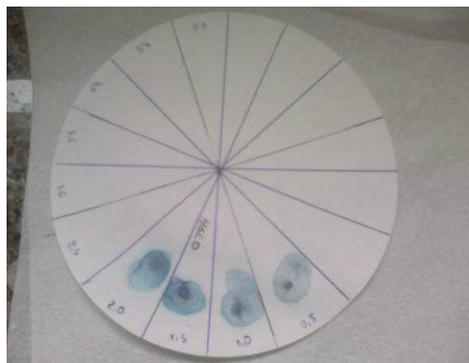
4.2.1.3 *Abrasão Los Angeles*

A determinação da resistência ao desgaste dos agregados através do ensaio de Abrasão Los Angeles seguiu a norma DNER-ME 035/98. Para o caso em questão, escolheu-se a graduação do tipo C indicada na norma. O resultado obtido para o AS foi de 17%. Os limites estabelecidos nas especificações nacionais, para revestimentos do tipo MRAF, indicam um valor máximo de 40%. Vale ressaltar que valores ligeiramente superiores ao limite podem ser aceitos, caso se tenha registros de emprego desse tipo de agregado em obras de MRAF. Para o AS utilizado na pesquisa, considerou-se como satisfatório o resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles.

4.2.1.4 *Azul de Metileno*

O resultado do ensaio de azul de metileno para o AS, foi de 2,0mg/g, conforme ilustrado na Figura 68. O limite estabelecido na norma é de 7,0mg/g para agregados graníticos e de 10,0mg/g para agregados basálticos. Assim sendo, há indícios que ocorra compatibilidade entre o agregado e a emulsão estudada pois agregados com baixo valor de azul de metileno são considerados pouco reativos.

Figura 68 – Ilustração do resultado do Azul de Metileno para o AS



Fonte: Autor (2014)

Embora o resultado obtido nesse ensaio seja satisfatório, deve ser mencionado que somente o resultado desse procedimento não é suficiente para garantir que haverá uma boa compatibilidade agregado-emulsão. Recomenda-se também a realização do ensaio do Tempo Mínimo de Misturação (NBR 14758/2001).

Existem casos relatados por especialistas na área de alguns agregados que mesmo apresentando resultados do ensaio de azul de metileno aceitáveis não se mostraram compatíveis com a emulsão asfáltica RC1C-E. Dada essa incompatibilidade, é necessário o emprego de uma quantidade maior de aditivos na mistura, visando aumentar o tempo de ruptura da emulsão. Porém, o acréscimo da quantidade de aditivo pode inviabilizar a técnica devido ao aumento de custos, como foi mostrado por Castro (2011).

4.2.1.5 Equivalente de Areia

O ensaio de Equivalente de Areia foi realizado através da norma DNER ME-054/94. Nesse procedimento é medida a quantidade de argila e impurezas presentes na fração miúda do agregado. O valor obtido para o AS foi de 83%. O limite mínimo indicado nas especificações do DNIT para aplicações de MRAF é de 60%, o que implica que o AS estudado é um agregado com baixo teor de argila e impurezas.

4.2.1.6 Ensaio de Expansão

Para ser aplicado em obras de pavimentação, o AS deve estar curado, ou seja, não deve ocorrer mais a expansão do mesmo após sua aplicação em camadas granulares ou em revestimentos asfálticos. A norma DNER-ME 262/94 especifica que o AS não deve apresentar um valor de expansão maior que 3%. A expansão do material utilizado nessa pesquisa foi aferida através do método DNIT-ME 113/2009. A especificação brasileira segue os mesmos procedimentos contidos na metodologia PTM-130, do Departamento de Transportes da Pensilvânia. Vale ressaltar que esse ensaio foi desenvolvido em conjunto com Vasconcelos (2013), onde foi utilizado o mesmo material tanto para compor suas amostras de MRAF como as que foram empregadas na presente dissertação.

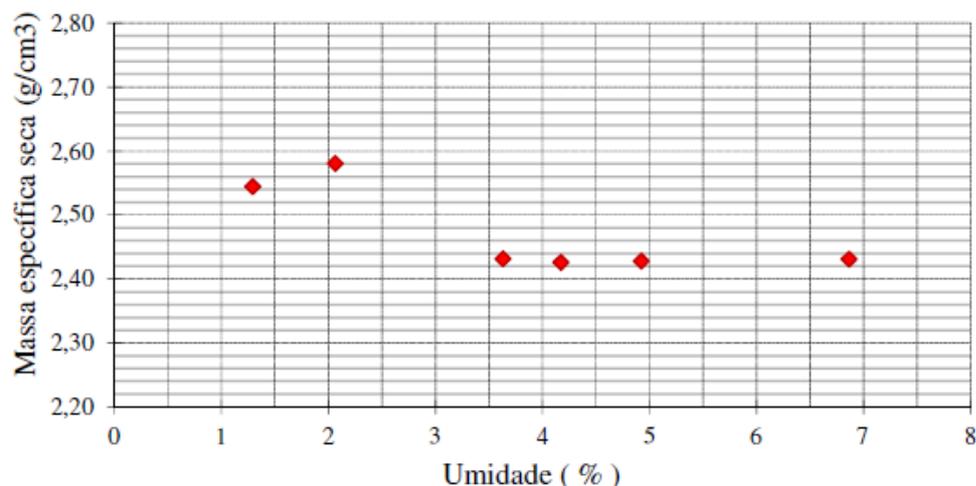
Para a realização do ensaio de expansão foram utilizados dois corpos de prova, sendo o primeiro ensaio realizado 8 meses após a coleta do AS e o segundo cerca

de 14 meses. Antes de realizar o ensaio de expansão, deve-se determinar a curva de compactação do material (DNER-ME M49/94), pois o mesmo deve ser moldado na umidade ótima.

Durante a realização do ensaio de compactação, foi verificada uma dificuldade na determinação da curva de compactação do material, não sendo possível identificar com clareza os ramos ascendente e decendente. Castelo Branco (2004) também relatou problemas para encontrar a umidade ótima desse material proveniente da mesma siderúrgica.

Finalizado o procedimento de compactação do material, chegou-se a um resultado pouco comum quando comparado com curvas de materiais empregados para camadas granulares de pavimentos. Porém, este resultado aqui mostrado representa o comportamento do AS empregado na presente pesquisa. A curva de compactação do AS está ilustrada na Figura 69.

Figura 69 – Curva de Compactação do AS

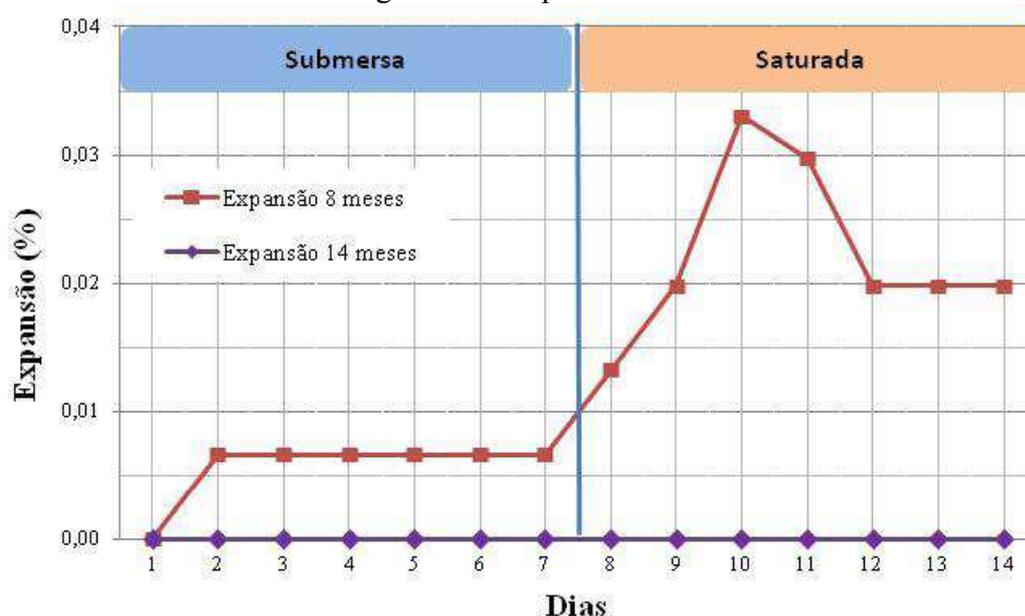


Fonte: Vasconcelos (2013)

De acordo com a Figura 69, pode-se concluir que a umidade ótima está situada entre 2,0% e 3,5%. Para o caso em questão, adotou-se como umidade ótima o valor de 2,5%. Vasconcelos (2013) citou ainda que para valores acima de 3,0%, os corpos de prova moldados evidenciavam falta de coesão no material, podendo ser explicada a pequena variação da massa específica com o aumento do teor de umidade.

Realizou-se o ensaio de expansão de acordo com o procedimento anteriormente citado e durou 14 dias, sendo que em 7 dias o ensaio foi feito na condição saturada e o restante na condição submersa. Os resultados apresentados mostram a evolução da expansão para o AS depois de 8 meses de coleta e após 14 meses, e estão ilustrados na Figura 70.

Figura 70 – Expansão do AS



Fonte: Vasconcelos (2013)

A expansão aferida para a amostra de 8 meses foi de cerca de 0,02%, valor abaixo do limite estabelecido pela DNER-ME 262/94. Para o caso da amostra de 14 meses, não verificou-se expansão. Para a amostra em questão, conclui-se que a mesma está apta para ser utilizada em obras de pavimentação. Entretanto, vale ressaltar que o período de 8 meses de cura é extenso para estocar um grande volume desse material. Na prática sabe-se que é inviável aguardar esse longo período para poder aplicá-lo como agregado em revestimentos asfálticos. Em trabalhos futuros, recomenda-se realizar o ensaio de expansão com tempos de cura reduzidos.

Em outros trabalhos anteriores que utilizaram o mesmo material proveniente da mesma siderúrgica, verificou-se que o potencial de expansão do AS produzido na região de Maracanaú/CE é pequeno. Para maiores informações consultar Castelo Branco (2004), Santos Neto (2007), Loiola (2009), Pereira (2010), Cavalcante, Pereira e Barroso (2011) e Vasconcelos (2013).

4.2.1.7 Ensaio de Lixiviação e Solubilização

A realização dos ensaios de lixiviação e solubilização dos agregados alternativos foram realizados pelo Laboratório BIOAGRI, situado em Piracicaba/SP. Com relação aos ensaios de lixiviação (NBR 10005/2004), os resultados apresentados pelo referido laboratório mostraram que tanto o AS quanto o fresado apresentaram valores de contaminantes inferiores aos limites permitidos. OS resultados do ensaio de

solubilização (NBR 10006/2004) permitiram classificar os agregados ensaiados como resíduo de Classe II (não perigoso inerte).

Loiola (2009) realizou os mesmos procedimentos com a amostras de AS provenientes da mesma empresa e verificou que no ensaio de lixiviação os contaminantes presentes estavam em concentrações abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 10005/2004. Com relação ao ensaio de solubilização, o AS foi classificado como de Classe II (resíduo não perigoso inerte).

4.2.2 Material Fresado

4.2.2.1 Granulometria

Para o caso do material fresado, foram realizadas duas granulometrias para a amostra coletada. A primeira com o material envolvido com o ligante e outra após o ligante ser extraído. Esse procedimento foi necessário para se conhecer a real granulometria do agregado que irá compor o MRAF e, além disso, verificar a influência do ligante na granulometria do material.

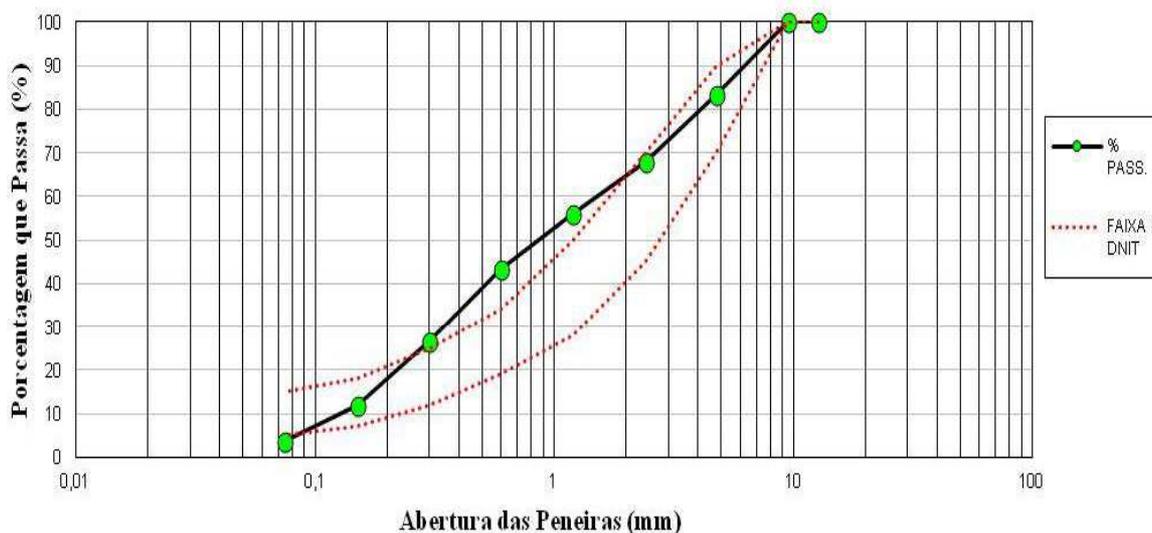
A primeira granulometria a ser apresentada é a do material fresado envolvido por ligante sem fracionamento, ou seja, a granulometria da amostra coletada. Pode-se observar que nas peneiras de nº 16, 30 e 50 ocorre uma extrapolação do limite superior e na peneira nº 200 do limite inferior da faixa II do DNIT. A granulometria do fresado está ilustrada na Tabela 14 e na Figura 71.

Tabela 14 – Granulometria do material fresado com ligante

PENEIRAS	MATERIAL		COMPOSIÇÃO			LIMITES DNIT (FAIXA II)	
	FRESADO C/ LIG. (A)	CIMENTO (B)	A	B	% MISTURA	LIM INF	LIM. SUP
			99 %	1 %			
1/2"	100,0	100,0	99,0	1,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	100,0	100,0	99,0	1,0	100,0	100,0	100,0
Nº 04	83,1	100,0	82,3	1,0	83,3	70,0	90,0
Nº 08	67,7	100,0	67,0	1,0	68,0	45,0	70,0
Nº 16	55,6	100,0	55,0	1,0	56,0	28,0	50,0
Nº 30	42,7	100,0	42,3	1,0	43,3	19,0	34,0
Nº 50	26,0	100,0	25,7	1,0	26,7	12,0	25,0
Nº 100	11,0	100,0	10,9	1,0	11,9	7,0	18,0
Nº 200	2,6	100,0	2,6	1,0	3,6	5,0	15,0

Fonte: Autor (2014)

Figura 71 – Curva granulométrica do material fresado com ligante



Fonte: Autor (2014)

Em seguida, o material fresado foi submetido ao ensaio de extração no aparelho Soxhlet para ser executada a granulometria dessa mesma amostra, só que sem o ligante, sendo considerada a granulometria somente do agregado. Pode-se constatar nessa segunda granulometria uma extrapolação do limite superior da faixa II do DNIT nas peneiras de nº 4, 8, 16, 30, 50 e 100. Esse resultado já era esperado pois além do ligante que envolve o agregado torná-lo maior, foi possível identificar a presença de grumos na amostra, que na granulometria anterior ficaram retidos nas peneiras e

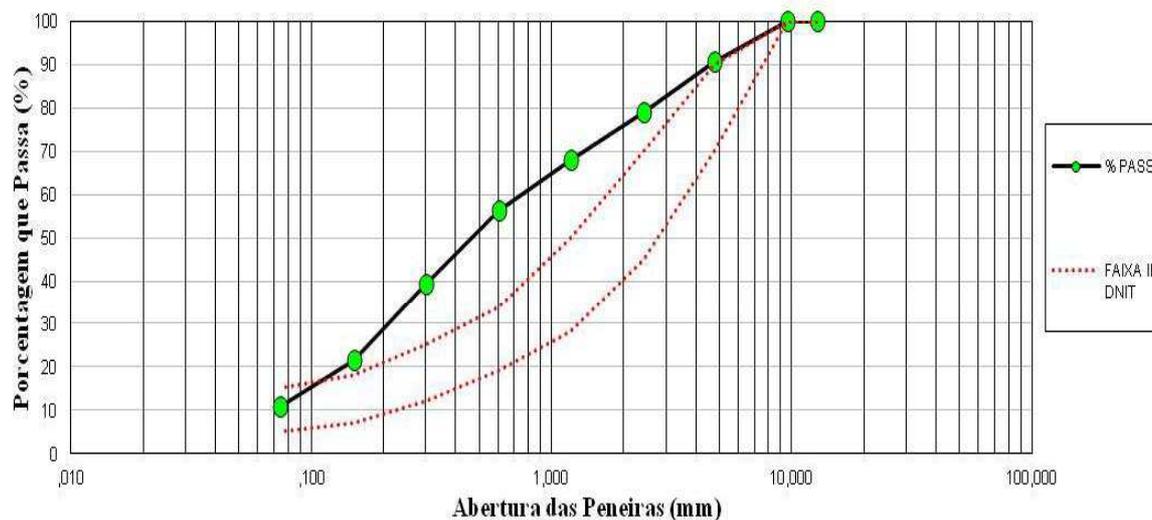
consequentemente foram classificados como agregados. Os resultados dessa segunda granulometria estão apresentados na Tabela 15 e Figura 72.

Tabela 15 – Granulometria do material fresado sem ligante

PENEIRAS	MATERIAL		COMPOSIÇÃO			LIMITES DNIT (FAIXA II)	
	FRESADO S/ LIG. (A)	CIMENTO (B)	A	B	% MISTURA	LIM INF	LIM. SUP
			99 %	1 %			
1/2"	100,0	100,0	99,0	1,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	100,0	100,0	99,0	1,0	100,0	100,0	100,0
Nº 04	90,6	100,0	89,7	1,0	90,7	70,0	90,0
Nº 08	78,7	100,0	77,9	1,0	78,9	45,0	70,0
Nº 16	67,5	100,0	66,8	1,0	67,8	28,0	50,0
Nº 30	55,9	100,0	55,3	1,0	56,3	19,0	34,0
Nº 50	38,5	100,0	38,1	1,0	39,1	12,0	25,0
Nº 100	20,6	100,0	20,4	1,0	21,4	7,0	18,0
Nº 200	9,8	100,0	9,7	1,0	10,7	5,0	15,0

Fonte: Autor (2014)

Figura 72 – Curva granulométrica do material fresado sem ligante



Fonte: Autor (2014)

Em revestimentos do tipo MRAF, o material fresado e os grumos são considerados agregados, visto que o ligante envelhecido não é dissolvido na sua totalidade quando misturado com o ligante novo. Apesar disso, os resultados apresentados na Tabela 15 foram considerados na composição granulométrica para a confecção dos corpos de prova de MRAF com fresado, tanto na proporção de 30% como na proporção de 70%. A opção em considerar a granulometria do material fresado

com o ligante extraído visa atender aos critérios e especificações dos órgãos rodoviários e suas respectivas fiscalizações, evitando distorções dos dados obtidos no laboratório com os utilizados no campo.

Para realizar essa composição, optou-se por não fazer o fracionamento do material fresado visando um melhor enquadramento na faixa granulométrica. Tal decisão foi tomada porque inicialmente tinha-se a ideia de construir um trecho experimental de MRAF com fresado. Durante o andamento do programa experimental, tentou-se conseguir um britador e a série de peneiras para enquadramento do material fresado na faixa granulométrica desejada, porém o equipamento não foi disponibilizado em tempo hábil.

Além disso, não foi possível também a construção do trecho experimental por indisponibilidade da usina de aplicação de MRAF, além da demora da liberação do trecho previamente escolhido para a execução do experimento. Mas, com o intuito da construção desse trecho experimental em trabalhos posteriores, optou-se por utilizar o material fresado sem fracionamento.

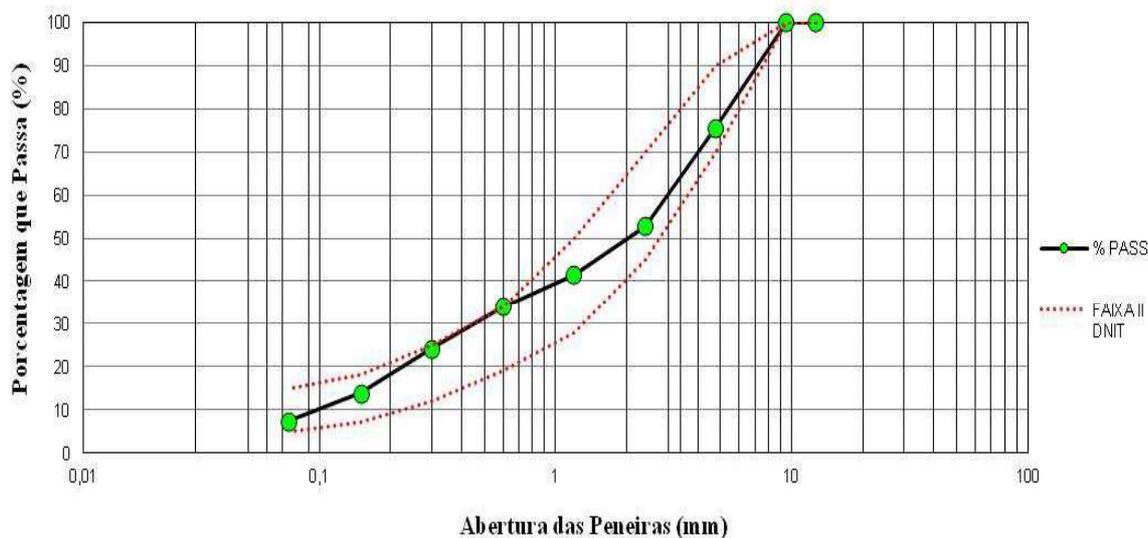
No MRAF composto de 30% de fresado, utilizou-se como agregados a brita 3/8, o pó de pedra, mesmos materiais escolhidos como melhores opções para MRAF por Castro (2011) e como filer o cimento portland. Os resultados da granulometria para o MRAF com 30% de fresado estão apresentados na Tabela 16 e na Figura 73.

Tabela 16 – Granulometria do MRAF com 30% de fresado

PEN.	MATERIAL				COMPOSIÇÃO					LIMITES DNIT (FAIXA II)	
	FRES. S/ LIG. (A)	PÓ (B)	CIM. (C)	BRITA (D)	A	B	C	D	% MIST .	LIM. INF	LIM. SUP
					30 %	29 %	1 %	40 %			
1/2"	100,0	100,0	100,0	100,0	30,0	29,0	1,0	40,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	100,0	100,0	100,0	100,0	30,0	29,0	1,0	40,0	100,0	100,0	100,0
Nº 04	90,6	100,0	100,0	46,1	27,2	29,0	1,0	18,4	75,6	70,0	90,0
Nº 08	78,7	82,6	100,0	10,5	23,6	24,0	1,0	4,2	52,8	45,0	70,0
Nº 16	67,5	62,8	100,0	5,3	20,3	18,2	1,0	2,1	41,6	28,0	50,0
Nº 30	55,9	50,4	100,0	4,1	16,8	14,6	1,0	1,7	34,1	19,0	34,0
Nº 50	38,5	36,3	100,0	3,1	11,5	10,5	1,0	1,2	24,2	12,0	25,0
Nº 100	20,6	20,8	100,0	1,9	6,2	6,0	1,0	0,7	13,9	7,0	18,0
Nº 200	9,8	10,3	100,0	1,2	2,9	3,0	1,0	0,5	7,4	5,0	15,0

Fonte: Autor (2014)

Figura 73 – Curva granulométrica do MRAF com 30% de fresado



Fonte: Autor (2014)

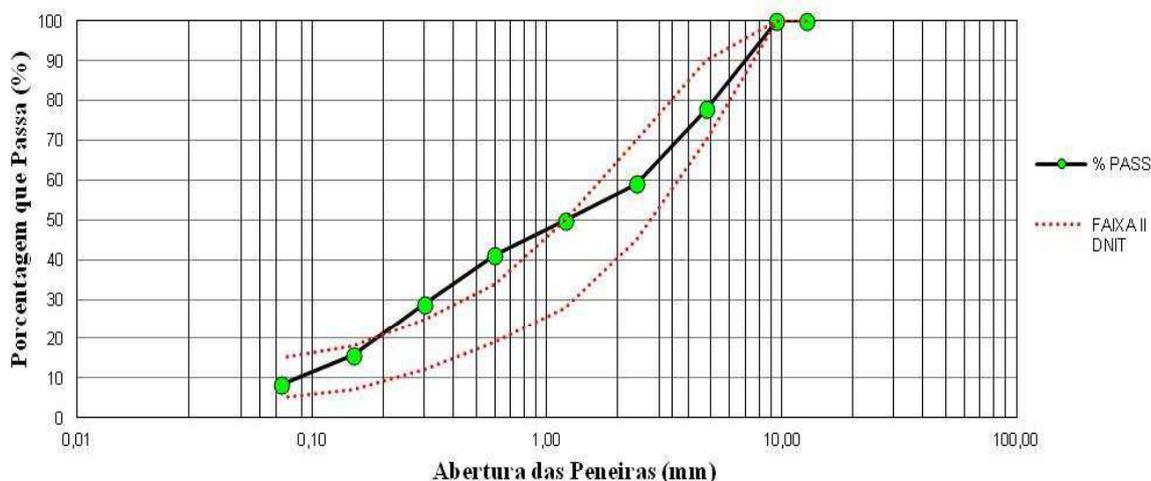
No MRAF composto com 70% de fresado, utilizou-se como agregado somente a brita 3/8 e como filer o cimento portland. Os resultados da granulometria para o MRAF com 70% de fresado estão apresentados na Tabela 17 e na Figura 74.

Tabela 17 – Granulometria do MRAF com 70% de fresado

PEN.	MATERIAL			COMPOSIÇÃO				LIMITES DNIT (FAIXA II)	
	FRES. S/ LIG. (A)	BRITA (B)	CIM (C)	A	B	C	% MIST.	LIM INF	LIM. SUP
				70 %	29 %	1 %			
1/2"	100,0	100,0	100,0	70,0	29,0	1,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	100,0	100,0	100,0	70,0	29,0	1,0	100,0	100,0	100,0
Nº 04	90,6	46,1	46,1	63,4	13,4	1,0	77,8	70,0	90,0
Nº 08	78,7	10,5	10,5	55,1	3,0	1,0	59,1	45,0	70,0
Nº 16	67,5	5,3	5,3	47,3	1,5	1,0	49,8	28,0	50,0
Nº 30	55,9	4,1	4,1	39,1	1,2	1,0	41,3	19,0	34,0
Nº 50	38,5	3,1	3,1	26,9	0,9	1,0	28,8	12,0	25,0
Nº 100	20,6	1,9	1,9	14,4	0,5	1,0	15,9	7,0	18,0
Nº 200	9,8	1,2	1,2	6,9	0,4	1,0	8,3	5,0	15,0

Fonte: Autor (2014)

Figura 74 – Curva granulométrica do MRAF com 70% de fresado



Fonte: Autor (2014)

Pode-se observar que para o caso de 70% de fresado o limite superior da faixa II do DNIT foi ultrapassado nas peneiras de nº 30 e 50. Isso ocorreu devido à quantidade de material fino presente na composição do fresado. Apesar disso, considerou-se essa granulometria para o desenvolvimento do programa experimental, pois o intuito foi analisar o comportamento desse resíduo em misturas a frio, mesmo o resíduo não sendo enquadrado em faixas granulométricas estabelecidas em normas vigentes.

4.2.2.2 Índice de Forma

O ensaio de Índice de Forma foi realizado para as situações com ligante e sem ligante. Obteve-se para o material fresado com ligante um valor do índice de forma de 0,79 e sem ligante um valor de 0,69, sendo o material considerado de boa cubicidade. Vale ressaltar aqui o decréscimo de valor quando retirado o ligante da amostra, ocorrido pelo fato de existir grumos de ligante que foram considerados como agregado durante a realização do procedimento. Ao realizar o procedimento de extração do ligante, esses grumos foram desfeitos e o resultado do ensaio alterado.

4.2.2.3 Abrasão Los Angeles

A graduação utilizada no ensaio para a realização do ensaio de Abrasão Los Angeles foi a do tipo C, sendo essa considerada para materiais a serem empregados em

revestimentos do tipo MRAF. Nesse caso, o procedimento foi realizado com o material envolvido por ligante.

O resultado obtido para o material fresado foi de 41,5%, valor pouco superior ao limite estabelecido pela especificação do DNIT (DNIT-ES 035/2005) que é de 40% para agregados a serem utilizados em MRAF. Apesar disso, considerou-se o emprego desse agregado como adequado para a confecção das amostras motivado pelo fato de Castro (2011) ter obtido resultados similares de abrasão em parte de suas amostras ensaiadas. A Figura 75 ilustra o material fresado submetido ao ensaio.

Figura 75 – Aspecto do material fresado após o ensaio de Abrasão Los Angeles



a) material retirado do tambor



b) separação do material retido na peneira de 1,7mm

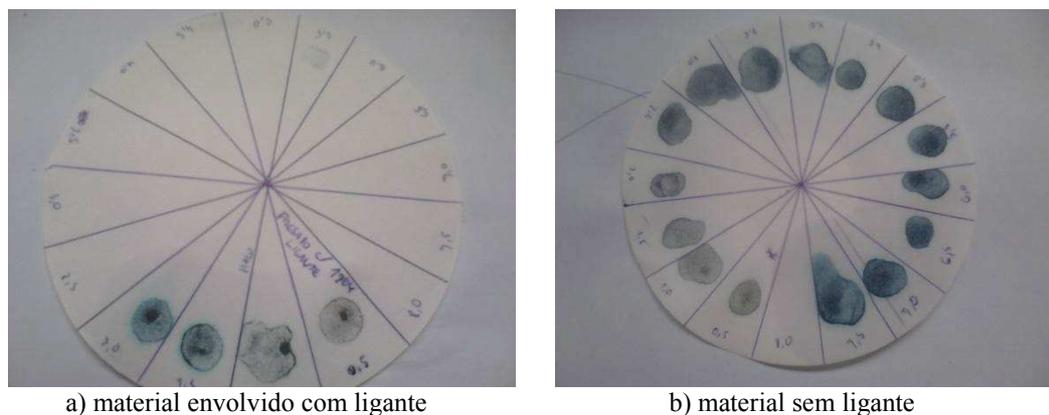
Fonte: Autor (2014)

4.2.2.4. Azul de Metileno

Para o material fresado, realizou-se o procedimento com a amostra envolvida com ligante e sem envolvimento. O fato do material estar com ligante aderido pode alterar suas condições de superfície específica e características de reatividade do material, ocasionando em distorções no resultado do azul de metileno. Recomenda-se esse procedimento quando se utilizar material fresado.

Para o caso do material com ligante, obteve-se o ponto de viragem para um consumo de azul de 2,0mg/g, indicando baixa reatividade do agregado. Entretanto, o resultado alterou-se quando o mesmo material foi ensaiado sem o ligante aderido, sendo o consumo de azul registrado de 7,5mg/g, conforme indicado na Figura 76. O limite estabelecido pela norma é de 7,0mg/g.

Figura 76 – Ilustração dos resultados do Azul de Metileno para o material fresado com e sem ligante



Fonte: Autor (2014)

Durante a realização do procedimento, foi constatada ainda uma certa dificuldade em promover a mistura da amostra envolvida com ligante com a água para a realização do ensaio. Observou-se uma formação de uma película fazendo com que o material não se misturasse com a água (Figura 77), o que pode ter causado também, na opinião do autor, a distorção dos resultados apresentados.

Com isso, pode-se inferir que o ligante que envolve a amostra altera o resultado do procedimento, fazendo com que o resultado obtido para o agregado sem ligante não seja satisfatório. Entretanto, deve-se considerar que o fresado entrará na mistura do MRAF desta pesquisa com 30% e 70% e deverá ser empregado no campo sem a extração do ligante. Outro fato a ser destacado é que o agregado proveniente do fresado deve ter passado por algum controle de qualidade para ter sido empregado no revestimento. Nesse caso, sugere-se sempre que o ensaio de tempo mínimo de misturação seja realizado para determinar a compatibilidade do fresado com a emulsão asfáltica

Figura 77 – Formação de película do material fresado



Fonte: Autor (2014)

4.2.2.5 Equivalente de Areia

Assim como foi feito para os outros ensaios de caracterização do agregado, exceto para o ensaio de Abrasão Los Angeles, realizou-se o Equivalente de Areia do material fresado para a situação com ligante e sem ligante e mais uma vez observou-se diferenças nos resultados obtidos. O valor encontrado para a amostra com ligante foi de 81,3% e de 49,7% para a amostra com ligante extraído. Ressalta-se que o mínimo estabelecido em norma para aplicações em MRAF é de 60%.

Da mesma maneira que foi relatado no item anterior, encontrou-se dificuldade na realização do procedimento com o agregado envolvido com ligante pelo fato do fresado não misturar com a solução utilizada para fazer o ensaio, conforme ilustrado na Figura 78. Além disso, acredita-se que o resultado de 81,3% para a amostra com ligante se dá pelo fato do mesmo envolver as partículas de argila e possíveis impurezas que estavam contidas no agregado mais puro ensaiado. Quando retirado esse ligante, esses materiais anteriormente envolvidos não mais precipitaram, alterando o valor do resultado do ensaio.

Figura 78 – Dificuldade de mistura do fresado com solução do Equivalente de Areia



Fonte: Autor (2014)

4.2.2.6 Determinação do Teor de Betume do Material Fresado

Conforme citado no capítulo anterior, foram realizados dois procedimentos para determinar o teor de betume contido na amostra de fresado coletada. Optou-se por realizar os dois ensaios (DNER – ME 053/94 e DNIT – ME 158/2011) com o intuito de verificar eventuais diferenças nos resultados encontrados. Após consultar técnicos e

especialistas na área de pavimentação, constatou-se que a extração do betume pelo aparelho Soxhlet (DNIT-ME 158/2011) tem um resultado mais preciso quando comparado com o Rotarex (DNER – ME 053/94).

O movimento centrífugo sob o qual a amostra é submetida no aparelho Rotarex faz com que sejam carreadas partículas finas da amostra de fresado juntamente com a mistura de solvente e ligante, caso o equipamento não esteja vedado corretamente. Esse material fino acaba por ser contabilizado como ligante no momento de se efetuar o cálculo do teor de betume da amostra ensaiada. Sendo assim, o método do Rotarex é mais suscetível a erros de operador.

Sabendo-se disso, submeteu-se as amostras de fresado coletadas aos dois procedimentos e os resultados estão apresentados na Tabela 18. Pode-se constatar que o ensaio realizado com o aparelho Soxhlet apresentou resultados menores de teor de betume, o que já era esperado levando-se em conta a maior precisão do método.

Tabela 18 – Percentual de betume existente no fresado coletado

AMOSTRA	TEOR DE BETUME DNER – ME 053/94	TEOR DE BETUME DNIT-ME 158/2011
Material Fresado	5,9%	5,6%

Fonte: Autor (2014)

4.2.3 Comparativo dos Resultados acerca da Caracterização dos Agregados

Para efeito de comparação e melhor organização das informações acerca da caracterização dos agregados alternativos, elaborou-se a Tabela 19 que resume os resultados dos ensaios de caracterização obtidos, não sendo incluídos os ensaios específicos para cada tipo de agregado neste item. Além disso, estão apresentados também os resultados da caracterização do agregado tipo 01 considerado por Castro (2011) como opção mais adequada para emprego em revestimentos do tipo MRAF.

Apesar fresado se comportar como agregado, visto que o ligante aderido não é totalmente diluído, optou-se por apresentar quais parâmetros de caracterização são alterados devido à presença do mesmo. Entretanto, no caso de se aplicar MRAF com esse tipo de material, pode-se proceder somente com a caracterização do mesmo sem extrair o ligante, com exceção do ensaio de granulometria.

Tabela 19 – Quadro resumo da caracterização dos agregados

ENSAIOS	AGREGADO TIPO 01 (Castro 2011)	AS	FRESADO	FRESADO PÓS-EXTRAÇÃO
Índice de Forma	0,64	0,96	0,79	0,69
Abrasão Los Angeles (%)	40,8	17,0	41,5	-
Azul de Metileno (mg/g)	1,5	2,0	2,5	7,5
Equivalente de Areia (%)	66,2	83,0	81,3	49,7

Fonte: Autor (2014)

4.2.3 Resultados da Caracterização da Emulsão Asfáltica

Os ensaios realizados na emulsão asfáltica do tipo RC1C-E, específica para MRAF, foram realizados no laboratório do fabricante que cedeu a referida emulsão e os resultados estão apresentados na Tabela 20. Foram realizados três ensaios de caracterização do mesmo tipo de emulsão devido ao longo período que ocorreu o programa experimental desta dissertação.

Optou-se por não utilizar a mesma emulsão por um período maior que 45 dias, visando garantir que o produto estaria apto para sua aplicação. Pode-se observar que as emulsões asfálticas fornecidas atenderam a todos os requisitos da norma DNIT 128/2010, sendo apropriada para aplicação em misturas do tipo MRAF.

Tabela 20 – Resultados da caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E

ENSAIOS REALIZADOS	1 ^a	2 ^a	3 ^a	ESPECIFICAÇÃO
Viscosidade Saybolt-Furols, a 50°C	35	41	39	70 máx.
Peneiração, 0,84mm, máx (%)	0,01	0,01	0,01	0,1
Carga da Partícula	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
Resíduo por Evaporação (%)	63,6	62,4	63,2	62,0
Penetração a 25°C, 100g, 5s	58	61	60	45-150
Recuperação Elástica, 20cm, 25°C (%)	73,0	71,0	71,7	70,0 mínimo
Ponto de Amolecimento, °C	70	72	67	55 mínimo
Sedimentação (%)	0,8	0,7	0,8	5 máximo

Fonte: Autor (2014)

4.3 Resultados da 2^a Etapa do Programa Experimental

4.3.1 Agregado Siderúrgico

4.3.1.1 Verificação da Compatibilidade Agregado-Emulsão

A compatibilidade agregado-emulsão foi verificada através do ensaio de Determinação da Adesividade de Misturas (NBR 14757/2001). Após a realização do ensaio, foi possível constatar que, através da inspeção visual da amostra de MRAF ensaiada, houve o recobrimento de mais de 90% da área do agregado, ou seja, para o AS, a adesividade foi considerada satisfatória.

4.3.1.2 Determinação do Teor de Aditivo

O teor de aditivo controlador do tempo de ruptura da emulsão asfáltica a ser empregado no MRAF foi determinado através do ensaio de Determinação do Tempo Mínimo de Misturação (NBR 14758/2001). Inicialmente, realizou-se o ensaio sem a incorporação de aditivo e mediu-se o tempo de rompimento da emulsão. Caso o valor encontrado seja menor do que 240 segundos, adotado no presente trabalho como tempo mínimo, adiciona-se o aditivo à água que irá compor o MRAF e repete-se o ensaio. A quantidade de aditivo é medida em relação ao peso do agregado.

Para o AS, realizou-se o ensaio sem a incorporação de aditivo e o tempo de ruptura da emulsão medido foi superior a 300 segundos, maior que o tempo limite mínimo determinado. Para aplicações de MRAF com o AS utilizado nesta dissertação, não foi necessário utilizar aditivos em sua composição.

Ressalta-se que a incorporação de aditivos nas misturas de MRAF tem como intuito somente retardar o tempo de ruptura da emulsão, ou seja, sua utilização não implica em melhorias quanto à redução do desgaste e redução no tempo de liberação ao tráfego. Castro (2011) estudou agregados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) que não atingiram o tempo mínimo requerido de misturação. Para esses casos, considera-se seu emprego em MRAF somente com o uso de aditivo, o que inevitavelmente acarretará em aumento dos custos, como foi mostrado pelo autor.

4.3.1.3 Determinação do Teor de Projeto de Ligante

Para definição do teor de emulsão a ser empregado no MRAF com AS, foram confeccionados corpos de prova com teores de ligante de 10,5%, 11,0%, 11,5% e 12,0% para serem submetidos aos ensaios de WTAT e LWT. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 21 e sua representação gráfica está ilustrada na Figura 79.

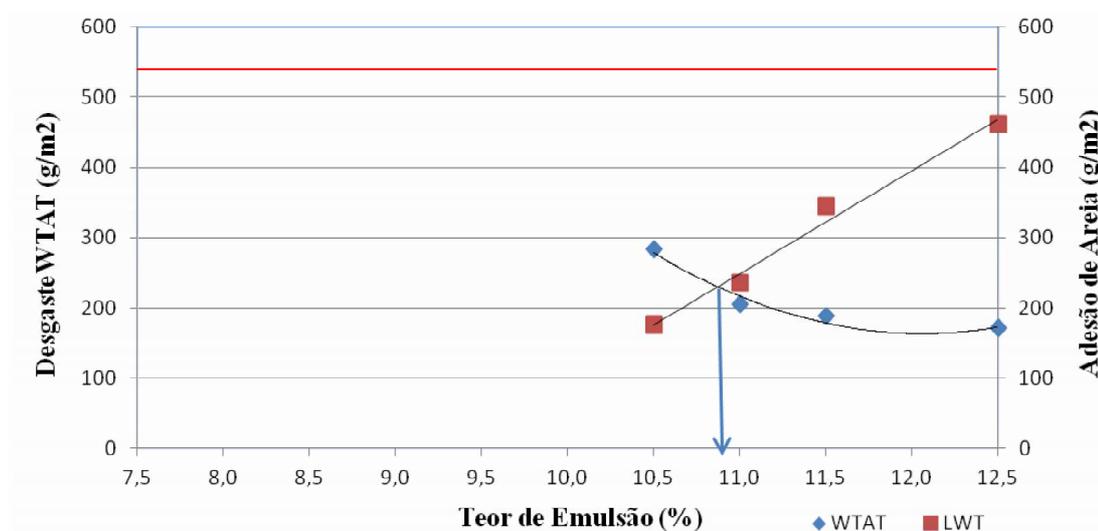
Conforme citado no Capítulo 3 desta dissertação, define-se do teor de projeto de ligante através do ponto de encontro das curvas obtidas dos ensaios WTAT e LWT realizados. Para o AS, o teor de projeto encontrado foi de 10,8% em relação ao peso do agregado, conforme ilustrado na Figura 79.

Tabela 21 – Resultados do ensaios LWT e WTAT para o MRAF com AS

TEOR DE EMULSÃO (%)	LWT (g/m ²)	WTAT (g/m ²)
10,5	175,3	282,9
11,0	234,6	203,9
11,5	344,5	187,5
12,0	461,3	171,1

Fonte: Autor (2014)

Figura 79 – Definição do teor de projeto para o MRAF com AS



Fonte: Autor (2014)

Ainda observando a Figura 79, pode-se constatar que para os teores ensaiados, os limites estabelecidos pelas normas não foram ultrapassados, que são de 536 g/m² (indicados pela linha vermelha no gráfico) tanto para o desgaste quanto para a adesão de areia. Neste caso, pode-se executar o MRAF em campo com teores até o limite próximo de 12,5%, pois os limites para a exsudação ainda estariam dentro dos limites. Porém, o acréscimo de ligante acarretaria em um aumento do custo de aplicação do MRAF e sem a obtenção de ganhos significativos em termos de melhor comportamento, visto que os padrões são atendidos com folga para o teor de projeto.

O teor mínimo de ligante a ser empregado para o AS é de 10,5% onde encontrou-se um resultado de desgaste abaixo do limite estabelecido em norma. Ressalte-se aqui que a limitação desse valor mínimo é o teor de asfalto residual da mistura. A especificação DNIT-ES 035/2005 indica, para execução de MRAF na faixa II, um teor mínimo de asfalto residual de 6,5%. De acordo a norma com DNIT 128/2010, o teor de resíduo da emulsão do tipo RC1C-E é de 62%, ou seja, para garantir o teor mínimo de asfalto residual no MRAF deve-se utilizar teores de emulsão superiores a 10,5%.

Além disso, deve ser mencionado que o teor de projeto de ligante é em relação ao peso do agregado, ou seja, para o caso de aplicações de MRAF com AS, que possui peso específico maior, implicará em um maior consumo de ligante quando comparado com aplicações que utilizam somente agregados minerais. Essa diferença de custos será explicada na apresentação dos resultados do quarto procedimento experimental desta dissertação, onde serão apresentadas as composições de custo de aplicação de MRAF para cada tipo de agregado ensaiado.

4.3.1.4 Análise do Comportamento em Laboratório – Desgaste WTAT

Finalizado o processo de dosagem das misturas de MRAF, foram moldadas nove amostras com a finalidade de submetê-las novamente ao ensaio de WTAT com o intuito de confirmar se, para o teor de projeto de ligante proposto na pesquisa, as amostras atendem aos requisitos da norma.

As nove amostras de MRAF com AS foram moldadas obedecendo ao mesmo processo citado no capítulo anterior. Após cerca de 24h de cura na estufa a 60°C, realizou-se o ensaio de WTAT. Os resultados estão dispostos na Tabela 22. Na Tabela 22, pode-se constatar que o desgaste médio obtido para o agregado do tipo 01 ficou abaixo do limite estabelecido pela norma vigente.

Tabela 22 – Resultados dos desgastes para o MRAF com AS

AMOSTRA	DESGASTE OBTIDO (g/m ²)
1	212,2
2	202,0
3	174,3
4	187,2
5	233,4
6	192,4
7	195,3
8	173,1
9	187,7
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	
Média	195,3 g/m ²
Desvio Padrão	18,9
Variância	356,1
Coef. de Variação	9,66%

Fonte: Autor (2014)

4.3.1.5 Análise do Comportamento em Laboratório – Ensaio de Coesão

O ensaio de Determinação da Coesão e Características da Cura pelo Coesímetro (NBR 14798/2002) tem como função determinar o tempo de liberação ao tráfego do MRAF. Os resultados do ensaio para o AS estão apresentados na Tabela 23 e expressos graficamente na Figura 80.

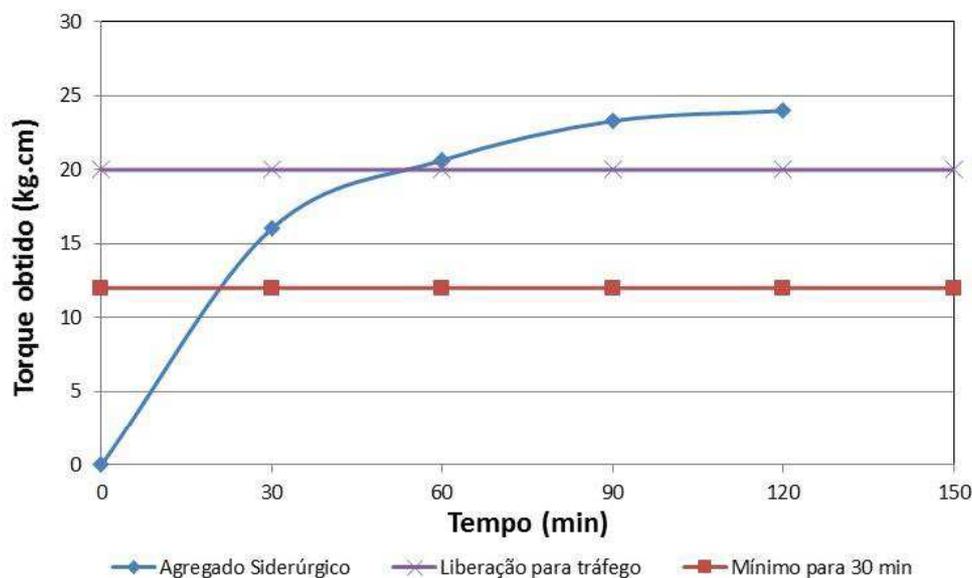
Pode-se constatar que, para o AS, os resultados de coesão foram satisfatórios, pois o torque obtido para os tempos de 30min e 60min estão acima das especificações da norma. Desse modo, pode-se efetuar a liberação ao tráfego no período de uma hora, sem causar prejuízos na qualidade do revestimento recém aplicado.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de coesão para o MRAF com AS

TEMPOS (mínimo)	TORQUES OBTIDOS (kg.cm)	ESPECIFICAÇÃO NBR 14798/2002
30	16,0	12,0kg.cm
60	20,6	20,0kg.cm
90	23,3	-
120	24,0	-

Fonte: Autor (2014)

Figura 80 – Torques obtidos para as amostras de AS



Fonte: Autor (2014)

4.3.2 MRAF com 30% de Fresado

4.3.2.1 Verificação da Compatibilidade Agregado-Emulsão

Para o caso do MRAF com 30% de material fresado constatou-se através da inspeção visual da amostra que houve o recobrimento de mais de 90% de sua área, ou seja, a adesividade foi considerada satisfatória.

4.3.2.2 Determinação do Teor de Aditivo

Para o MRAF com 30% de fresado, realizou-se o ensaio de Determinação do Tempo Mínimo de Misturação sem a incorporação de aditivo e o tempo de ruptura da emulsão aferido foi de 264 segundos, superior ao limite mínimo estabelecido de 240 segundos. Para esse caso, assim como para o AS, não foi necessário o emprego de aditivos na composição do MRAF.

4.3.2.3 Determinação do Teor de Projeto de Ligante

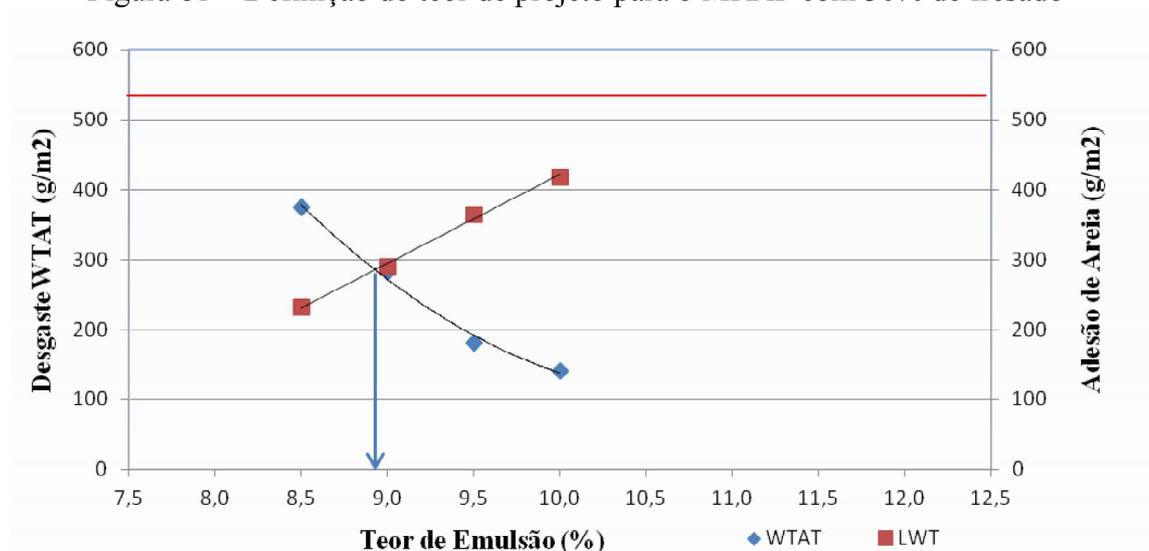
Para determinação do teor de projeto de ligante do MRAF com 30% de fresado foram confeccionados corpos-de-prova com teores de ligante de 8,5%, 9,0%, 9,5% e 10,0% para serem submetidos aos ensaios de LWT e WTAT. Os resultados desses ensaios estão apresentados na Tabela 24 e sua representação gráfica está ilustrada na Figura 81. Pode-se observar que o teor de emulsão a ser empregado em MRAF, utilizando o agregado do tipo 02, é de 8,9%. Ressalta-se que esse teor de emulsão calculado refere-se somente à quantidade de ligante novo adicionado.

Tabela 24 – Resultados do ensaios LWT e WTAT para MRAF com 30% de fresado

TEOR DE EMULSÃO (%)	LWT (g/m ²)	WTAT (g/m ²)
8,5	232,0	375,1
9,0	290,7	282,9
9,5	365,3	180,9
10,0	418,7	141,4

Fonte: Autor (2014)

Figura 81 – Definição do teor de projeto para o MRAF com 30% de fresado



Fonte: Autor (2014)

Pode-se constatar que o emprego de material fresado implica na redução do consumo de ligante novo quando comparado com os teores empregados para agregados convencionais estudados por Castro (2011). Essa redução no consumo implica em economia em suas aplicações, visto que o ligante possui uma alta representatividade na composição dos custos de aplicação de MRAF.

Para o caso do MRAF que possui fresado em sua composição, recomenda-se realizar a determinação do teor residual de betume. Esse procedimento deve ser executado pelo fato do teor de ligante adotado no projeto estar abaixo do teor mínimo recomendado pelas normas do DNIT (DNIT-ES 035/2005) que é de 10,5% de emulsão ou 6,5% de ligante. Porém, essa especificação não contempla o emprego de agregados alternativos em sua composição, como o fresado.

Para o caso desse material alternativo, tira-se proveito de parte ligante existente na amostra. Para garantir que o MRAF atenda às especificações vigentes, a determinação do teor residual de betume deve ser realizada de modo a se comprovar que a dosagem proposta nesse programa experimental atende aos requisitos mínimos estabelecidos. Para o caso do MRAF com 30% de fresado, o teor residual de betume calculado foi de 7,8%, superior aos 6,5% exigidos.

4.3.2.4 Análise do Comportamento em Laboratório – Desgaste WTAT

Assim como foi feito para as amostras de AS, foram moldadas nove amostras com o MRAF com 30% de fresado obedecendo ao mesmo processo citado no

capítulo anterior. Após cerca de 24h de cura na estufa a 60°C, realizou-se o ensaio de WTAT. Os resultados estão dispostos na Tabela 25.

Na Tabela 25, pode-se constatar que o desgaste médio obtido para o MRAF com 30% de fresado foi maior que o desgaste quando utilizado AS, mas também ficou abaixo do limite estabelecido pela norma vigente.

Tabela 25 – Resultados dos desgastes para o MRAF com 30% de fresado

AMOSTRAS	DESGASTES OBTIDOS (g/m ²)
1	312,1
2	299,1
3	334,5
4	312,1
5	278,9
6	297,5
7	292,3
8	323,1
9	281,2
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	
Média	303,4 g/m ²
Desvio Padrão	18,6
Variância	347,6
Coef. De Variação	6,1%

Fonte: Autor (2014)

4.3.2.5 Análise do Comportamento em Laboratório – Ensaio de Coesão

O ensaio de Determinação da Coesão e Características da Cura pelo Coesímetro (NBR 14798/2002) tem como função determinar o tempo de liberação ao tráfego do MRAF. Os resultados do ensaio para o MRAF com 30% de fresado estão apresentados na Tabela 26 e expressos graficamente na Figura 82.

Pode-se constatar que, para este caso, os resultados de coesão foram piores que os obtidos para o AS. O torque obtido para o tempo de 30min foi satisfatório, porém o valor para 60min está abaixo da especificação da norma, indicando uma cura mais lenta do MRAF quando empregado material fresado em sua composição.

Baseado nisso, pode-se inferir que a compatibilidade da emulsão com o material fresado não foi a desejada, fazendo com que o ligante novo não tenha aderido de forma satisfatória no material fresado, podendo causar possíveis desprendimentos desse material na pista com a ação do tráfego. Desse modo, pode-se efetuar a liberação

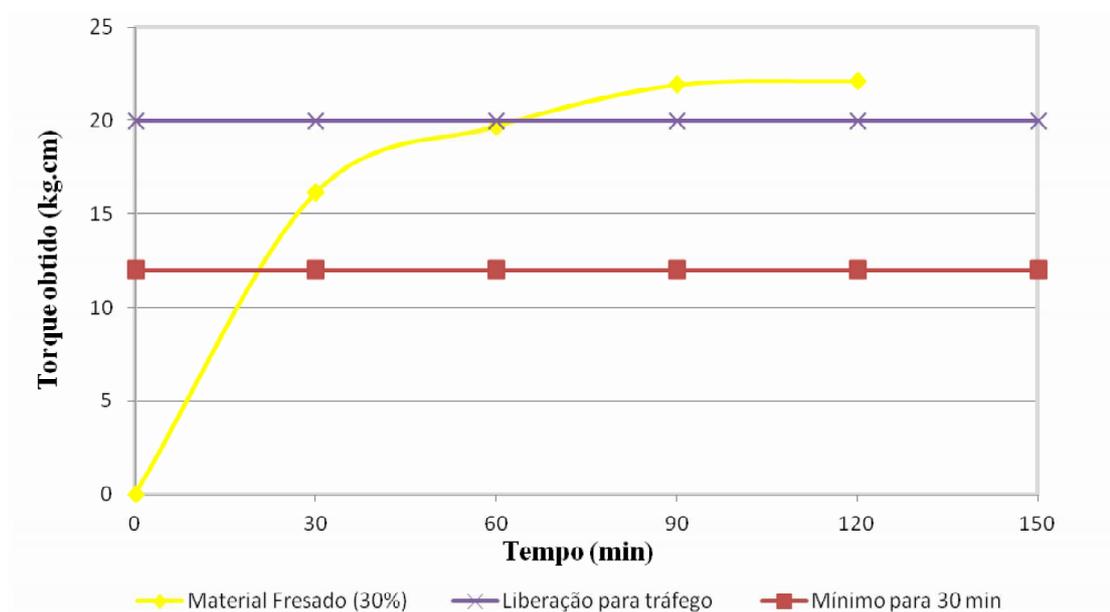
ao tráfego no período de uma hora e meia, minimizando eventuais prejuízos na qualidade do revestimento recém aplicado.

Tabela 26 – Resultados do ensaio de coesão para o MRAF com 30% de fresado

TEMPOS (min)	TORQUES OBTIDOS (kg.cm)	ESPECIFICAÇÃO NBR 14798/2002
30	16,1	12kg.cm
60	19,7	20kg.cm
90	21,9	-
120	22,1	-

Fonte: Autor (2014)

Figura 82 – Torques obtidos para as amostras de MRAF com 30% de fresado



Fonte: Autor (2014)

4.3.3 MRAF com 70% de Fresado

4.3.3.1 Verificação da Compatibilidade Agregado-Emulsão

Para o caso do MRAF com 70% de fresado, após a realização do ensaio de Determinação da Adesividade de Misturas foi possível constatar que houve recobrimento de mais de 90% da área do agregado, sendo a adesividade considerada satisfatória.

4.3.3.2 Determinação do Teor de Aditivo

Para o MRAF com 70% de fresado, realizou-se o ensaio de Determinação do Tempo Mínimo de Misturação sem a incorporação de aditivo e o tempo de ruptura da emulsão foi superior a 300 segundos, ultrapassando o limite mínimo estabelecido de 240 segundos. Para esse caso, assim como para os casos anteriores, não foi necessário o emprego de aditivos na composição do MRAF.

4.3.3.3 Determinação do Teor de Projeto de Ligante

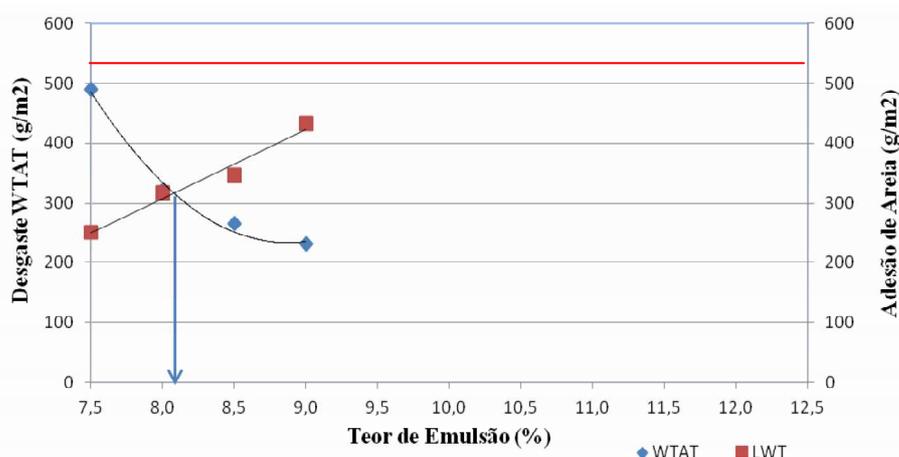
Para determinação do teor de projeto de ligante do MRAF com 70% de fresado foram confeccionados corpos-de-prova com teores de ligante de 7,5%, 8,0%, 8,5% e 9,0% para serem submetidos aos ensaios de LWT e WTAT. Os resultados desses ensaios estão apresentados na Tabela 27 e foram representados graficamente através da Figura 83. Pode-se observar que o teor de emulsão a ser empregado em MRAF com 70% de fresado é de 8,1%.

Tabela 27 – Resultados do ensaios LWT e WTAT para o MRAF com 70% de fresado

TEOR DE EMULSÃO (%)	LWT (g/m ²)	WTAT (g/m ²)
7,5	250,2	490,0
8,0	316,2	320,8
8,5	346,0	264,8
9,0	432,0	230,3

Fonte: Autor (2014)

Figura 83 – Definição do teor de projeto para o MRAF com 70% de fresado



Fonte: Autor (2014)

Da mesma forma que foi observado para o MRAF com 30% de fresado, observou-se uma redução no consumo de ligante para a situação com 70% de fresado, o

que já era esperado visto que utilizou-se uma parcela ainda maior de material alternativo nessa composição. Da mesma maneira que se procedeu para a situação anterior (30% de material alternativo), realizou-se a determinação do teor residual de betume. Para esse caso, o teor residual calculado foi de 9,0%, atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos nas especificações vigentes. Para o caso da faixa II do DNIT, o percentual máximo admitido é de 12%. Valores acima do máximo são propícios a causar exsudação no pavimento.

4.3.3.4 Análise do Comportamento em Laboratório – Desgaste WTAT

Finalizado o procedimento de dosagem para as amostras de MRAF com 70% de fresado, seguiu-se o mesmo procedimento realizado para as amostras de AS e com 30% de fresado para determinação do desgaste WTAT. Foram moldados 9 corpos de prova com o teor de projeto calculado.

Na Tabela 28, pode-se constatar que o desgaste médio obtido para o MRAF com 70% de fresado foi maior que o desgaste quando utilizado AS, mas também ficou abaixo do limite estabelecido pela norma vigente.

Tabela 28 – Resultados dos desgastes para o MRAF com 70% de fresado

AMOSTRAS	DESGASTES OBTIDOS (g/m ²)
1	355,7
2	332,3
3	345,1
4	303,1
5	299,7
6	345,6
7	339,1
8	365,1
9	312,4
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	
Média	333,1 g/m ²
Desvio Padrão	23,2
Variância	539,3
Coef. De Variação	7,0%

Fonte: Autor (2014)

4.3.3.5 Análise do Comportamento em Laboratório – Ensaio de Coesão

O ensaio de Determinação da Coesão e Características da Cura pelo Coesímetro (NBR 14798/2002) tem como função determinar o tempo de liberação ao tráfego do MRAF. Os resultados do ensaio para o MRAF com 70% de fresado estão apresentados na Tabela 29 e expressos graficamente na Figura 84.

Pode-se constatar que, para esse caso, os resultados de coesão foram piores que os obtidos para o MRAF com 30% e para o AS. O torque obtido para o tempo de 30min foi satisfatório, porém os valores para 60min e 90min estão abaixo da especificação da norma, indicando que a adição de 70% de material fresado retarda ainda mais o tempo de cura do MRAF quando comparado com a situação onde foi adicionado 30% de fresado.

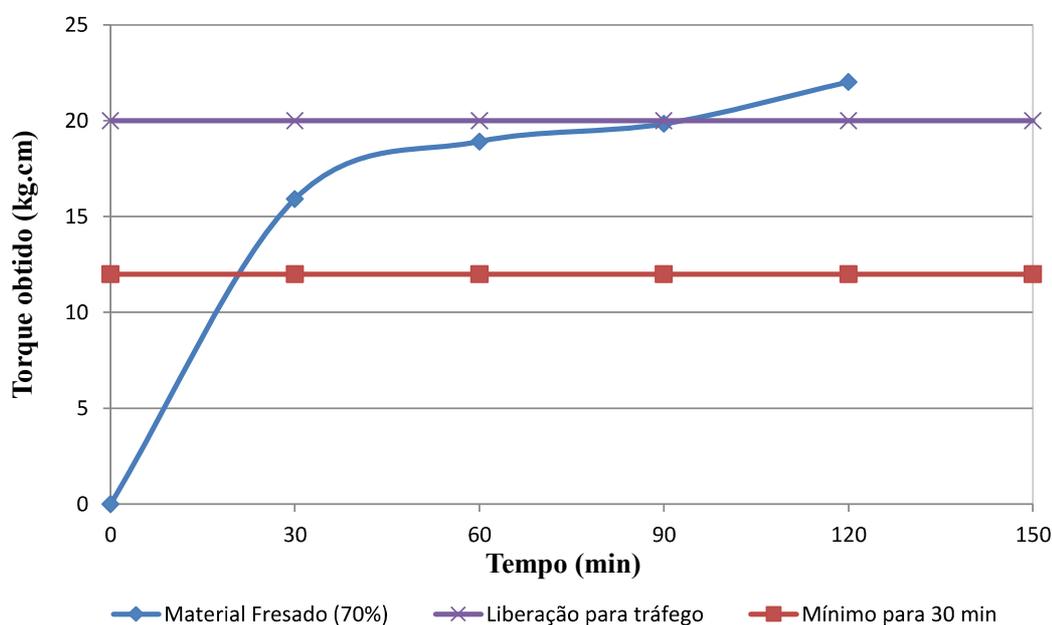
Os resultados do Ensaio de Coesão mostraram que o material fresado não apresentou uma compatibilidade esperada com a emulsão asfáltica empregada em MRAF, dando indícios que altos teores de fresado na composição granulométrica podem piorar o comportamento desse tipo de revestimento, alterando sua vida útil. Desse modo, pode-se efetuar a liberação ao tráfego no período mínimo de duas horas após a aplicação do revestimento.

Tabela 29 – Resultados do ensaio de coesão para o MRAF com 70% de fresado

TEMPOS (min)	TORQUES OBTIDOS (kg.cm)	ESPECIFICAÇÃO NBR 14798/2002
30	15,9	12kg.cm
60	18,9	20kg.cm
90	19,8	-
120	22,0	-

Fonte: Autor (2014)

Figura 84 – Torque obtido nas amostras do MRAF com 70% de fresado



Fonte: Autor (2014)

4.3.4 Resumo dos Resultados da 2ª Etapa do Programa Experimental

A Tabela 30 apresenta de forma resumida e organizada os resultados obtidos no processo de dosagem e análise laboratorial realizado para os agregados alternativos selecionados nesta dissertação. São apresentados também, como forma de comparação, os resultados obtidos por Castro (2011) para o melhor agregado ensaiado, dentre três testados, para emprego em MRAF.

Tabela 30 – Quadro resumo da dosagem das misturas

RESULTADOS	AGREGADO TIPO 01 (Castro, 2011)	AS	FRESADO 30%	FRESADO 70%
Adesividade	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória
Teor de Aditivo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0
Teor de Ligante (%)	10,8	10,8	8,9	8,1
Desgaste Médio (g/m ²)	252,2	195,3	303,4	333,1
Tempo de Liberação ao Tráfego (h)	1,0	1,0	1,5	2,0
Teor Residual de Betume em Relação ao Peso do Agregado (%)	-	-	7,8	9,0

Fonte: Autor (2014)

Pode-se observar na Tabela 30 que o desgaste médio do AS foi o menor entre os agregados testados, indicando uma boa resistência do MRAF à ação do tráfego quando utilizado esse tipo de material. Pode ser constatado também que a adição de fresado na composição do MRAF implicou em um aumento do desgaste dos corpos de prova ensaiados, porém os valores obtidos ainda estão dentro dos limites tolerados (538 g/m²). Vale ressaltar que o agregado mineral que compõe o MRAF com fresado é o mesmo agregado tipo 01 utilizado por Castro (2011). Portanto, pode-se afirmar que as soluções alternativas propostas nesta dissertação atendem aos parâmetros dos ensaios de desgaste.

Com relação ao tempo de liberação ao tráfego, pode-se observar que para o AS, o tempo de liberação ao tráfego foi o mesmo quando comparado com o agregado do tipo 01. Entretanto, constata-se que ao adicionar material fresado no MRAF, ocorre um retardamento no tempo de cura, fazendo com que o tempo de liberação ao tráfego seja maior, atingindo um tempo de duas horas quando empregado 70% de material fresado. O valor do torque obtido abaixo do limite especificado indica uma cura parcial do MRAF, acarretando em problemas após a aplicação em campo, como o arrancamento dos agregados.

No procedimento de dosagem, verificou-se que a adição de material fresado implicou na redução do consumo de ligante adicionado, chegando a uma redução de 25% desse consumo quando empregado 70% de fresado comparado com o emprego de agregado mineral. Por outro lado, tem-se um aumento no consumo de ligante quando empregado o AS. Apesar de o valor percentual ser o mesmo, deve-se atentar para o fato de que a quantidade de ligante é calculada em relação ao peso do agregado. No caso do AS, essa relação de peso com relação ao peso do agregado mineral é cerca de 30% maior, implicando no aumento do consumo de ligante na mesma ordem de grandeza.

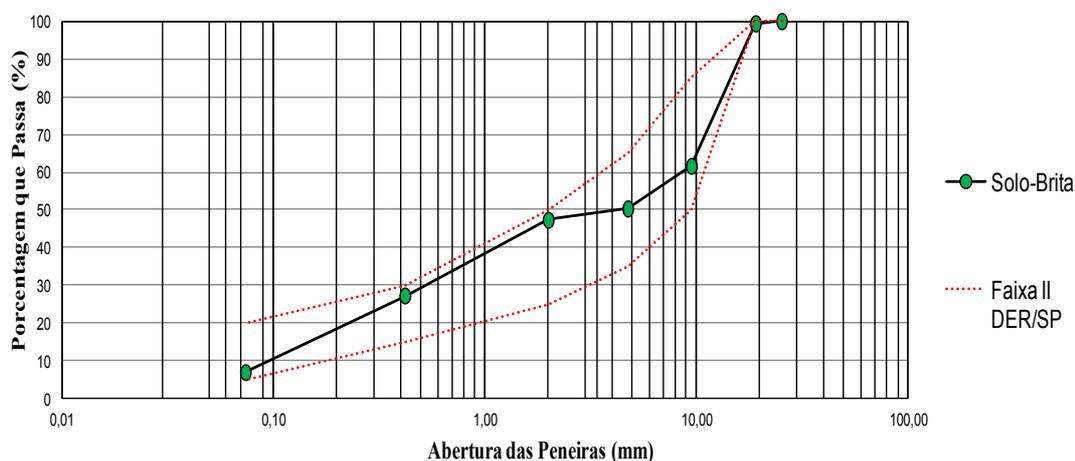
4.4 Resultados da 3ª Etapa do Programa Experimental

São apresentados inicialmente neste item os resultados da caracterização da base de solo-brita. Sobre a camada de base foi aplicada uma imprimação e em seguida foram confeccionadas as amostras de MRAF com os agregados testados neste estudo. Todos os procedimentos de construção da base e aplicação da imprimação e do revestimento, além da realização dos ensaios no simulador de tráfego de laboratório foram realizados de acordo com o que foi apresentado no Capítulo 3.

4.4.1 Caracterização da Base de Solo-Brita

Os ensaios de caracterização da camada de base (mistura de solo brita na proporção 50% – 50%) foram realizados com o intuito de se verificar a qualidade dos materiais selecionados para esta pesquisa. A caracterização e o conhecimento das propriedades da mistura de solo-brita foram obtidas através dos ensaios de granulometria, Módulo de Resiliência (MR), Índice de Suporte Califórnia (CBR) e densidade *in situ*. A granulometria do solo-brita foi enquadrada na faixa II do DER/SP de acordo com a norma ET-DE-P00/06 e está apresentada na Figura 85.

Figura 85 – Granulometria do solo-brita (50% – 50%) usado como base



Fonte: Autor (2014)

Com relação aos ensaios de compactação e CBR, utilizou-se a energia modificada visando obter melhor resistência para a base utilizada. Obteve-se para a massa específica seca máxima o valor de $2,278 \text{ g/cm}^3$ com a umidade ótima de 7,1%. O CBR obtido nessas condições foi de 142%, valor maior que o especificado como mínimo na norma do DER-SP para solo-brita (CBR > 80%).

Foi realizado também o ensaio de densidade *in situ* da base moldada nas placas que foram ao simulador (Figura 86). Realizou-se esse procedimento para verificar o grau de compactação (GC) da base construída. Obteve-se para a base executada na placa um GC de 100%.

Figura 86 – Realização do ensaio de densidade *in situ* na base de solo-brita



Fonte: Autor (2014)

A análise do MR foi realizada através do modelo composto ($M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$), visto que esse foi o que melhor representou o comportamento da mistura de solo-brita ensaiada. A Tabela 31 apresenta os valores de R^2 e da equação do MR para a mistura estudada.

Tabela 31 – MR da base estudada

MODELO	R^2	EQUAÇÃO
$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	0,86	$M_R = 1650,59 \cdot \sigma_3^{0,4899} \cdot \sigma_d^{-0,4670}$

4.4.2 Avaliação do comportamento do MRAF no simulador

A moldagem das placas de MRAF seguiu todos os parâmetros que foram calculados na etapa anterior no que diz respeito às dosagem com cada tipo de agregado estudado. Finalizado o procedimento de construção da base procedeu-se com a imprimação da mesma. A taxa de CM-30 aplicada sobre a base construída foi de 0,8 L/m² para todas as bases construídas. As bases imprimadas foram submetidas à cura por um período de 24h em estufa e em seguida aplicou-se o MRAF seguindo os procedimentos apresentados no Capítulo 3.

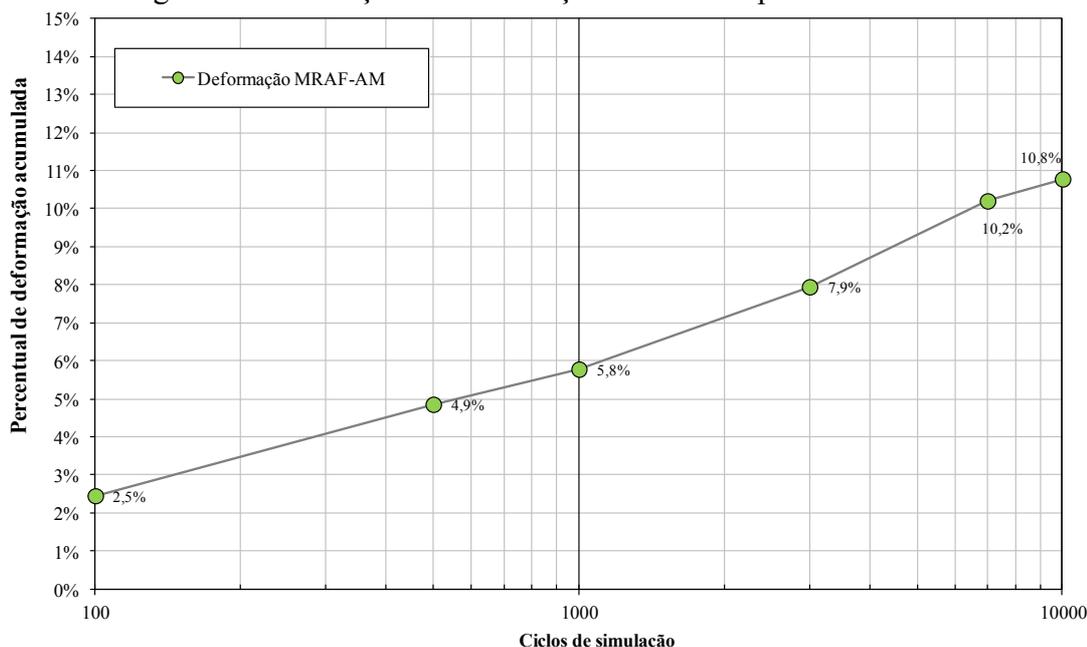
Antes de iniciar os ciclos de carregamento no simulador, procedeu-se com os ensaios de macro e microtextura com o intuito de avaliar esses parâmetros antes e depois dos ciclos de simulação. Além da análise dos afundamentos medidos durante o ensaio, procurou-se observar também alterações visuais que tenham ocorrido, tais como desgaste prematuro ou desprendimento de agregados.

4.4.2.1 Avaliação do Comportamento do MRAF no Simulador – AM

Antes de dar início ao ensaio com o simulador, foi calculada a taxa de aplicação em kg/m^2 de MRAF, pesando-se a placa antes e depois da aplicação do revestimento. Para o caso do MRAF – AM, considerando uma espessura de 1,5cm, a taxa de aplicação foi de $29,83\text{kg/m}^2$.

Seguindo o mesmo procedimento adotado por Vasconcelos (2013) e Pereira (2013), as placas de MRAF foram submetidas ao carregamento de 75kg, sendo realizadas uma análise visual e medição dos afundamentos em determinados pontos de parada (100, 500, 1000, 3000, 7000 e 10000 ciclos). A Figura 87 ilustra a evolução da deformação sofrida pelo MRAF – AM. No eixo y está ilustrado o percentual de deformação sofrido pelo revestimento e no eixo x a quantidade de ciclos de simulação realizados.

Figura 87 – Evolução da deformação acumulada para MRAF – AM

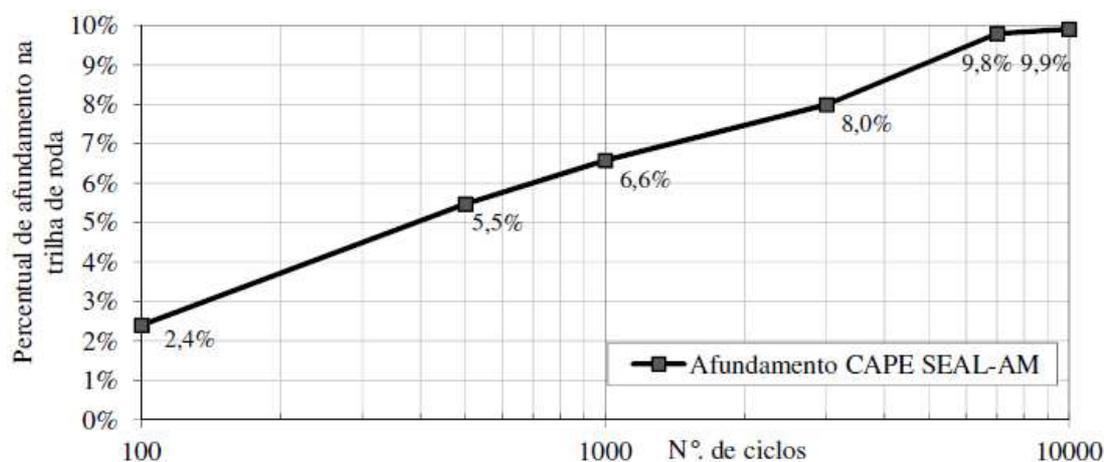


Fonte: Autor (2014)

Analisando a deformação sofrida pelas placas, pode-se observar que o afundamento para 100 ciclos deve-se à compactação do revestimento pela ação do simulador, visto que o MRAF foi espalhado sobre a base sem a realização deste processo, conforme explicado no Capítulo 3. Tal situação também ocorre no campo, onde as primeiras passagens do tráfego são responsáveis por essa compactação, portanto essa situação já era esperada.

Comparando os resultados obtidos por Vasconcelos (2013) para a situação onde o autor utilizou as placas de *cape seal* com o mesmo AM, observa-se que a deformação acumulada para 10000 ciclos foi semelhante. Notou-se no ensaio aqui realizado a mesma tendência de estabilização da deformação, porém com menor intensidade do que a verificada quando utilizada as placas de *cape seal*. A Figura 88 ilustra o comportamento quanto ao afundamento medido por Vasconcelos (2013).

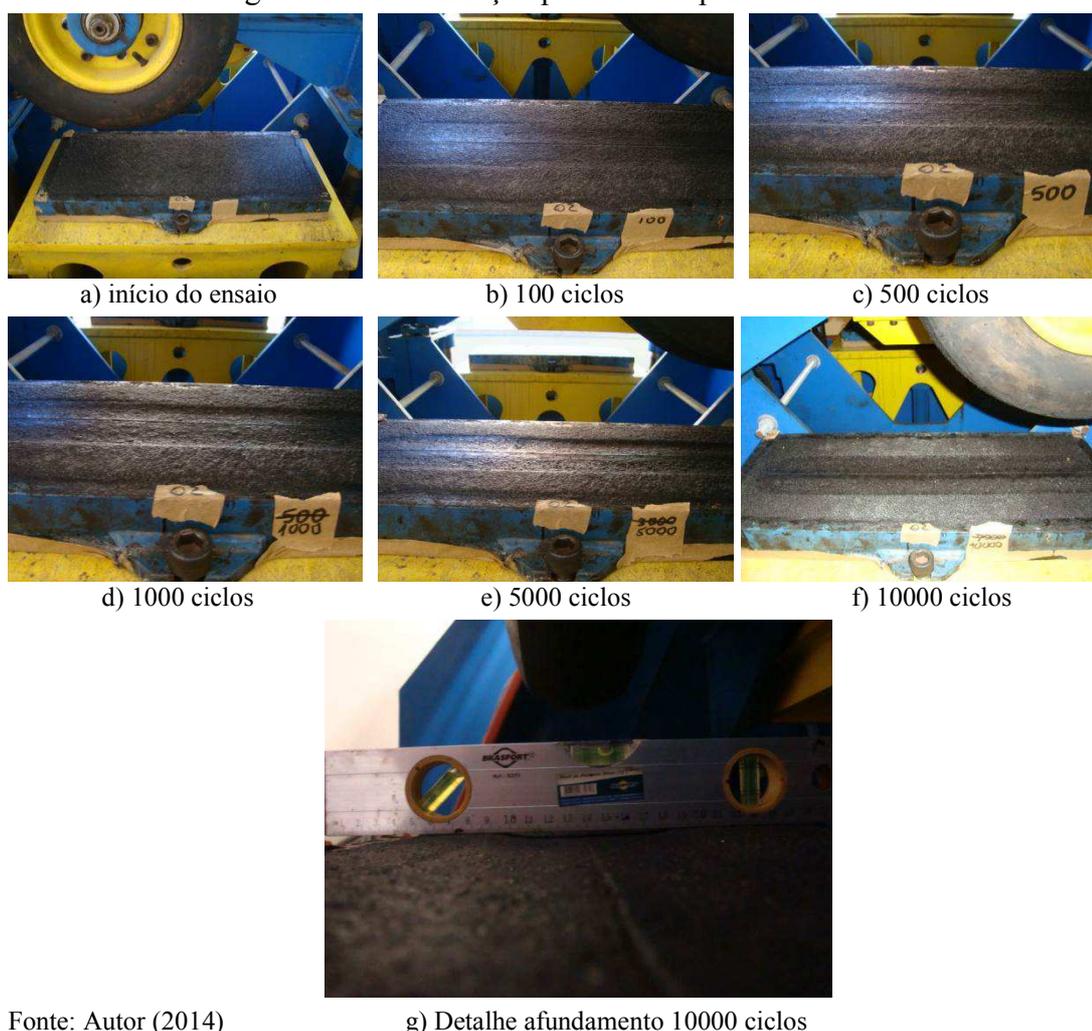
Figura 88 – Deformação acumulada para o *cape seal* – AM



Fonte: Vasconcelos (2013)

Com relação ao desgaste e desprendimento de agregados, não se observou nenhum desses fenômenos ao longo da simulação, indicando um adequado envolvimento dos agregados pelo ligante e um bom comportamento do revestimento quando utilizado esse tipo de agregado. A Figura 89 mostra a evolução da deformação sofrida pelas placas ao longo dos ciclos.

Figura 89 – Deformação permanente para MRAF – AM



Fonte: Autor (2014)

g) Detalhe afundamento 10000 ciclos

A microtextura também foi aferida antes e depois da realização dos ciclos de simulação através do ensaio de Pêndulo Britânico. O Valor de Resistência à Derrapagem (VRD) médio obtido antes do simulador foi de 76, sendo considerada uma superfície muito rugosa. Ao final dos 10000 ciclos, o VRD calculado foi de 53. Com esse valor final, a superfície é tida como medianamente rugosa. A redução no valor de VRD era esperada, pois com a passagem da roda do simulador ocorre o desgaste e o polimento dos agregados situados na superfície do revestimento. A especificação DNIT 031/2006 – ES estabelece um valor mínimo de 45 para o VRD.

Para o caso do MRAF – AM, conclui-se que a rugosidade do revestimento ainda pode ser considerada adequada ao final do ensaio. A Figura 90 mostra a realização do ensaio de Pêndulo Britânico ao final do ciclo de simulação.

Figura 90 – Ensaio de Pêndulo Britânico após 10000 ciclos para o MRAF com AM



Fonte: Autor (2014)

Da mesma maneira que ocorreu com Vasconcelos (2013), não foi possível realizar o ensaio de mancha de areia nas placas ensaiadas devido às dimensões reduzidas da placa. Entretanto, para solucionar esse problema, adotou-se o mesmo procedimento utilizado por Pereira (2010) e Rodrigues (2013), onde o volume de areia do pistão foi reduzido à metade. Dessa maneira, foi possível realizar as medições de HS sem maiores dificuldades.

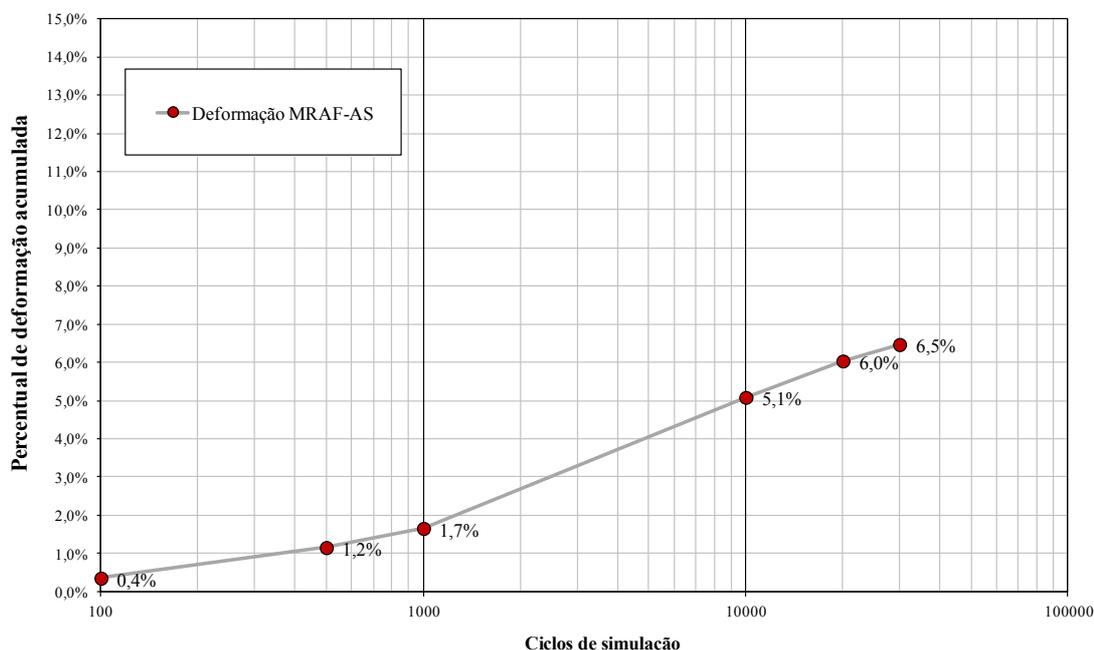
Os resultados de HS obtidos foram de 0,60mm antes do ensaio e 0,45mm depois do ensaio. De acordo com a especificação DNIT 031/2006, os valores de HS devem ser superiores a 0,60mm.

4.4.2.2 Avaliação do Comportamento do MRAF no Simulador – AS

A última combinação testada no simulador foi o MRAF composto somente com AS. A taxa de aplicação em kg/m^2 de MRAF, pesando-se a placa antes e depois da aplicação do revestimento, foi de $38,33 \text{ kg/m}^2$. Esse valor maior já era esperado devido à maior densidade do agregado siderúrgico. Sendo assim, essa taxa é considerada normal.

As placas de MRAF – AS foram submetidas ao ciclo de carregamento no simulador e os resultados estão ilustrados da Figura 91.

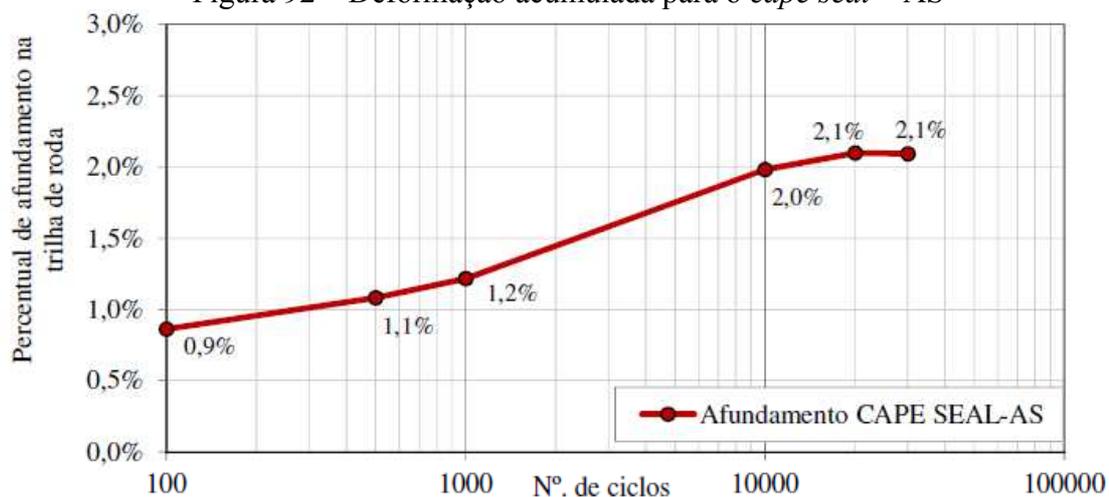
Figura 91 – Deformação acumulada para MRAF – AS



Fonte: Autor (2014)

Analisando a deformação sofrida pelas placas, pode-se constatar que o afundamento quando empregado o AS como agregado é cerca de 50% menor para 10000. Nessa situação procedeu-se com o ensaio até 30000 ciclos. Nota-se um comportamento mecânico superior com esse tipo de agregado quando comparado com as outras situações estudadas neste trabalho.

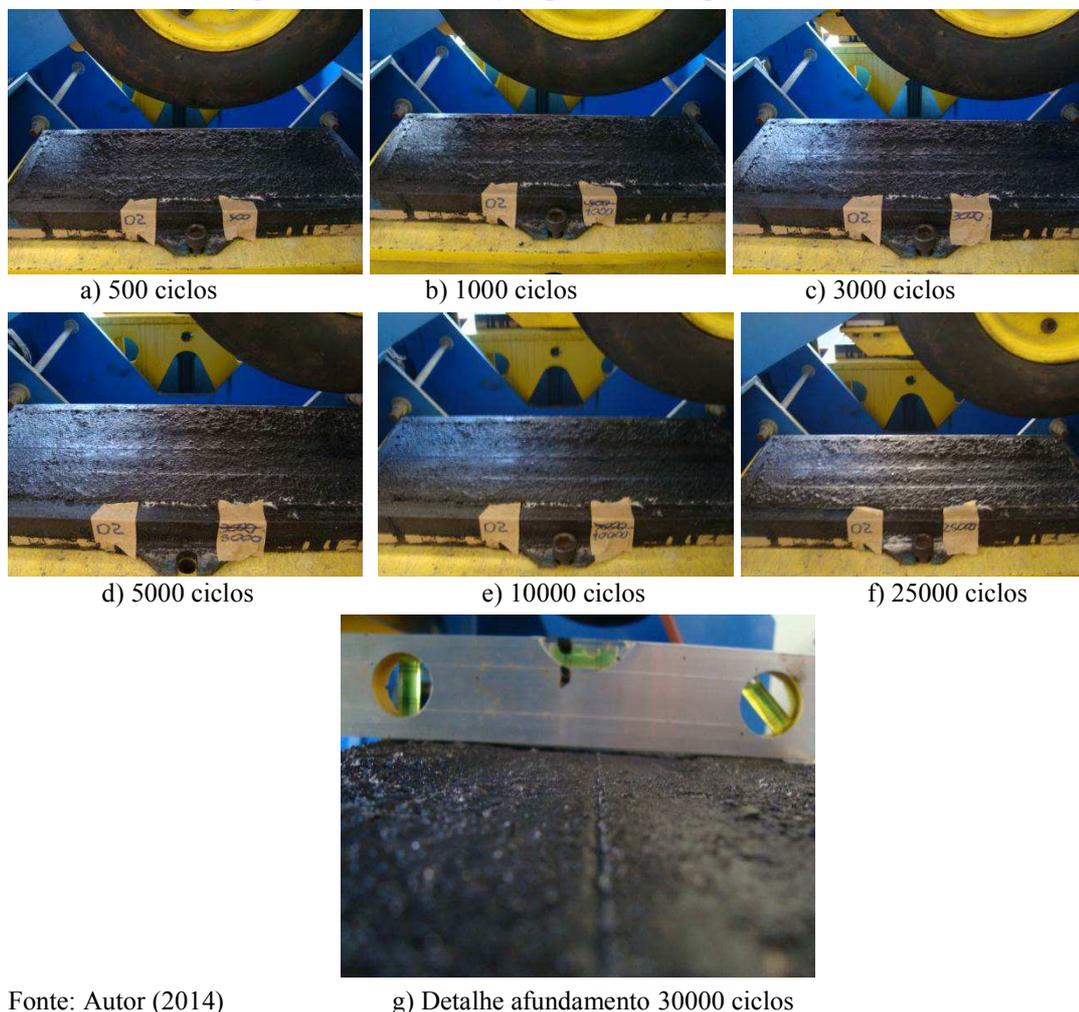
Comparando os resultados obtidos por Vasconcelos (2013) para a situação onde o autor utilizou as placas de *Cape Seal* com AS, observa-se que a deformação acumulada ao longo do ensaio foi superior. Porém, o autor utilizou uma estrutura de revestimento mais robusta, o que pode explicar seus melhores resultados. A Figura 92 ilustra o comportamento quanto ao afundamento medido por Vasconcelos (2013) em suas placas de *Cape Seal* – AS.

Figura 92 – Deformação acumulada para o *cape seal* – AS

Fonte: Vasconcelos (2013)

Com relação ao desgaste e ao arrancamento prematuro de agregados, não se observou nenhum desses fenômenos, indicando um bom comportamento do revestimento quando utilizado o AS. A Figura 93 mostra a evolução da deformação sofrida pelas placas ao longo dos ciclos.

Figura 93 – Deformação permanente para MRAF – AS



Fonte: Autor (2014)

Para o caso do MRAF – AS, o VRD médio obtido antes do simulador foi de 81, sendo considerada uma superfície muito rugosa. Ao final dos 10000 ciclos, o VRD calculado foi de 59, considerada superfície rugosa. Com isso, o revestimento com AS em sua composição atende aos requisitos mínimos da especificação DNIT 031/2006 .

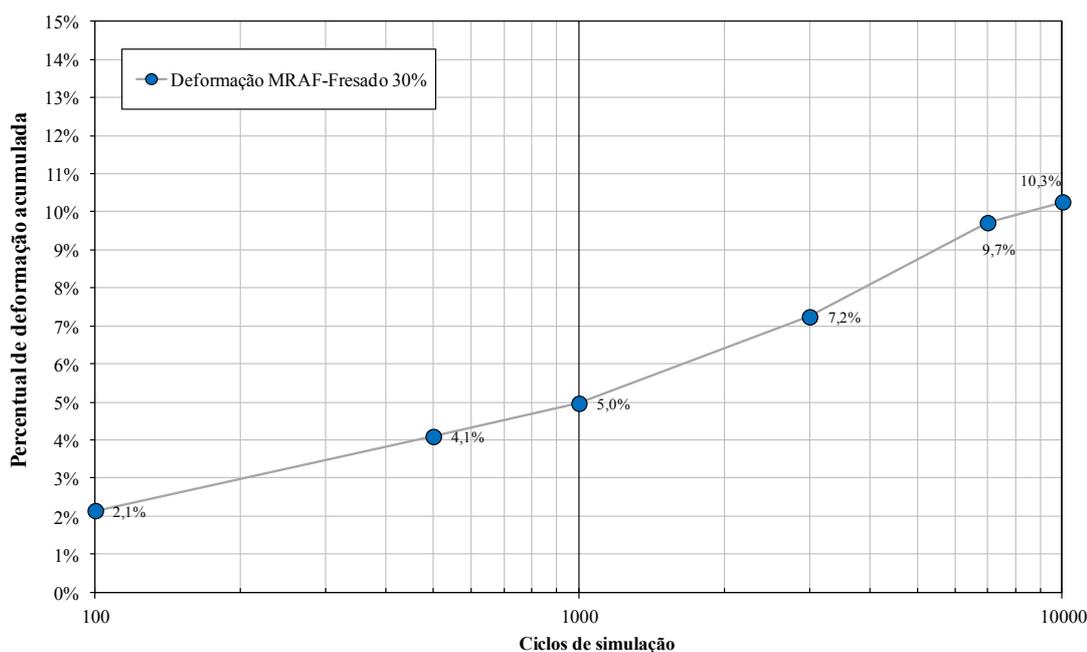
No ensaio de mancha de areia, os resultados de HS obtidos foram de 0,90 mm antes do ensaio e 0,70 mm depois do ensaio. De acordo com a especificação DNIT 031/2006 – ES, esses valores atendem às condições de segurança estabelecidas na norma.

4.4.2.3 Avaliação do Comportamento do MRAF no Simulador – Fresado 30%

Nessa situação, foram adicionados 30% de material fresado para compor a granulometria do MRAF, sendo os 70% restantes o mesmo material utilizado para compor o MRAF – AM. A taxa de aplicação para o MRAF – Fresado 30%, considerando uma espessura de 1,5cm, foi de 29,67 kg/m².

A placas de MRAF – Fresado 30% foram submetidas ao mesmo ciclo de carregamento de 75 kg no simulador, sendo realizadas uma análise visual e medição dos afundamentos em determinados pontos de parada. A Figura 94 ilustra a evolução da deformação sofrida pelas placas de MRAF – Fresado 30%.

Figura 94 – Deformação acumulada para MRAF – Fresado 30%



Fonte: Autor (2014)

Analisando a deformação sofrida pelas placas com 30% de fresado, pode-se constatar que o comportamento das mesmas foi similar ao obtido pelas placas constituídas somente com AM. Observou-se também o processo de compactação nos 100 primeiros ciclos. Analisando o gráfico acima, pode-se inferir que a adição de 30% de material fresado não alterou o comportamento quanto à deformação permanente. Essa tendência já havia sido observada nos ensaios de dosagem, onde os afundamentos visualizados no ensaio de LWT foram semelhantes para as duas combinações de materiais ensaiados.

O desgaste superficial aferido também foi similar quando comparado com o MRAF – AM, assim como não foi verificado a ocorrência de desprendimento de agregados. Essas evidências mostram que a adesividade e o intertravamento dos agregados também não foi alterada com a adição de 30% de material fresado na composição granulométrica do MRAF.

A microtextura aferida antes e depois da realização dos ciclos de simulação indicou os seguintes valores: VRD médio obtido antes do simulador foi de 78, sendo considerada uma superfície muito rugosa. Ao final dos 10000 ciclos, o VRD calculado foi de 60. Com esse valor final, a superfície é tida como medianamente rugosa. Os valores aqui encontrados foram ligeiramente superiores quando comparados com o MRAF – AM. A especificação DNIT 031/2006 – ES estabelece um valor mínimo de 45 para o VRD.

Com relação ao ensaio de mancha de areia, os resultados de HS obtidos foram de 0,74 mm antes dos ciclos de simulação e 0,61 mm ao final do ensaio. De acordo com a especificação DNIT 031/2006 – ES, valores abaixo de 0,60mm não atendem às condições de segurança estabelecidas na norma. Diferentemente dos valores encontrados para o MRAF – AM, os valores de macrotextura atenderam aos requisitos mínimos. O valor menor de macrotextura para o MRAF – AM pode também ser atribuído à algum erro cometido da realização do ensaio de mancha de areia, visto que 70% da composição granulométrica é do mesmo material.

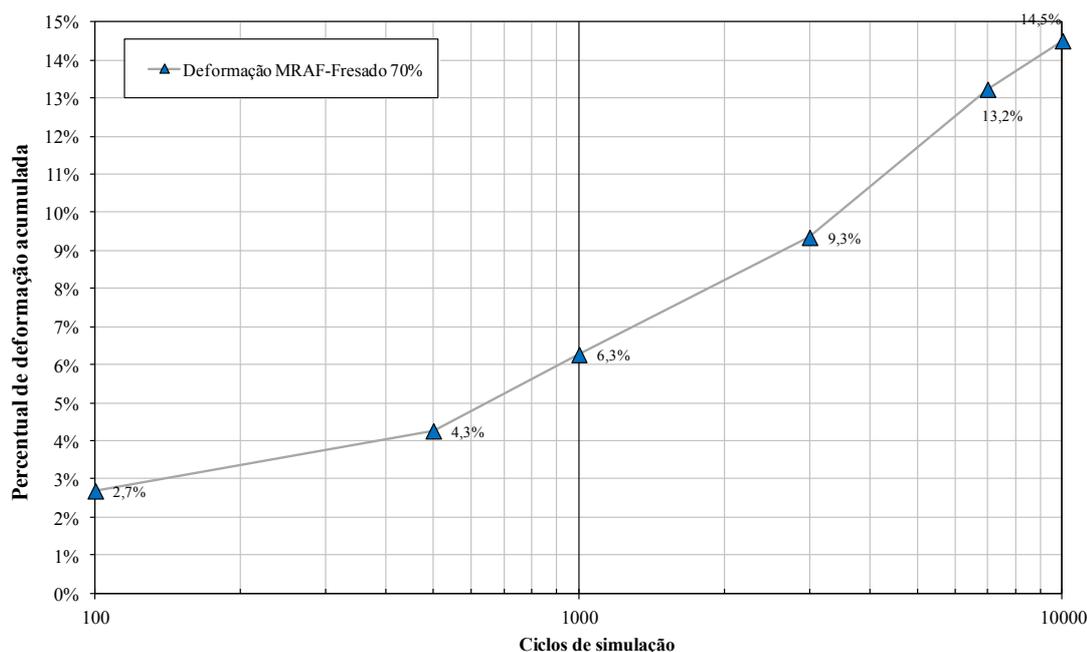
4.4.2.4 Avaliação do comportamento do MRAF no simulador – Fresado 70%

Nessa situação, foram adicionados 70% de material fresado para compor a granulometria do MRAF, sendo os 30% restantes o mesmo material utilizado para

compor o MRAF – AM. A taxa de aplicação para o MRAF – Fresado 70%, considerando uma espessura de 1,5cm, foi de 29,93 kg/m².

As placas de MRAF – Fresado 70% foram submetidas ao mesmo ciclo de carregamento de 75 kg no simulador, sendo realizadas uma análise visual e medição dos afundamentos em determinados pontos de parada. A Figura 95 ilustra a evolução da deformação sofrida pelas placas de MRAF – Fresado 70%.

Figura 95 – Deformação acumulada para MRAF – Fresado 70%



Fonte: Autor (2014)

Analisando a deformação sofrida pelas placas com 70% de fresado, percebe-se que o comportamento sofreu alterações quando comparado com as situações anteriores. A deformação medida foi cerca de 40% maior quando adicionado 70% de fresado na composição granulométrica do MRAF. Não houve uma tendência de estabilização da deformação como observado nas situações anteriores. O processo de compactação nos primeiros ciclos também foi observado.

Analisando o gráfico acima, conclui-se que a adição de 70% de material fresado alterou para pior o comportamento mecânico do revestimento. Essa tendência também já havia sido observada nos ensaios de dosagem, onde os afundamentos no ensaio de LWT fizeram com que dificilmente se chegasse aos 1000 ciclos exigidos no ensaio.

Após 5000 ciclos aplicados no simulador, verificou-se um desgaste superficial acentuado no revestimento. Além disso, começaram a surgir alguns trincamentos na placa e notou-se também o desprendimento de agregados. Essas

evidências mostram que a adesividade e o intertravamento dos agregados foram prejudicadas com a adição de 70% de material fresado na composição granulométrica do MRAF.

Como foi citado anteriormente e mostrado nos Ensaios de Coesão, o envolvimento do ligante novo sobre o material fresado não ocorreu como o esperado, ou seja, o ligante antigo aderido ao agregado dificultou o processo de cura do MRAF. Como consequência disso, o intertravamento dos agregados foi prejudicado, ocasionando afundamentos excessivos e elevado desprendimento e desgaste do revestimento. Esses problemas ocorridos durante o ensaio estão ilustrados na Figura 96.

Figura 96 – Problemas ocorridos nas placas com 70% de fresado



Fonte: Autor (2014)

Com base nos resultados obtidos nessa simulação, pode-se inferir que a adição de 70% de material fresado não apresentou resultados satisfatórios quanto ao comportamento do MRAF, ao contrário do que ocorreu na situação anterior (adição de 30%), onde o comportamento do revestimento não sofreu alterações quando comparado com o MRAF – AM. Percebe-se também que nessa combinação granulométrica, a vida útil do pavimento será reduzida.

A tendência do comportamento mecânico do revestimento verificada neste trabalho foi inversa à encontrada por Oliveira (2013), onde foram estudadas misturas recicladas mornas. O autor relatou que o incremento de fresado em sua composição granulométrica conferiu às suas misturas maior rigidez e maiores MR's devido à parcela de ligante envelhecido, portanto mais rígido, que compôs as suas misturas recicladas.

Entretanto, nota-se que essa é uma tendência mais característica de misturas mornas ou recicladas a quente. No caso de misturas recicladas a frio, objeto de estudo desta dissertação, tem-se relatos de outros autores onde são evidenciados prejuízos mecânicos quando acrescentados maiores teores de fresado.

Moreira (2005) citou que o incremento do teor de fresado nas misturas mostrou-se inversamente proporcional à resistência mecânica. Maiores teores de fresado ocasionaram em menores valores obtidos de parâmetros mecânicos. O autor ainda recomendou que os revestimentos estudados por ele não fossem aplicados em rodovias de tráfego pesado devido às perdas mecânicas encontradas em sua pesquisa.

Araújo (2004) comentou que a presença do ligante envolvido no agregado que compôs as suas misturas recicladas aplicadas em bases de pavimentos contribuiu para o escorregamento de uma partícula sobre a outra, tendo como consequência a redução do atrito entre as partículas, proporcionando ainda uma maior fluência da mistura.

Os problemas enfrentados pelos autores citados vão de encontro aos ocorridos neste trabalho. Pode ser observado nas placas com 70% de fresado que ao final do ensaio houve um escorregamento das partículas nas bordas da trilha de roda provocada pelo simulador. O ligante velho aderido ao fresado não foi totalmente diluído pelo ligante novo, ou seja, parte dele permaneceu aderido ao agregado prejudicando tanto a adesividade como o intertravamento dos agregados. Portanto, baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, não recomenda-se utilizar a composição granulométrica de 70% de fresado em aplicações de MRAF.

A microtextura aferida antes e depois da realização dos ciclos de simulação indicou os seguintes valores: VRD médio obtido antes do simulador foi de 70, sendo considerada uma superfície rugosa. Ao final dos 10000 ciclos, o VRD calculado foi de 56. Com esse valor final, a superfície ainda é considerada rugosa.

Com relação ao ensaio de mancha de areia, os resultados de HS obtidos foram de 0,83 mm antes dos ciclos de simulação e 0,60 mm ao final do ensaio. De acordo com a especificação DNIT 031/2006 – ES, valores abaixo de 0,60mm não

atendem às condições de segurança estabelecidas na norma. Assim como para o MRAF – Fresado 30%, os valores de macrotextura atenderam aos requisitos mínimos.

4.4.3 Resumo dos Resultados da 3ª Etapa do Programa Experimental

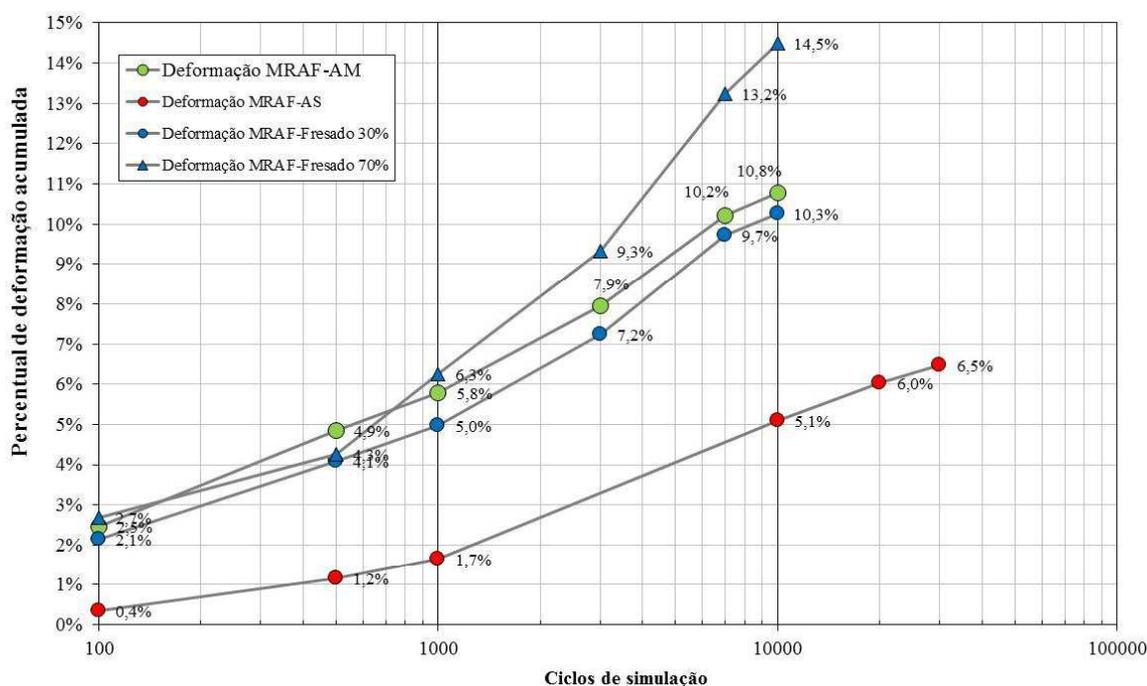
A Tabela 32 e a Figura 97 ilustram o resumo dos resultados obtidos para as combinações granulométricas submetidas aos ciclos de simulação no SISTRAN.

Tabela 32 - Resumo dos ensaios do simulador de tráfego de laboratório

RESULTADOS	MRAF-AM (agregado tipo 01)	MRAF- AS	MRAF (F-30)	MRAF (F-70)
Taxa de aplicação (kg/m ²)	29,83	38,83	29,67	29,93
HS (mm) antes	0,60	0,90	0,74	0,83
HS (mm) depois	0,45	0,70	0,61	0,60
VRD antes	76	81	78	70
VRD depois	53	59	60	56

Fonte: Autor (2014)

Figura 97 - Comparativo de evolução das deformações permanentes



Fonte: Autor (2014)

4.5 Resultados da 4ª Etapa do Programa Experimental

A quarta etapa do programa experimental consistiu em analisar economicamente as soluções propostas nesta dissertação. Os resultados estão

apresentados em R\$/km e consideraram uma rodovia com largura de 7m (sendo 2 faixas de tráfego de 3,5m de largura cada).

As composições de custo para cada solução foram calculadas de acordo com os parâmetros de dosagem e taxas de aplicação calculados nos itens anteriores deste capítulo. Todos os preços de insumos, serviços e ainda os coeficientes de utilização tiveram como base os dados extraídos diretamente do site da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE). A exceção fica para os valores dos ligantes e aditivos, cujos preços foram fornecidos pelo fabricante dos mesmos.

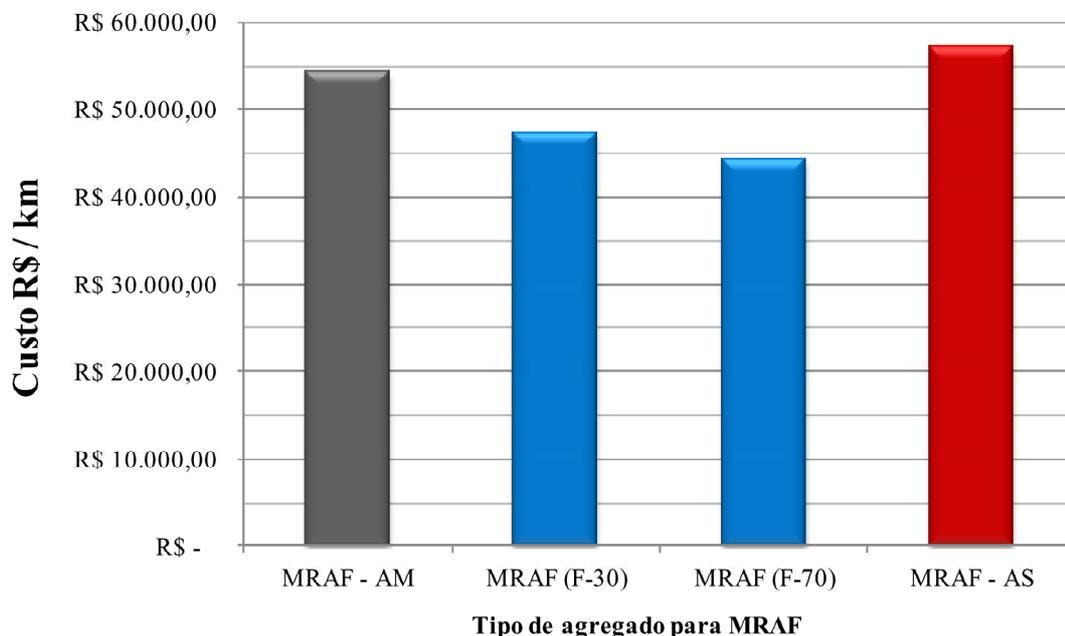
Para a definição dos custos de aplicação, foram desconsiderados também os custos das Distâncias Médias de Transporte (DMT) e Bonificações e Despesas Indiretas (BDI), assim como eventuais impostos que possam ser incluídos a depender da região onde será realizada a obra. Baseado no que foi citado neste tópico, os preços apresentados aqui se referem somente ao custo de aplicação com base nos dados para o Estado do Ceará, podendo ocorrer variações de acordo com a Unidade Federativa (UF) onde os preços forem pesquisados. A Tabela 33 e a Figura 98 mostram o comparativo dos custos de aplicação do MRAF com as diferentes matrizes de agregados testadas.

Tabela 33 – Comparativo de custos de aplicação do MRAF

TAXA / CUSTO	MRAF-AM (agregado tipo 01)	MRAF- AS	MRAF (F-30)	MRAF (F-70)
Tx. de agregado (kg/m ²)	28,0	35,9	27,5	27,5
Teor de ligante em relação ao peso do agregado (%)	10,8	10,8	8,9	8,1
Quantidade de ligante (kg/m ²)	3,02	3,88	2,45	2,23
Teor de aditivo (%)	-	-	-	-
Custo do ligante (R\$/m ²)	4,68	6,01	3,80	3,46
Custo do aditivo (R\$/m ²)	-	-	-	-
Custo material + MO (SEINFRA-CE)	3,06	2,15	2,98	2,88
Custo final (R\$/m²)	7,74	8,17	6,78	6,34
Custo final (R\$/km)	54.187,00	57.179,03	47.442,50	44.355,50

Fonte: Autor (2014)

Figura 98 – Comparativo de custos de aplicação do MRAF com diferentes agregados testados



Fonte: Autor (2014)

Analisando a Tabela 33 e a Figura 98, observa-se que existe uma variação no preço do ligante. A redução no caso das composições com fresado se deve ao fato dos menores teores de emulsão utilizados na execução desses revestimentos. No caso do MRAF – AS, o aumento ocorreu devido ao maior consumo de ligante. Deve-se atentar para o fato de que o teor de ligante para o AS foi o mesmo utilizado para o AM, entretanto esses percentuais são em relação ao peso do agregado utilizado. Como tem-se uma maior taxa de agregado para o AS, isso acarreta em um maior consumo de ligante.

Com relação às reduções nos custos de material + MO, percebe-se uma redução maior para o caso do AS. Esse menor valor se dá pelo menor preço de aquisição deste tipo de agregado (em torno de R\$ 10,20 a tonelada, enquanto a brita custa cerca de R\$ 70,00), embora esse valor tenha crescido nos últimos anos. Dessa forma, a economia gerada nesse ponto é anulada pelo maior consumo de ligante quando utiliza-se o AS.

Para o caso dos custos relativos ao material fresado, a redução é menor pois neste caso foram considerados os custos de britagem desse material. Desconsiderou-se também o preço de aquisição do material fresado, pois não existe a comercialização desse material até o presente momento.

Analisando os custos finais de aplicação em R\$/km, pode-se constatar que a utilização do material fresado proporciona uma economia de até 20% no custo de

aplicação do MRAF quando empregado 70% de material fresado em sua composição. Entretanto, tecnicamente apresentou o pior um comportamento no simulador, pois esta solução apresentou uma vida útil menor do pavimento.

Apesar disso, a solução com 30% de fresado apresentou um comportamento mecânico similar ao revestimento composto somente por AM, gerando uma economia de aproximadamente 13% no custo por km de MRAF aplicado. Baseado nesses resultados, tem-se essa solução como a mais viável economicamente, sem ocasionar em prejuízos no que se diz respeito à durabilidade do revestimento construído.

A aplicação de MRAF com AS mostrou-se como a opção menos viável economicamente, sendo cerca de 5% mais cara que a solução referência desta dissertação. Porém, observou-se que seu comportamento mecânico foi superior à todos os tipos de agregados testados, obtendo uma durabilidade superior. Essa tendência também é observada em outros trabalhos que utilizam o AS como agregado. Destaque-se essa maior durabilidade deve ser testada em trechos experimentais em escala real, para que possam ser analisados também outros fatores que podem alterar o desempenho de um revestimento.

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados da caracterização dos agregados alternativos envolvidos na pesquisa, assim como os resultados da caracterização dos ligantes asfálticos empregados no MRAF. Em seguida foram apresentados os resultados das dosagens, onde foram definidas as quantidades de cada componente que compõe o MRAF, indicando as particularidades para cada agregado alternativo selecionado. Realizaram-se também uma análise do comportamento do revestimento em laboratório, onde foram determinados os desgastes médios sofridos pelas amostras. Foram também obtidos os tempos de liberação ao tráfego para cada material coletado.

Além disso, foi observado o comportamento do MRAF construído sobre uma base de solo-brita através de um simulador de tráfego de pequeno porte. Os resultados obtidos foram comparados com outras soluções de revestimentos esbeltos confeccionados sobre a mesma base e submetidos aos mesmos ciclos de carregamento em simulador. Esses resultados fazem parte da terceira etapa do programa experimental desta dissertação.

A quarta etapa foi composta de uma análise de custos de aplicação do MRAF com o intuito de analisar a viabilidade econômica das soluções propostas. Foram feitas composições de custo para cada solução adotada neste trabalho baseados no procedimento de dosagem e nas taxas de aplicação definidas na terceira etapa do programa experimental. Foi ainda realizado um comparativo com a solução padrão composta de agregado mineral.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões desta dissertação e algumas sugestões para estudos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

5.1 Considerações Iniciais

A presente dissertação de mestrado procurou avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do emprego de agregados alternativos em revestimentos do tipo MRAF, além de avaliar o seu comportamento quando utilizado como método construtivo de pavimentos. Os agregados alternativos selecionados foram o agregado siderúrgico e os agregados oriundos do processo de fresagem de revestimentos asfálticos. Foram avaliados os resultados da caracterização dos agregados coletados, do processo de dosagem e dos seus comportamentos através de ensaios de laboratório, sendo ainda realizado um comparativo com os resultados quando empregado um agregado do tipo convencional.

Foram avaliados também os resultados obtidos nos ensaios de simulação de tráfego utilizando um simulador de laboratório de pequeno porte. Os parâmetros de macro e microtextura das superfícies, o desgaste superficial ocorrido e os afundamentos ao longo do processo de simulação foram determinados. O custo de aplicação com cada tipo de agregado selecionado foi composto buscando realizar uma análise econômica de cada solução empregada. Vale ressaltar que as conclusões aqui descritas referem-se ao que foi observado durante a realização dos ensaios referentes na presente pesquisa.

5.2 Resumo das Principais Conclusões

Os resultados obtidos nesta dissertação mostraram que os agregados alternativos estudados têm potencial para serem empregados em revestimentos do tipo MRAF. O emprego do AS em MRAF se mostrou viável no âmbito técnico e ambiental. Com relação aos custos envolvidos de sua utilização, verificou-se que há um incremento quando comparado com os agregados minerais. Entretanto, as análises laboratoriais evidenciaram que o MRAF confeccionado com AS possui melhor resistência ao desgaste e apresentou as menores deformações no simulador de tráfego de laboratório. Além disso, os padrões de segurança foram atendidos a contento. O melhor comportamento do revestimento com esse tipo de agregado pode estender a vida útil do pavimento, fazendo com que a relação custo-benefício dessa alternativa se torne vantajosa a longo prazo.

O emprego do fresado também se mostrou uma alternativa viável no âmbito técnico, econômico e ambiental. O emprego de 30% de material fresado na composição granulométrica não alterou o comportamento do MRAF quando comparado com a situação de 100% de AM quanto ao desgaste superficial e deformação permanente, indicando que essa solução alternativa tende a apresentar a mesma durabilidade. O emprego de 30% de material fresado em MRAF, além de reduzir a exploração de recursos naturais (agregados e ligante), gerou uma economia de 13% nos custos de aplicação. Entretanto, teores maiores de fresado testados nesta dissertação (70%) mostraram que houve uma redução da vida útil do revestimento. Sendo assim, após testar esses dois teores de fresado, adota-se como a quantidade adequada para emprego em MRAF a proporção de 30%.

Os resultados obtidos nos testes de simulação de tráfego em laboratório mostraram que o MRAF apresentou comportamento satisfatório quando construído diretamente sobre bases granulares. Pode-se constatar que a técnica tem potencial para ser empregado como método construtivo de rodovias de baixo volume de tráfego, tornando-se então mais uma alternativa de revestimento a ser destinada para essa finalidade. Porém, para que o MRAF seja considerado de fato uma alternativa para esse tipo de rodovia, deve-se proceder com uma análise em escala real com a construção de trechos experimentais, onde o pavimento também seja submetido a situações de variações climáticas, por exemplo.

Sabe-se que os TSPs são revestimentos com maior flexibilidade que o MRAF, ou seja, podem resistir melhor aos deslocamentos verticais que ocorrem nas camadas do pavimento com a passagem do tráfego. Além disso, deve-se analisar se o MRAF construído diretamente sobre uma base granular é capaz de impermeabilizar e proteger a base com a mesma eficácia que ocorre quando é executado um TSP, pois se sabe que o volume de vazios do MRAF é elevado e em caso de precipitações pode ocorrer a infiltração de água nas camadas granulares do pavimento e prejudicando sua capacidade de suporte.

Esses questionamentos não podem ser respondidos somente através de uma análise laboratorial, portanto essas situações devem ser investigadas antes de afirmar que o MRAF é de fato uma solução viável tecnicamente para emprego como método construtivo de rodovias.

5.3 Principais Constatações

5.3.1 Quanto aos Ensaios de Caracterização dos Agregados e Ligante

O processo de caracterização dos agregados mostrou que os agregados alternativos selecionados atendem aos requisitos das normas vigentes. Algumas ressalvas podem ser feitas somente com relação ao ensaio de Abrasão Los Angeles, onde o material fresado apresentou resultados ligeiramente acima do limite máximo. Entretanto, não houve comprometimento nos resultados dos ensaios de desgaste realizados. Nos demais ensaios de caracterização realizados, os materiais coletados apresentaram resultados condizentes com as especificações de MRAF.

Com relação aos ensaios específicos realizados para o AS, verificou-se que a amostra coletada estava curada, ou seja, sua expansão foi praticamente nula, garantindo que não haveria problemas em utilizá-lo como agregado. Os ensaios ambientais também mostraram que as amostras não apresentaram perigo ao meio ambiente.

Com relação aos ensaios realizados com o fresado, conclui-se que a presença do ligante modifica os resultados de alguns ensaios de caracterização, com maior destaque para o equivalente de areia e azul de metileno. Os resultados obtidos nos ensaios para a amostra sem ligante evidenciaram essa influência, onde verificou-se que a amostra sem ligante não seria enquadrada nos limites das especificações para MRAF. Nesse caso, a presença do ligante inibiu a reatividade dos agregados, fazendo com que pudessem ser empregados no MRAF, não gerando problemas de incompatibilidade com o ligante.

O ligante fornecido também se mostrou adequado para emprego no MRAF, pois todos os ensaios realizados tiveram resultados conforme especificado pelas normas vigentes.

5.3.2 Quanto ao Processo de Dosagem do MRAF

Os resultados do ensaio de Determinação do Tempo Mínimo de Misturação (NBR 14758/2001), onde são definidos os teores de aditivos a serem empregados, mostraram que os agregados selecionados apresentaram boa compatibilidade com o ligante. Em nenhuma das amostras ensaiadas verificou-se a necessidade da utilização de aditivos para retardar a ruptura da emulsão.

Com relação ao teor de projeto de ligante, constatou-se a tendência mostrada em outros trabalhos do aumento do seu consumo quando se utiliza o AS em substituição ao

agregado convencional. Deve ser destacado que apesar do percentual de ligante ter sido o mesmo para o agregado convencional e para o AS, esse teor é calculado em relação ao peso do agregado, que no caso do AS é cerca de 30% maior. O maior consumo de ligante implica no incremento dos custos de aplicação.

Ao contrário do que ocorreu com o AS, verificou-se uma redução no consumo de ligante quando adicionado material fresado na composição do MRAF. A economia gerada foi de até 30% quando utilizado 70% de material fresado. Apesar do teor adicionado de ligante ser menor do que o especificado em norma, constatou-se que ao realizar a determinação do teor de betume existente na amostra, o teor residual atendeu aos requisitos mínimos das especificações atuais. Com isso, pode-se empregar o teor sugerido nesta pesquisa sem estar descumprindo o teor mínimo de asfalto residual estabelecido.

5.3.3 Quanto ao Comportamento do MRAF em Laboratório

Nesta etapa mediu-se a resistência ao desgaste das amostras através de ensaios de abrasão úmida e o tempo de liberação ao tráfego através de ensaios de coesão.

Com relação ao desgaste, as amostras confeccionadas com os agregados alternativos atenderam aos limites estabelecidos nas normas vigentes. As amostras confeccionadas com AS obtiveram os melhores resultados, enquanto as amostras com material fresado apresentaram desgaste maior quando comparado com os agregados convencionais. Verificou-se que o incremento de fresado no MRAF resulta em um maior desgaste por abrasão. Ao analisar as amostras de MRAF com fresado detalhadamente, constatou-se que o ligante aderido ao fresado dificulta o envolvimento do novo ligante, ocasionando maior desgaste medido.

No que diz respeito ao tempo de liberação ao tráfego, o MRAF com AS atendeu aos padrões de torque especificados pela norma, apresentando o mesmo tempo de liberação ao tráfego quando comparado com os agregados convencionais. Já com relação ao fresado, constatou-se que o mesmo retarda o processo de cura da massa, chegando a duplicar esse tempo quando utilizado 70% deste material no MRAF. Recomenda-se neste caso estender o tempo de interrupção do trecho visando evitar o desprendimento dos agregados com as primeiras passagens do tráfego.

5.3.4 Quanto ao Comportamento do MRAF no Simulador de Tráfego de Laboratório

Com a base de solo-brita executada dentro dos padrões estabelecidos pela norma ET-DE-P00/06 do DER-SP, procedeu-se com a análise do MRAF em um simulador de tráfego de laboratório. Foram submetidas aos ciclos de simulação a mistura referência, constituída de 100% de Agregado Mineral (AM) e as três soluções utilizando agregados alternativos nas composições granulométricas.

O MRAF – AM apresentou bom comportamento quanto à deformação permanente e desgaste superficial, apresentando resultados similares quando comparados com os obtidos por Vasconcelos (2013), sendo que esse autor estudou outro tipo de revestimento delgado, o *Cape Seal*. Porém, esse comparativo é válido pelo fato dos dois revestimentos delgados terem sido submetidos ao mesmo ciclo de carregamento no simulador e foram executados sobre bases de materiais similares.

O desgaste superficial foi considerado satisfatório para o caso do AM, confirmando que o MRAF executado com esse agregado apresenta boa durabilidade, confirmando os bons resultados obtidos no ensaio de WTAT. Com relação aos parâmetros de segurança analisados (macro e micro textura), observou-se que no ensaio de mancha de areia o valor mínimo requerido pelo DNIT não foi obtido. Entretanto, com relação ao VRD, o resultado obtido foi superior ao limite mínimo da especificação, garantindo um bom coeficiente de atrito da superfície ao final do ciclo de simulação.

O MRAF – Fresado 30% apresentou comportamento semelhante ao revestimento executando somente com AM. A evolução da deformação se deu de maneira similar e não foram verificados desgastes prematuros ou desprendimento de agregados por falta de adesividade ou intertravamentos dos grãos. Ou seja, para as condições testadas, a adição de 30% de material fresado na composição granulométrica não interferiu na durabilidade do revestimento.

O incremento de 30% de fresado também não alterou os parâmetros de segurança. O valores de VRD também foram superiores aos limites mínimos requeridos pelas especificações vigentes. O resultado do ensaio de mancha de areia foi melhor quando comparado com o MRAF – AM. Baseado nos resultados aqui obtidos, conclui-se que o MRAF – Fresado 30% é uma opção tecnicamente viável.

Já no caso da situação MRAF – Fresado 70%, houve uma piora no comportamento mecânico do revestimento. As deformações medidas foram cerca de 40% maiores quando comparadas com as obtidas nas situações de MRAF – AM e MRAF – Fresado 30%. Também não foi observada a tendência de estabilização da deformação entre 7000 e 10000 ciclos, situação que ocorreu nas outras combinações granulométricas testadas.

Caso o ensaio no simulador tivesse sido prolongado por mais alguns ciclos, é provável que houvesse o colapso do revestimento. Esse comportamento ruim já havia sido observado durante os ensaios de dosagem, onde ocorreram sucessivas rupturas dos corpos de prova nos ensaios de LWT.

Com metade dos ciclos ensaiados (5000), observou-se também o surgimento de trincamentos, desgaste prematuro da superfície e o desprendimento de agregados. Esses problemas evidenciaram a falta de adesividade e de intertravamento dos grãos de fresado. A película de ligante envelhecido que envolve o fresado diminui o atrito entre os grãos e dificulta a adesividade dos agregados com o novo ligante adicionado. Observou-se que o novo ligante dissolve somente uma pequena parte do ligante envelhecido, diferentemente do que ocorre com as misturas a quente, onde grande parte do ligante é aproveitado. A piora do comportamento mecânico de misturas a frio ou de camadas granulares quando adicionado fresado também foi observada por outros autores como Araújo (2004) e Moreira (2005).

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, não recomenda-se a aplicação de 70% de fresado em MRAF, seja como manutenção preventiva ou como método construtivo de rodovias. Mesmo os parâmetros de segurança tendo sido atingidos, o revestimento nessa situação teve sua vida útil reduzida, indicando que essa não deve ser uma solução adotada, mesmo que o tráfego na rodovia seja mais leve.

O melhor comportamento mecânico foi obtido quando testado o MRAF – AS. As deformações medidas foram cerca de 50% menores quando comparadas com o MRAF – AM. Optou-se nesse caso por realizar um número de ciclos três vezes maior (30000) e mesmo assim a deformação ficou cerca de 35% menor com tendência de estabilização. Comparado com o resultado apresentado por Vasconcelos (2013), o MRAF – AS apresentou uma maior deformação. Entretanto, vale ressaltar que nesse trabalho o autor utilizou um revestimento mais robusto e de maior espessura. Não foram percebidos desgastes prematuros ou tendência de desprendimento de agregados ao longo do ensaio.

O MRAF – AS apresentou uma durabilidade superior quando comparada com as outras soluções aqui estudadas, garantindo assim uma maior vida útil do revestimento. Constatou-se, porém, que o revestimento quando utilizado o AS como agregado, apresentou rigidez superior. Entretanto, não se pode afirmar, baseado na metodologia aplicada nesta dissertação, se essa elevada rigidez pode prejudicar o comportamento do revestimento ao longo do tempo, fazendo com que surjam trincamentos ao longo das trilhas de roda com a atuação de um tráfego mais pesado. Essa situação poderia ser melhor avaliada no caso da

construção de um trecho experimental em uma rodovia onde exista um tráfego de maior intensidade.

5.3.5 Quanto à Viabilidade Econômica

Com relação à análise econômica, comparando-se com o custo de aplicação do MRAF – AM, observa-se que a incorporação de fresado reduz o custo de aplicação por km do MRAF em até 20% quando empregado 70% de fresado na composição granulométrica. Entretanto, foi visto no item anterior que esta solução não é viável tecnicamente. No caso do MRAF – Fresado 30%, obteve-se uma economia de 13% no custo, sem prejuízos quanto à durabilidade do revestimento, pois esta situação apresentou comportamento similar ao MRAF – AM, atendendo todos os requisitos das normas vigentes. Vale ressaltar que a principal economia foi obtida no menor uso do ligante, sendo os custos de material e mão de obra ligeiramente inferiores.

Apesar de ter apresentado o melhor comportamento mecânico, o MRAF – AS se mostrou como a opção menos viável economicamente, apresentando custo cerca de 5% maior que o calculado para a solução referência (MRAF – AM). Apesar do preço do agregado ser menor para a solução do MRAF – AS, a quantidade de ligante requerida é maior quando comparado com revestimentos asfálticos que utilizam somente AM. Apesar desse custo inicial ser maior, essa solução pode apresentar um melhor custo-benefício caso a maior durabilidade dessa solução seja confirmada na prática. Daí a importância de se realizar uma análise em verdadeira grandeza das soluções propostas neste trabalho.

5.4 Recomendações para Trabalhos Futuros

Como principais recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- a realização de novos testes com diferentes teores de fresado, estreitando os intervalos aqui apresentados e assim analisando melhor a influência do fresado no comportamento do MRAF;
- a avaliação do comportamento do MRAF com fresado em diferentes faixas granulométricas;

- a avaliação das propriedades de forma e textura dos agregados no comportamento do MRAF;
- a realização de uma avaliação mais detalhada da interação dos agregados envolvidos com ligante envelhecido com os agregados virgens e ligante novo;
- a realização de novos ensaios no simulador de tráfego de laboratório com carregamentos de maior magnitude;
- a construção de trechos experimentais em verdadeira grandeza para análise em simulador de grande porte ou a construção de trechos experimentais em rodovias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6576: Determinação na penetração de materiais betuminosos,.Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14393: Emulsões Asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14376: Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo asfáltico por evaporação – método expedito. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6299: Emulsões Asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14491: Emulsões Asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6570: Emulsões asfálticas – Determinação da Sedimentação. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6567: Emulsões asfálticas – Determinação de carga da partícula. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6560: Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2000.

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 14757: Microrrevestimentos e lamas asfálticas – Determinação da adesividade de misturas. Rio de Janeiro, 2001.

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 5019: Produtos e ligas de cobre – Terminologia. 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 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 14948: Microrrevestimentos asfálticos a frio modificados por polímero – Materiais, execução e desempenho. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15086: Materiais Betuminosos – Determinação Da Recuperação Elástica Pelo Ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006.

ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. *Manual Básico de Emulsões Asfálticas*. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ, 2010

APPAROA, G.; KUMAR, R; AMAR, D.D.; RYNTATHIANG, T.L. *Green Road Approach for the Sustainable Development in India*. European Journal of Sustainable Development. P 165-176. Londres. 2013

ARAÚJO, L. M. D. *Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando sua Aplicação em Reciclagem de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

AUSTROADS. *Sprayed Sealing Guide*. Austroads. Sydney, Australia, 2003a.

AUSTROADS. *Guidelines and Specification for Bituminous Slurry Surfacing*. Austroads Publication No. AP-T26/03, Sydney, Australia, 2003b.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras / ABEDA. Rio de Janeiro, 3ª Reimpressão, 2010.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. *Avaliação da Resistência ao Polimento e à Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o Processamento Digital de Imagens*. 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR & C. Foz do Iguaçu, PR, 2011.

BICKFORD, A. *The Difference Between Slurry Seal and Microsurfacing*. AEMA Newsletter 2, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, Annapolis, Estados Unidos, 2008.

BOCCI, M.; CANESTRARI, F.; GRILLI, A.; PASQUINI, E.; LIOI, D. *Recycling Techniques And Enviromental Issues Relating To The Widening Of Na High Traffic Volume Italian Motorway*. International Journal of Pavement Research and Technology. 2010.

BONFIM, V. *Estudo da Granulometria Resultante da Fresagem de Revestimentos Asfálticos com Vista à Reciclagem “in situ” a Frio*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1999.

BONFIM, V. *Fresagem De Pavimentos Asfálticos*. Exceção Editorial. São Paulo, 2011.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Slurry Seal / Micro-Surface Mix Design Procedure*. California Department of Transportation. California, Estados Unidos, 2004.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Maintenance Technical Advisory Guide Volume 1: Flexible Pavement Preservation*. 2ª ed. California Department of Transportation. California, Estados Unidos, 2009.

CASTELO BRANCO, V. T. F. *Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

CASTRO, P. B. *Avaliação De Agregados Da Região Metropolitana De Fortaleza Para Aplicação Em Microrrevestimento Asfáltico A Frio*. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará (UFC). 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. Odebrecht Construtora. Rio de Janeiro, 2011.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. *Manual De Microrrevestimento Asfáltico A Frio – MRAF*. Instituto Pavimentar. Rio de Janeiro, 2011.

DNER-ES 389/99: Pavimentação – microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 1999.

DNER-ME 089/1994: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro,

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

DNER-ME 084/1995: Agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro,

DNER-ME 054/1997: Equivalente de Areia. Rio de Janeiro,

DNER-ME 083/1998: Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro,

DNER-ME 035/1998: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro,

DNER-ME 003/1999: Material betuminoso – determinação da penetração. Rio de Janeiro,

DNER-ME 382/1999: Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos modificados por polímeros, pelo método do ductilômetro. Rio de Janeiro,

DNER-ME 006/2000: Emulsões asfálticas – Determinação da sedimentação. Rio de Janeiro,

DNIT-EM 128/2010: Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2010

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Pavimentos flexíveis – Micro Revestimento Asfáltico a Frio com Emulsão Modificada por Polímero – Especificação de Serviço*. DNIT ES 035/2005. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Aplicação de escória de aciaria produzida na ArcelorMittal-Tubarão com redução de expansão, com ou sem adição de argila em base e sub-base rodoviária*. Relatório Final, Volume 1. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Relatório Gerencial 2014 – Manutenção da Malha Rodoviária Federal Pavimentada Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)*. Brasília, DF, 2014

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). *Surface Rehabilitation Techniques: State of the Practice Design, Construction and Performance of Micro-Surfacing*. Washington. Estados Unidos, 1994.

FEDERAL LANDS HIGHWAY DIVISION (FLHD). *Standart Specifications for Construction Roads and Bridges in Federal Highway Projects*. Federal Highway Administration. Washington. Estados Unidos, 2003.

FILEV, R. *Escória de Aciaria, Ficha técnica*. USP. São Paulo, SP. Disponível em http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm. Acesso em: 15 de março de 2011.

HEIN, D.; OLIDIS, C.; DARTER, M.; QUINTUS, H. V. *Impact of Recent Tecnology Advancements on Pavement Life*. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. St. John's, Newfoundland and Labrador. Canadá, 2003.

HICK, R.G.; MOULTHROP, J.S.; DALEIDEN, J. *Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, Estados Unidos, 1999. P. 1–12.

Instituto Aço Brasil (IABr). *Relatório de Sustentabilidade 2012*. Disponível em www.ibs.org.br. Acesso em 02 de junho de 2013.

Instituto Aço Brasil (IABr). *Relatório de Sustentabilidade 2013*. Disponível em www.ibs.org.br. Acesso em 02 de maio de 2014.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION (ISSA). *ISSA A-143. Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing*. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2010.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION (ISSA). *Inspector's Manual for Slurry Systems*. Annapolis, Estados Unidos, 2010b.

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

MACHADO, A. T. *Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2002.

METCALF, S. *Keys do Successful Slurry Seal and/or Microsurfacing Projects*. The 2007 California Pavement Preservation Conference. Califórnia. Estados Unidos, 2007.

MOREIRA, H. S.. *Comportamento Mecânico De Misturas Asfálticas A Frio Com Diferentes Teores De Agregado Fresado Incorporado E Diferentes Modos De Compactação*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). *Microsurfacing, A Synthesis os Highway Practice*. Transportation Research Board. Washington. Estados Unidos, 2010.

OLIVEIRA, W. *Emulsão e Espuma de Asfalto para Reciclagem In-Situ aFrio*. 16º Encontro de Asfalto, IBP. Rio de Janeiro, 2002.

OLIVEIRA, J. A.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente em Laboratório e Campo na Cidade de Fortaleza-CE*. 17ª Reunião da Pavimentação Urbana (RPU). Porto Alegre, 2011.

OLIVEIRA, J. A. *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, 2013.

ONTARIO PROVINCIAL STANDARD SPECIFICATION (OPSS). *OPSS 336/2009 – Construction Specification for Microsurfacing*. Ontario, Estados Unidos, 2009.

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*. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 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 de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, 2010.

PEREIRA, S. L. O. *Avaliação de Tratamentos Superficiais de Rodovias Através de Análise de Laboratório*. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, 2010.

PEREIRA, S.L.O. *Avaliação dos Tratamentos Superficiais Simples, Duplo e Triplo de Rodovias através do Emprego de Diferentes Agregados da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, 2013

PEREIRA, C.A. *Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias dos Estados de Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife, 2010.

RABELO, A. N. *Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). 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 de Mestrado. UNICAMP. Campinas, 2005.

ROCHA, F. L. L. *Utilização do Agregado Siderúrgico (escória de aciaria) em Revestimento Asfáltico Tipo Tratamento Superficial*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, MG, 2011.

RODRIGUES, A. C. *Avaliação da Influência da Granulometria na Aderência Pneu-Pavimento*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

ROHDE, L. *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares do pavimento – estudo laboratorial*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 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 da Escória de Aciaria em Camadas de Pavimentos na Região Metropolitana de Fortaleza*. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, 2007.

SILVA, E.A.; MENDONÇA, R. L. *Brésil: laitier d'aciérie à tous les étages, laitiers Sidérurgiques*. n. 81, p.11-24, 2001.

SILVA, E. A.; MIRANDA, J. L. Y; FIGUEREIDO, G. W.; SILVA JUNIOR; E. A. *Micro Revestimento Asfáltico Com Polímero – SBS; Um Caso Na Es-440, Região Norte De Espírito Santo- Brasil*. XV Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto. Lisboa, 2009.

SILVA, R. G. O. *Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, 2010.

TAVARES, D. S.; MOTTA, L. M. G.; ODA, S.; RAMOS, F. R. *Utilização de Agregado Siderúrgico em SMA para Pavimentação Asfáltica*. XVI CILA, Rio de Janeiro, 2011.

TRICHÊS, G; LAZZARIN C.A.; BEZEM W.T. *Estudo sobre o aproveitamento do material fresado no revestimento de vias urbanas*. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo, 2000.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. *Reciclagem in Situ com Adição de Cimento*. XVI Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto. Rio de Janeiro, 2011.

ULHMAN, B. *Eco-Efficiency of Microsurfacing – proceedings*. AEMA-ARRA-ISSA Annual Meeting. Miami. Estados Unidos, 2010.

VALE, A. F.; SUZUKI, C. Y. *Desempenho do Microrrevestimento Asfáltico*. 35ª ABPv, Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2004.

VALE, A. F. *Estudo e Aplicação de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF)*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI-USP. São Paulo, 2003.

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