



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PAULO ROBERTO REIS LOIOLA

ESTUDO DE AGREGADOS E LIGANTES
ALTERNATIVOS PARA EMPREGO EM TRATAMENTOS
SUPERFICIAIS DE RODOVIAS

FORTALEZA
2009

PAULO ROBERTO REIS LOIOLA

**ESTUDO DE AGREGADOS E LIGANTES ALTERNATIVOS PARA
EMPREGO EM TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DE RODOVIAS**

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

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

FORTALEZA

2009

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

-
- L826e Loiola, Paulo Roberto Reis.
 Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamento superficiais de rodovias. /
Paulo Roberto Reis Loiola. – 2009.
 206 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Mestrado em Engenharia de
Transportes, Fortaleza, 2009.
 Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Transportes. 2. Revestimentos. 3. Escória. 4. Pavimentos. 5. Emulsões. I. Título.

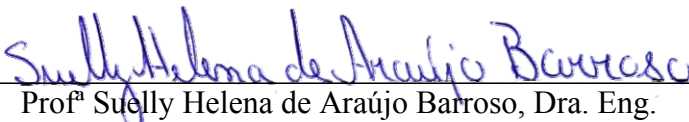
PAULO ROBERTO REIS LOIOLA

**ESTUDO DE AGREGADOS E LIGANTES ALTERNATIVOS PARA
EMPREGO EM TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DE RODOVIAS**

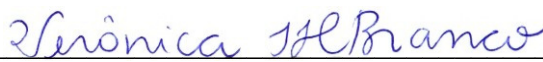
**Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de
Transportes. Área de concentração:
Infraestrutura de Transportes.**

Aprovada em: 15 / 12 / 2009.

BANCA EXAMINADORA


Prof^a Suely Helena de Araújo Barroso, Dra. Eng.^a

(Orientadora)



Prof^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

(Examinador Interno) – UFC



Prof^o Erinaldo Hilario Cavalcante, D Sc.

(Examinador Externo) – UFS

*“Nenhuma mente que se abre para uma nova
idéia voltará a ter o tamanho original”*

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

*Aos meus filhos Eric, Kyvia,
Paulo Filho e Igor, pelos quais me empenho em aprender,
para ensinar-lhes todo o saber que Deus me deu.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, por iluminar-me e guiar-me na vida em prol do crescimento, da bondade, da honestidade e integridade, através de sua presença e ensinamentos.

Agradeço, de coração, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. De maneira peculiar, expresso os meus mais sinceros agradecimentos.

À minha orientadora Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araujo Barroso, pela dedicação, paciência, atenção e excelente orientação, que me trouxe através dos seus critérios adotados de ensinamento o despertar para o caminho da pesquisa.

Aos professores Dr. Jorge Barbosa Soares, Dr. Ernesto Nobre, Dr. Sergio Benevides e Dra. Verônica Castelo Branco pelas sugestões, materiais didáticos fornecidos e apoio.

À Asfaltos Nordeste pela cessão dos materiais asfálticos e abertura do seu laboratório para realização dos ensaios de caracterização dos materiais asfálticos e os ensaios de Wet Track Abrasion Test (WTAT). Em especial ao químico Sérgio pela atenção e apoio.

Aos meus filhos Eric, Kyvia, Paulo Filho e Igor pelo respeito e atenção nos momentos de concentração e dedicação a este trabalho.

Ao colega e professor Franklin Chaves pelo fornecimento de trabalhos para pesquisa e sugestões dadas.

Ao colega de DER Geólogo Quirino Pontes pela compreensão e apoio em todos os momentos.

Aos colegas Heber Lacerda, Bruno Tiago, Henrique Nogueira e Sérgio pelas ajudas e

principalmente pela convivência nesse período de mestrado.

Ao colega Nobre Rabêlo pelo material didático fornecido e apoio neste trabalho.

À Ivone Aleixo e Annie Karine, por todo apoio e suporte concedido.

A todo o grupo de Solos do LMP, em especial aos amigos João Henrique, Marcondes Caldas, Lilian Gondim, Boris, André, Márcio, Synardo pelas ajudas dadas e contribuições técnicas.

Ao Eng^o Químico Cícero e a Química Flávia, pelo apoio dado no Laboratório de Química da UFC e pela execução dos ensaios realizados.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, Carlos Germano e Roberto, por todas as dicas e o auxílio na realização de alguns ensaios.

Ao Eng^o Fábio Henrique e os técnicos Arimateia e Geraldo pelo apoio dado na coleta e levantamentos feitos em campo.

RESUMO

O tratamento superficial pode ser definido como sendo um revestimento de baixo custo, constituído de uma camada esbelta de ligante betuminoso e agregado mineral. Ele tem sido usado em grande parte das rodovias cearenses de baixo e médio volume de tráfego, existindo poucos estudos para este tipo de revestimento no meio técnico e acadêmico. O principal objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho do agregado mineral e siderúrgico aplicados com emulsões convencionais e modificadas por polímero em revestimento do tipo tratamento superficial duplo. Para tanto, foram moldados em laboratório e em campo, sobre mantas asfálticas, revestimentos em tratamento superficial duplo, com aplicações de agregado mineral e siderúrgico com emulsão asfáltica RR-2C (melhorada por polímero e sem polímero). Para análise das taxas dos diferentes agregados e ligantes as mantas asfálticas foram submetidas ao ensaio de Wet Track Abrasion Test (WTAT). Os revestimentos fabricados também foram submetidos aos ensaios de Mancha de Areia e Pêndulo Britânico para análise das características das suas texturas. Os agregados foram submetidos aos ensaios de resistência à abrasão Los Angeles, forma e textura, densidade, absorção, granulometria, adesividade, durabilidade, análise química, expansibilidade, solubilização e lixiviação. As amostras de emulsão foram avaliadas através de análises laboratoriais, tais como: viscosidade *Saybolt-Furol*, sedimentação, carga da partícula, resíduo por evaporação, peneiração, pH, desemulsibilidade, penetração, recuperação elástica, ponto de amolecimento e ductilidade. Os agregados e emulsões usados apresentaram características adequadas para aplicação nos tratamentos superficiais. Conclui-se que os resultados apresentados nos ensaios de WTAT, Mancha de Areia e Pêndulo Britânico mostram a viabilidade técnica dos materiais para uso em tratamento superficial.

ABSTRACT

The superficial treatment can be defined as a coating of low cost, consisting of a slender layer of asphalt binder and mineral aggregate. It has been used in most of the roads in Ceará with low to medium traffic volume, existing few studies for this covering type in the technical middle and academic. The main objective of this study was to evaluate the performance of mineral aggregate and steel slag applied with conventional emulsions and modified by polymer coating for double surface treatment. For this purpose, were cast in the laboratory and field tests on asphalt blankets, coverings, double surface treatment, with applications of mineral aggregate and steel slag with asphalt emulsion RR-2C (modified with polymer and not modified polymer). For analysis of the taxes of the different aggregate and binder the asphalt blankets were submitted to the tested in the Wet Track Abrasion Test (WTAT). The coatings fabricate were also subjected to tests Spot Sand and Pendulum British to analyze the characteristics of their textures. The aggregates were subjected to tests of resistance to abrasion Los Angeles, shape and texture, density, absorption, particle size, adhesiveness, durability, chemical analysis, scalability, solubilization and leaching. Samples of emulsion were evaluated using laboratory tests such as viscosity, Saybolt Furol, sedimentation, particle charge, residue by evaporation, sifting, pH, breaking rate emulsifying, penetration, elastic recovery, softening point and ductility. Aggregates and emulsions used had characteristics suitable for application in surface treatment. The results for WTAT, Channel Sand and British Pendulum tests showed the technical feasibility of materials for use in surface treatment.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - PROBLEMA DE PESQUISA	4
1.3 - OBJETIVOS	5
1.3.1 - Objetivo Geral.....	5
1.3.2 - Objetivos Específicos.....	5
1.4 - METODOLOGIA.....	6
1.5 - ESTRUTURA DO TRABALHO	8

CAPÍTULO 2 9

CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS NA ÁREA DE PAVIMENTAÇÃO

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
2.2 - DEFINIÇÃO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	9
2.3 - FUNÇÃO DE UM TRATAMENTO SUPERFICIAL	11
2.4 - CLASSIFICAÇÃO DE UM TRATAMENTO SUPERFICIAL	13
2.5 - DENOMINAÇÕES DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	15
2.6 - MATERIAIS USADOS NOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	22
2.6.1 - Ligante	22
2.6.1.1 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	25
2.6.1.2 - Emulsão Asfáltica (EA).....	29
2.6.1.3 - Asfalto Diluído de Petróleo (ADP)	32
2.6.1.4 - Ligantes Modificados	33
2.6.2 - Agregado.....	35
2.6.2.1 - Isenção de pó.....	36
2.6.2.2 - Resistência ao choque e à abrasão.....	37
2.6.2.3 - Forma e textura satisfatória	37
2.6.2.4 - Granulometria adequada.....	38
2.6.2.5 - Boa adesividade com o ligante asfáltico	40

2.6.2.6 - Durabilidade.....	40
2.7 - MÉTODOS DE DOSAGEM.....	41
2.7.1 - Métodos de dosagem do agregado.....	41
2.7.2 - Métodos de dosagem do ligante.....	44
2.8 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	47
2.8.1 - Espargidor de ligante.....	48
2.8.2 - Distribuidor de agregado.....	49
2.8.3 - Compactador.....	49
2.9 - TÉCNICAS CONSTRUTIVAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	50
2.9.1 - Limpeza da superfície a ser tratada.....	50
2.9.2 - Aplicação do ligante.....	50
2.9.3 - Distribuição do agregado.....	51
2.9.4 - Compactação.....	52
2.10 - PRINCIPAIS DEFEITOS DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	53
2.11 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
CAPÍTULO 3.....	60
CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS E EMULSÕES MELHORADAS POR POLÍMEROS NA ÁREA DE PAVIMENTAÇÃO	
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	60
3.2 - A ESCÓRIA DE ACIARIA.....	60
3.2.1 - Processo de produção.....	60
3.2.2 - Produção de agregado siderúrgico no Estado do Ceará.....	65
3.2.3 - A expansibilidade das escórias de aciaria e sua estabilização.....	67
3.2.4 - Breve relato da aplicação da escória de aciaria como agregado em pavimentação.....	72
3.3 - OS ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMERO.....	74
3.4 - AS EMULSÕES ASFÁLTICAS CATIONICAS.....	79
3.4.1 - Processo de produção das emulsões.....	80
3.4.2 - Tipos de emulsões.....	83
3.4.3 - Emulsões melhoradas por polímero.....	85
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88

CAPÍTULO 4 89

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	89
4.2 - O PROGRAMA EXPERIMENTAL	89
4.2.1 - Considerações Gerais.....	89
4.2.2 - Materiais selecionados	91
4.2.2.1 - Agregado mineral	91
4.2.2.2 - Agregado siderúrgico.....	92
4.2.2.3 - Emulsão asfáltica RR-2C	93
4.2.2.4 - Emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero (RRP-2C) 93	
4.2.3 - Primeiro procedimento experimental - Ensaio realizado nos agregados e nas emulsões asfálticas.....	93
4.2.3.1 - Ensaio realizado no agregado mineral e agregado siderúrgico 93	
4.2.3.2 - Ensaio realizado na emulsão asfáltica RR-2C e emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero (RRP-2C).....	101
4.2.4 - Segundo procedimento experimental - confecção dos tratamentos superficiais duplos em laboratório	107
4.2.4.1 - Definição das taxas dos ligantes.....	108
4.2.4.2 - Definição das taxas dos agregados.....	108
4.2.4.3 - Procedimentos utilizados, em laboratório, na aplicação do tratamento superficial duplo nas mantas asfálticas.....	109
4.2.5 - Terceiro procedimento experimental – Experimentos realizados no revestimento aplicado no trecho BR 020 – Paramoti.....	113
4.2.5.1 - Taxas dos materiais utilizados no trecho: BR 020 – Paramoti 115	
4.2.5.2 - Procedimentos utilizados na aplicação do TSD nas mantas asfálticas, no trecho BR 020 – Paramoti	116
4.2.6 - Quarto procedimento experimental – Avaliação dos revestimentos submetidos ao simulador de tráfego	118
4.2.6.1 - Procedimentos utilizados na moldagem das placas com solo-brita.....	120
4.2.6.2 - Taxas dos materiais utilizados nos revestimentos submetidos ao simulador de tráfego	122
4.2.6.3 – Procedimentos utilizados no revestimento das placas	123
4.2.7 - Quinto procedimento experimental – Avaliação da microtextura e macrotextura	124
4.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	128

CAPÍTULO 5 129**APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	129
5.2 - RESULTADOS DO PRIMEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	130
5.2.1 - Resultados dos ensaios realizados nos agregados.....	130
5.2.1.1 - Ensaios de granulometria.....	130
5.2.1.2 - Ensaio de abrasão Los Angeles	133
5.2.1.3 - Ensaio de absorção e densidade	134
5.2.1.4 - Ensaio de índice de forma	135
5.2.1.5 - Ensaio de durabilidade.....	136
5.2.1.6 - Ensaio de adesividade.....	137
5.2.1.7 - Análise química quantitativa	138
5.2.1.8 - Análise química qualitativa (MEV)	139
5.2.1.9 - Difração de raio X.....	140
5.2.1.10 - Ensaio de expansão.....	141
5.2.1.11 - Ensaios de lixiviação e solubilização	142
5.2.2 - Resultados dos ensaios realizados nas emulsões	145
5.2.2.1 - Ensaios de caracterização das emulsões	145
5.3 - RESULTADOS DO SEGUNDO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL- CONFEÇÃO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DUPLOS EM LABORATÓRIO.....	146
5.3.1 - Resultados gerais dos ensaios de WTAT.....	147
5.3.2 - Avaliação das taxas de ligante	152
5.3.3 - Avaliação das taxas de agregado	153
5.3.4 - Avaliação dos desgastes.....	154
5.3.5 - Custo dos materiais utilizados nesta pesquisa	155
5.4 - RESULTADOS DO TERCEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – EXPERIMENTOS REALIZADOS NO TRECHO BR 020 - PARAMOTI.....	156
5.4.1 - Avaliação das taxas de ligante	160
5.4.2 - Avaliação das taxas de agregado	161
5.4.3 - Avaliação dos desgastes.....	161
5.4.4 - Rejeições obtidas em campo comparadas aos desgastes obtidos em laboratório nas mantas moldadas em campo.....	162
5.5 - RESULTADOS DO QUARTO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - ENSAIOS EXECUTADOS NAS PLACAS SUBMETIDAS AO SIMULADOR DE TRÁFEGO.....	164

5.5.1 - Ensaios mecânicos executados no solo-brita	164
5.5.1.1 - Ensaio de Compactação.....	165
5.5.1.2 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	165
5.5.1.3 - Ensaio do Módulo de Resiliência (MR).....	166
5.5.1.4 - Ensaio de densidade “In Situ”	169
5.5.2 - Ensaios submetidos ao revestimento no simulador de tráfego.	171
5.6 - RESULTADOS DO QUINTO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – AVALIAÇÃO DE MACROTEXTURA E MICROTEXTURA	171
5.6.1 - Ensaios de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia realizados no trecho: BR 020 – Paramoti.....	173
5.6.2 - Resultados dos ensaios de mancha de areia no revestimento, confeccionado em laboratório, com uso de brita e emulsão asfáltica RR – 2C usados no trecho	176
5.6.3 - Ensaios de mancha de areia realizados nos revestimentos aplicados em laboratório sobre mantas asfálticas e simulados em laboratório.....	178
5.6.3.1 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de escória de aciaria e emulsão asfáltica RRP – 2C	179
5.6.3.2 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de brita e emulsão asfáltica RRP – 2C	180
5.6.3.3 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de escória de aciaria e emulsão asfáltica RR – 2C.....	182
5.6.3.4 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de brita e emulsão asfáltica RR – 2C.....	183
5.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	184

CAPÍTULO 6

186

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	186
6.2 – PRINCIPAIS CONCLUSÕES	186
6.2.1 - Quanto à caracterização dos materiais pesquisados.....	186
6.2.2 - Quanto aos ensaios de WTAT realizados nas mantas asfálticas.....	188
6.2.3 - Quanto aos ensaios mecânicos e ao uso do simulador de laboratório ..	191
6.2.4 - Quanto aos ensaios de macrotextura e microtextura.....	192
6.3 – SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS	192

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....

194

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Figura ilustrativa dos três tipos de tratamento superficial.	13
Figura 2.2 - Foto de uma rodovia em TSS.....	14
Figura 2.3 - Foto de uma rodovia em TSD.....	14
Figura 2.4 - Aplicação de uma capa selante em serviço de conservação (ROMANELLI, 2009).	16
Figura 2.5 - Aplicação de uma lama asfáltica (ECOSUL S/A, 2009).	17
Figura 2.6 - Aplicação de um micro revestimento asfáltico (ECOSUL S/A, 2009). .	18
Figura 2.7 - Detalhes da textura de um macadame betuminoso.	18
Figura 2.8 - Imprimação em uma camada de base.	19
Figura 2.9 - Pintura de ligação (ECOSUL S/A, 2009).	21
Figura 2.10 - Localização e denominação das refinarias de petróleo brasileiras que produzem asfalto (BERNUCCI et al. 2007).	23
Figura 2.11 - Britagem do agregado.	41
Figura 2.12 - Ilustração do método da bandeja para determinação da taxa de agregado..	42
Figura 2.13 - Caixa dosadora para determinar a taxa de agregado (LARSEN, 1985)..	43
Figura 2.14 - Equipamentos básicos para execução do tratamento superficial.	48
Figura 2.15 - Seqüência de fotos ilustrativas das etapas construtivas de um TS.....	53
Figura 3.1 - Fluxo simplificado da produção de aço (IBS, 2008).	63
Figura 3.2 - Fluxograma da produção do aço pela Gerdau Cearense (CASTELO BRANCO, 2004).....	66
Figura 3.3 - Fornos utilizados no processo de beneficiamento do aço, Gerdau Cearense S.A. (CASTELO BRANCO, 2004).	67
Figura 3.4 - Pavimentos que ocorreu a expansão da escória (CASTELO BRANCO, 2004).	68
Figura 3.5 - Representação esquemática da estrutura de um elastômero termoplástico à temperatura ambiente (Shell, 2003 apud BERNUCCI et al., 2007). ...	78

Figura 3.6 - Representação esquemática de um elastômero termoplástico EVA (BERNUCCI et al., 2007).....	78
Figura 3.7 - Fábricas de emulsões asfálticas (ABEDA, 2001).....	81
Figura 3.8 - Esquema de um moinho coloidal (BERNUCCI et al., 2007).	81
Figura 3.9 - Esquema básico de produção de emulsão asfáltica catiônica (ABEDA, 2005)..	82
Figura 3.10 - Instalações de uma fábrica de emulsão (BERNUCCI et al., 2007).	83
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia de trabalho realizado.....	89
Figura 4.2 - Localização dos municípios de Itaitinga e Maracanau na RMF.	91
Figura 4.3 - Exploração da pedra, britagem e transporte do agregado.....	92
Figura 4.4 - Escória processada, britador e estoque para comercialização.....	92
Figura 4.5 - Fluxograma dos ensaios realizados para caracterização do agregado mineral.	94
Figura 4.6 - Fluxograma dos ensaios para caracterização do agregado siderúrgico...	95
Figura 4.7 - Equipamento “Los Angeles”.....	95
Figura 4.8 - Equipamentos usados para obtenção do índice de forma.	96
Figura 4.9 - Procedimentos para obtenção da absorção da água na brita e escória...	96
Figura 4.10 - Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.....	97
Figura 4.11 - Ensaio de adesividade da brita e escória.....	97
Figura 4.12 - Procedimentos para obtenção da expansão.....	98
Figura 4.13 - Equipamento utilizado na análise química quantitativa.....	99
Figura 4.14 - Microscópio de Varredura Eletrônico.....	100
Figura 4.15 - Equipamento utilizado para o recobrimento da amostra com ouro (metalização).....	100
Figura 4.16 - Difrátômetro de raios X - Planalytical (XPert Pro MPD).....	101
Figura 4.17 - Viscosímetro usado no ensaio.....	102
Figura 4.18 - Procedimentos usados no ensaio de sedimentação.	103
Figura 4.19 - Equipamento e procedimentos para o ensaio carga da partícula.	103
Figura 4.20 - Ensaio de resíduo por evaporação.....	104

Figura 4.21 - Procedimento para obtenção do pH das emulsões.....	105
Figura 4.22 - Penetrômetro.....	105
Figura 4.23 - Procedimentos do ensaio para determinação da recuperação elástica..	106
Figura 4.24 - Ensaio para determinar o ponto de amolecimento.....	107
Figura 4.25 - Esquema de aplicação dos tratamentos sobre as mantas asfálticas.....	107
Figura 4.26 - Procedimentos para obtenção das taxas dos agregados.....	109
Figura 4.27 - Equipamento utilizado no ensaio WTAT.....	110
Figura 4.28 - Procedimentos usados para execução do TSD.....	113
Figura 4.29 - Localização e textura do revestimento (TSD) do trecho BR 020 – Paramoti.....	114
Figura 4.30 - Equipamento utilizado na execução do TSD em Paramoti.....	116
Figura 4.31 - Procedimentos usados na aplicação e moldagem do revestimento.....	118
Figura 4.32 - Sequência de operações para simulação e avaliação das placas.....	120
Figura 4.33 - Procedimentos para a moldagem das placas e densidade “in situ”.....	121
Figura 4.34 - Método usado para definição das taxas dos agregados.....	122
Figura 4.35 - Procedimentos usados na execução do revestimento.....	124
Figura 4.36 - Pêndulo Britânico sendo operado no trecho.....	125
Figura 4.37 - Equipamentos utilizados no ensaio de Mancha de Areia.....	126
Figura 4.38 - Procedimentos do ensaio mancha de areia, em campo e laboratório....	127
Figura 5.1 - Curva granulométrica da brita da 1ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.....	131
Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita da 2ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.....	132
Figura 5.3 - Picos dos elementos existentes na escória de aciaria, obtidos com a utilização do MEV.....	139
Figura 5.4 - Fotos da escória de aciaria em várias escalas.....	140
Figura 5.5 - Difratoograma da escória utilizada.....	140
Figura 5.6 - Estocagem e início do processo de cura da escória.....	141

Figura 5.7 - Taxas dos ligantes aplicadas.	152
Figura 5.8 - Taxas dos agregados aplicadas.	153
Figura 5.9 - Desgastes sofridos pelos revestimentos submetidos ao ensaio WTAT.	154
Figura 5.10 - Gráfico dos custos dos revestimentos moldados sobre as mantas.	156
Figura 5.11 - Taxas do ligante aplicadas.	160
Figura 5.12 - Taxas do agregado aplicado.	161
Figura 5.13 - Desgastes sofridos pelos revestimentos submetidos ao ensaio WTAT.	162
Figura 5.14 - Média das rejeições em campo e desgastes em laboratório.	164
Figura 5.15 - Resultados do ensaio de compactação.	165
Figura 5.16 - Corpos de prova submersos para realização do ensaio de CBR.	166
Figura 5.17 - Resultado do ensaio de CBR.	166
Figura 5.18 - Prensa triaxial de carga repetida e computador do LMP/UFC.	167
Figura 5.19 - Resultados do ensaio de MR no solo-brita.	168
Figura 5.20 - Dados fornecidos pelo computador acoplado ao equipamento.	168
Figura 5.21 - Sequência de operações usadas no ensaio de densidade “in situ”.	170
Figura 5.22 - Gráfico da textura superficial (microtextura).	174
Figura 5.23 - Gráfico da textura superficial (macrotextura).	176
Figura 5.24 - Gráfico da textura superficial (macrotextura).	177
Figura 5.25 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da E+RRP-2C.	180
Figura 5.26 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da B+RRP-2C.	181
Figura 5.27 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da E+RR-2C.	182
Figura 5.28 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da B+RR-2C.	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Resumo das principais funções, aplicações e o que não se deve esperar dos tratamentos superficiais (MELO, 1978; LARSEN, 1985; FORTES, 1994).	12
Tabela 2.2 -	Especificações Brasileiras de Cimento Asfáltico de Petróleo (ANP, 2005 <i>apud</i> BERNUCCI <i>et al.</i> 2007).	26
Tabela 2.3 -	Limites de aquecimento do CAP.	28
Tabela 2.4 -	Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas (Conselho Nacional de Petróleo – CNP, 07/88) (ABEDA, 2001).	31
Tabela 2.5 -	Especificações brasileira de Asfalto Diluído, tipo cura média (ANP, 2007). (www.proasfalto.com.br).	33
Tabela 2.6 -	Especificação técnica para asfalto modificado por polímero (ANP) (DNER – EM 396/99) (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2007).	34
Tabela 2.7 -	Classe granulométrica para o TSS (DERT-ES-P-10/00,2000).	39
Tabela 2.8 -	Classe granulométrica para o TSD(DERT-ES-P-11/00,2000).	39
Tabela 2.9 -	Granulometrias especificadas pelo DNIT para os tratamentos superficiais. (DNER ES-310-97).	40
Tabela 2.10 -	Taxas do CAP em função da classe granulométrica (DERT-ES-P-11/00, 2000).	46
Tabela 2.11 -	Taxas das emulsões asfálticas em função da classe granulométrica (DERT-ES-P-11/00, 2000).	46
Tabela 2.12 -	Principais defeitos detectados nas rodovias do Ceará.	57
Tabela 3.1 -	Produção siderúrgica brasileira (IBS, 2008).	61
Tabela 3.2 -	Produção de aço bruto por processo (IBS, 2008).	62
Tabela 3.3 -	Produção de aço bruto da America Latina (IBS, 2008).	62
Tabela 3.4 -	Comparação das escórias produzidas por vários tipos de forno (FILEV, 2003).	64
Tabela 3.5 -	Campo de aplicação das escórias de diferentes origens (GEYER, 2001; CASTELO BRANCO, 2004).	73

Tabela 3.6 - Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto. (modificado de Shell, 2003 apud BERNUCCI et al., 2007).	77
Tabela 3.7 - Especificação asfalto polímero SBS (BERNUCCI et al. 2007).....	79
Tabela 3.8 - Especificações brasileiras de emulsões modificadas por polímero SBR (proposta do IBP para ANP em 2007, apud BERNUCCI et al., 2007)..	86
Tabela 3.9 - Especificações brasileiras de emulsões modificadas por polímero SBS (proposta do IBP para ANP em 2007 apud BERNUCCI et al., 2007). ..	87
Tabela 4.1 - Ensaio para a caracterização da emulsão asfáltica RR-2C e RRP-2C.	102
Tabela 4.2 - Taxas definidas pelo projeto e em campo.....	115
Tabela 4.3 - Classificação da microtextura com o pêndulo britânico (ABPv, 1999)..	125
Tabela 4.4 - Classificação da macrotextura, mancha de areia (ABPv, 1999).....	128
Tabela 5.1 - Granulometria da brita da 1ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.....	131
Tabela 5.2 - Granulometria da brita da 2ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.....	132
Tabela 5.3 - Graduação para ensaio Los Angeles (DNER – ME 035/98).	133
Tabela 5.4 - Resultados obtidos no ensaio Los Angeles para a brita e escória.....	134
Tabela 5.5 - Resultados dos ensaios de absorção e densidade da brita e escória.....	134
Tabela 5.6 - Resultado dos ensaios de durabilidade na brita.	137
Tabela 5.7 - Resultado dos ensaios de durabilidade na escória.	137
Tabela 5.8 - Análise química quantitativa da amostra de escória de aciaria.....	138
Tabela 5.9 - Resultado dos ensaios de lixiviação.....	143
Tabela 5.10 - Resultado dos ensaios de solubilização.	144
Tabela 5.11 - Resultados dos ensaios realizados nas emulsões.	145
Tabela 5.12 - Resultados dos ensaios de WTAT com emulsão RRP-2C e escória. ...	148
Tabela 5.13 - Resultados dos ensaios de WTAT com emulsão RRP-2C e brita.	149
Tabela 5.14 - Resultado dos ensaios de WTAT com emulsão RR 2C e escória.....	150
Tabela 5.15 - Resultado dos ensaios de WTAT com emulsão RR 2C brita.	151
Tabela 5.16 - Média dos resultados dos ensaios realizados nas mantas asfálticas.....	151

Tabela 5.17 - Composição de custos.....	155
Tabela 5.18 - Resultados dos ensaios de WTAT realizados com as amostras coletadas em campo.	157
Tabela 5.19 - Resultados dos ensaios dos revestimentos moldados em laboratório, com o uso dos mesmos materiais e taxas usados em campo.	158
Tabela 5.20 - Média dos resultados dos ensaios de campo e laboratório.....	159
Tabela 5.21 - Rejeições obtidas em campo e desgastes em laboratório.....	163
Tabela 5.22 - Resultados dos ensaios de densidade “in situ” em três placas.....	170
Tabela 5.23 - Resultado dos ensaios do Pêndulo Britânico e a classificação da microtextura no trecho BR 020 – Paramoti.	174
Tabela 5.24 - Resultados dos ensaios da mancha de areia e classificação da textura.	175
Tabela 5.25 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento, confeccionado em laboratório, com brita e emulsão RR-2C usados no trecho BR 020 – Paramoti.	177
Tabela 5.26 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com escória de aciaria e emulsão RRP-2C.	180
Tabela 5.27 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com brita e emulsão RRP-2C.....	181
Tabela 5.28 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com escória de aciaria e emulsão RR-2C.	182
Tabela 5.29 - Resultado do ensaio de mancha de areia no revestimento com brita e emulsão RR-2C.....	183

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHTO - (American Association of State Highway and Transportation)
- ABEDA - (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto)
- ABNT - (Associação Brasileira de Normas Técnicas)
- ABS - (Acrilonitrila-Isopreno-Estireno)
- AD - (Asfalto Diluído)
- AM - (Amostra)
- AN - (Asfalto Nordeste)
- ANP - (Agência Nacional de Petróleo)
- ASTM - (American Society for Testing and Materials)
- BGS - (Brita Graduada Simples)
- BGTC - (Brita Graduada Tratada com Cimento)
- BIO - (Biodiesel)
- BOF - (*Blast Oxygen Furnace*)
- B+RRP-2C - (Brita com Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida com Polímero)
- B+RR-2C - (Brita com Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida)
- CAP - (Cimento Asfáltico de Petróleo)
- CAP/BIO - (Cimento Asfáltico de Petróleo com Biodiesel)
- CBUQ - (Concreto Betuminoso Usinado Quente)
- CBR - (*California Bearing Ratio*)
- CNP - (Conselho Nacional de Petróleo)
- OM - (California Pavement Maintenance Company)
- CR - (Cura Rápida)
- CL - (Cura Lenta)
- CM - (Cura Média)
- CS - (Capa Selante)
- D - (Diâmetro do Círculo de Areia)
- DNER - (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)
- DNER-ES - (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Especificações de Serviços)
- DNER – ME - (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio)
- DNIT - (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes)

DER - (Departamento Estadual de Rodovias)
DER/CE - (Departamento de Edificações e Rodovias do Estado do Ceará)
DER/MG - (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais)
DER/SP - (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo)
DERT - (Departamento de Edificações Rodovias e Transportes)
DERT/CE-ES-P - (Departamento de Edificações Rodovias e Transportes do Estado do Ceará Especificações de Serviços de Pavimentação)
EA - (EmulsãoAsfáltica)
EAC - (EmulsãoAsfálticaCatiônica)
EAF - (FornoElétrico)
E+RR-2C - (Escória com Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida)
E+RRP-2C - (Escória com Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida com Polímero)
EVA - (Acetato de Vinila)
HS - (Altura Média de Mancha de Areia)
IA - (Instituto de Asfalto)
IBP - (Instituto Brasileiro de Petróleo)
IBS - (Instituto Brasileiro de Siderurgia)
ISC - (Índice de Suporte Califórnia)
LA - (Lama Asfáltica)
LA - (Abrasão Los Angeles)
LCC - (Líquido da Castanha de Caju)
LD - (Linz e Donawitz)
LDPE - (Polietileno de Baixa Densidade)
LMA - (Laboratório de Microscopia Avançada)
LMP - (Laboratório de Mecânica dos Pavimentos)
M - (Manta)
MB - (MacadameBetuminoso)
MB - (MétodosBrasileiros)
MML - (Mantas Moldadas no Laboratório)
MMT - (Mantas Moldadas no Trecho)
MR - (Módulo de Resiliência)
MRAF - (Micro Revestimento Asfáltico a Frio)

MVE - (Microscópico de Varredura Eletrônico)
NBR - (Norma Brasileira)
NCDOT's - (*North Carolina Department of Transportation's*)
OH - (*Open Heart*)
pH - (PotencialHidrogeniônico)
RB - (Relação de Britagem)
RCD - (Resíduo de Construção e Demolição)
RL - (RupturaLenta)
RL-1C - (Emulsão Catiônica de Ruptura Lenta)
RMF - (Região Metropolitana de Fortaleza)
RM - (RupturaMédia)
RM-1C - (Emulsão Catiônica de Ruptura Média)
RR - (RupturaRápida)
RR-2C - (Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida)
RRP-2C - (Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida modificada por Polímero)
SB - (Estireno-Butadieno)
SBR - (BorrachaEstireno-Butadieno)
SBS - (Estireno-Butadieno-Estireno)
SEBS - (Estirino-Etileno-Butadieno-Estireno)
SGP - (Sistema de Gerência de Pavimento)
SIS - (Estireno-Isopreno-Estireno)
TAP - (TratamentoAntipó)
TS - (Tratamento Superficial)
TSD - (Tratamento Superficial Duplo)
TSS - (Tratamento Superficial Simples)
TSP – (Tratamento Superficial por Penetração)
TST – (Tratamento Superficial Triplo)
UFC – (Universidade Federal do Ceará)
V - (Volume da Areia)
VPM - (Valor MédioPermitido)
VRD - (Valor de Resistência a Derrapagem)
WTAT - (*Wet Track Abrasion Test*)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento do Brasil e a importância do setor rodoviário, associados à limitação de recursos, fazem a Engenharia de Transportes deparar-se com o desafio de buscar soluções alternativas, através de pesquisas, com a finalidade de suprir a escassez de alguns materiais naturais, para uso em pavimentação rodoviária. Abre-se, conseqüentemente, um leque de opções aos profissionais da área para estudarem a substituição desses materiais por outros adequados, tornando-se imperativa a busca de novas alternativas.

O meio técnico brasileiro tem buscado essas soluções com a finalidade de levar aos municípios mais longínquos rodovias trafegáveis com um custo compatível com a economia local. O asfaltamento das rodovias é um dos meios de desenvolvimento das cidades, através das quais há melhorias do nível de qualidade de vida de uma população. O estado da pavimentação rodoviária é um forte indicador para medir-se o nível de desenvolvimento de uma nação.

Nos últimos anos, o governo do Estado do Ceará investiu na pavimentação de todos os acessos municipais e nas rodovias que dão escoamento à produção agrícola. Essas rodovias eram constituídas de revestimento primário, onde na época chuvosa formava-se lama e nas estações secas havia excesso de poeira. Em algumas dessas rodovias as soluções dadas por técnicos ligados ao setor rodoviário, para construção de base, por exemplo, foi a estabilização granulométrica dos solos (considerados inadequados) com brita e até mesmo solo com solo. Foram também utilizados em menor escala, cal, cimento e aditivos químicos em algumas estabilizações, revestidas com tratamento superficial. Essas soluções tiveram sua importância na viabilidade técnica e econômica da construção dessas rodovias, consideradas de baixo volume de tráfego.

Na pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego há necessidade do emprego de revestimentos mais delgados e econômicos. No Ceará, devido aos poucos recursos financeiros e um grande número de rodovias a serem implantadas, e/ou restauradas, o DER (Departamento Estadual de Rodovias) tem optado pelo uso do tratamento superficial como revestimento asfáltico em grande parte de suas estradas. A malha rodoviária do Ceará tem 53.325,40 km (DERT, 2006) de rodovias federais, estaduais e municipais, onde apenas 11% são pavimentadas. Os tratamentos superficiais foram aplicados em 63% dessas rodovias, sendo 54 % em TSD (Tratamento Superficial Duplo) e 9% em TSS (Tratamento Superficial Simples).

O uso do revestimento do tipo tratamento superficial vem adquirindo maior destaque dentro da política de construção de pavimentos asfálticos, por poder ser empregado praticamente em todas as categorias de tráfego, de intensidade leve até pesada e, também, para altas velocidades.

O tratamento superficial é um revestimento delgado que recebe diretamente a ação do tráfego e representa a mais simples e econômica camada de um pavimento flexível. Pode ser utilizado, tanto como primeiro revestimento sobre bases imprimadas, quanto como conservação de revestimentos antigos.

O grande interesse pelo emprego dos tratamentos superficiais, no estado do Ceará, se dá por ser uma capa econômica e pela otimização na aplicação dos recursos disponíveis. Tendo em vista a necessidade de manter-se um padrão de qualidade técnica e econômica, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas com a finalidade de investigar novas técnicas e materiais que possam ser usados em revestimentos de rodovias de baixo e médio volumes de tráfego, ou até mesmo, na manutenção de algumas.

Para GONTIJO e SANTANA (1985), “os tratamentos superficiais, embora usualmente julgados “menos técnicos”, em função de seu pouco acabamento, constituem na realidade uma das camadas do pavimento de maior eficácia e nobreza estrutural. Por outro lado, embora sua constituição possa denotar certa facilidade construtiva, trata-se na realidade de uma das operações rodoviárias de mais difícil execução, obra de arte que exige conhecimentos de engenharia, dedicação e precaução”.

O tratamento superficial é mais conhecido no meio técnico como um “revestimento artesanal”, embora haja necessidade de serem tomados cuidados durante a sua aplicação. Na escolha das taxas dos agregados e ligantes, por exemplo, encontram-se frequentemente dificuldades, pois as mesmas são definidas pelos projetistas através de métodos empíricos. Mesmo devido às dificuldades operacionais, os tratamentos superficiais apresentam baixo custo e têm dado ótimos subsídios ao governo por atender às principais exigências dos órgãos financiadores das construções das rodovias estaduais.

Desde o século XX, a partir da década de 1930, que os tratamentos superficiais vêm sendo executados com agregados minerais britados e materiais betuminosos do tipo: Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), Asfaltos Diluídos (AD) e Emulsões Asfálticas (EA). Na atualidade, diversos materiais alternativos tem sido pesquisados para aplicação na área de pavimentação.

A busca constante por novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos, levou as empresas fabricantes de asfalto a desenvolverem técnicas para o melhoramento das qualidades do CAP com adição de polímero. Os asfaltos melhorados com polímero, entre eles as emulsões asfálticas, têm sido aplicados em grande escala na pavimentação rodoviária. Nos tratamentos superficiais, a aplicação das emulsões asfálticas melhoradas com polímero e agregado mineral tem sido, ainda, uma prática incipiente.

Por sua vez, os agregados alternativos, principalmente os oriundos dos materiais inservíveis provenientes de vários ramos da atividade econômica, têm sido estudados para aplicação na área de pavimentação. O reaproveitamento desses materiais traz benefícios ao meio ambiente e apresenta redução de custos quando usados em regiões que os têm em abundância.

O uso desses materiais pode resultar em uma economia tanto na implantação de novas rodovias, quanto na conservação de pistas existentes, principalmente em locais onde se confirma ausência de agregados minerais e solos que atendam às especificações vigentes. Dentre os materiais já estudados, pode-se citar o Resíduo de Construção e

Demolição (RCD), cimento, cal, borracha de pneus inservíveis e escórias de aciaria. Neste trabalho, dar-se-á ênfase a possibilidade de emprego das escórias de aciaria como agregado alternativo para os tratamentos superficiais.

O emprego da escória de aciaria, de escória de alto-forno resfriada lentamente ou mistura dos dois tipos de escórias como agregado em concreto asfáltico a quente já é normalizado no Japão (JIS A 5015, 1992) desde 1979. Esta norma prevê a produção de escórias para pavimentação através de diferentes formas de estabilização e com diferentes granulometrias, para empregos em sub-base, base, asfaltos misturados a quente, etc. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) desenvolveu normalização específica para o emprego no Brasil (DNER EM 262/94). No Brasil é comum o seu emprego como cascalho para melhorar as condições de tráfego em vias não pavimentadas e até mesmo em estacionamentos.

O uso da escória de aciaria como agregado e da emulsão asfáltica melhorada com polímero como ligante betuminoso nos revestimentos asfálticos é uma técnica que pode trazer alguns benefícios técnicos, além de poder ser uma alternativa viável economicamente, tecnicamente, bem como ambientalmente sustentável.

Pela importância do tratamento superficial no estado do Ceará e com a finalidade de atender-se à política sócio-econômica e ambiental, buscou-se nesta dissertação estudar a viabilidade do uso de materiais inservíveis neste tipo de revestimento, para aplicação nas rodovias de baixo e médio volumes de tráfego. Espera-se que a aplicação simultânea da escória de aciaria com emulsão melhorada com polímero possa ser mais uma opção para uso nos revestimentos em tratamento superficial.

1.2 - PROBLEMA DE PESQUISA

A maioria dos revestimentos das rodovias do estado do Ceará é em tratamento superficial, representando cerca de 63% da malha pavimentada estadual. Não existem pesquisas, no estado, que avaliem a influência do tipo e taxa de agregados e ligantes na qualidade dos tratamentos superficiais.

Considera-se de vital importância analisar-se as vantagens e problemas referentes ao emprego de agregado siderúrgico e emulsões asfálticas na execução dos tratamentos superficiais, através de pesquisas e métodos de dosagens adequados que possam auxiliar nos trabalhos de pré-execução desse tipo de revestimento.

1.3 - OBJETIVOS

1.3.1 - Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho de agregados mineral e siderúrgico e de emulsões convencionais e modificadas por polímero em revestimento do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD).

Para que esse objetivo fosse atingido, tornou-se necessário o desenvolvimento de um programa experimental, atualmente inexistente na literatura brasileira, que realmente pudesse ser aplicado aos tratamentos superficiais.

1.3.2 - Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- desenvolver um procedimento para avaliação dos tratamentos superficiais em laboratório e no campo;
- verificar qual o melhor tipo e taxa de emulsão asfáltica a ser usada nos tratamentos superficiais, aplicadas com os agregados minerais e siderúrgicos;
- verificar qual o melhor tipo e taxa de agregado a ser empregado nos tratamentos superficiais, aplicados com emulsão asfáltica;
- desenvolver um processo em laboratório para avaliar as rejeições (agregado excedente oriundos de sobre-taxas aplicadas) sofridas pelos agregados após a execução dos tratamentos superficiais;

- identificar os principais defeitos que ocorrem nos revestimentos em tratamentos superficiais das rodovias do estado do Ceará;
- avaliar a microtextura e macrotextura de um revestimento do tipo tratamento superficial;
- adicionar conhecimentos sobre novas técnicas de execução dos tratamentos superficiais;
- adicionar conhecimentos sobre os modernos equipamentos atualmente existentes para execução dos tratamentos superficiais;
- provocar discussões sobre a importância da execução de um tratamento superficial de boa qualidade, com vistas à sua maior durabilidade e desempenho;
- despertar para o estudo das emulsões modificadas com polímero, com vistas a melhoria da qualidade dos tratamentos superficiais.

1.4 - METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, desenvolveu-se uma metodologia, em campo e laboratório, que permitiu avaliar melhor as taxas de agregados e ligantes utilizados na confecção do TSD.

Usaram-se, em laboratório, a Emulsão Asfáltica Catiônica RR-2C modificada por polímero e sem polímero, aplicadas com agregado mineral e escória de aciaria. No campo empregou-se a Emulsão Asfáltica RR-2C convencional e o agregado mineral.

Para sugerir-se taxas ideais, foram analisadas as taxas aplicadas em laboratório, as taxas aplicadas no campo e a rejeição do agregado em campo, buscando-se maior durabilidade, resistência, qualidade e redução de custos dos tratamentos superficiais.

O experimento desenvolvido para execução dessa dissertação de mestrado foi

dividido em cinco procedimentos e a metodologia proposta para atingir os objetivos do presente trabalho foi composta dos seguintes itens:

- realização de revisão bibliográfica;
- coleta das amostras de agregados, mineral e siderúrgico, utilizados na pesquisa;
- caracterização química e física do agregado siderúrgico, avaliando o seu potencial expansivo, sua porosidade, o tempo de cura, teor de impurezas, granulometria, desgaste por abrasão Los Angeles;
- execução dos ensaios ambientais (lixiviação e solubilização) no agregado siderúrgico;
- coleta e caracterização da emulsão asfáltica RR-2C modificada com polímero e da emulsão asfáltica RR-2C sem polímero;
- verificação da compatibilidade entre os agregados siderúrgicos e minerais com a emulsão asfáltica RR-2C modificada com polímero e a emulsão asfáltica RR-2C sem polímero, através do ensaio de adesividade;
- definição das taxas de agregado e emulsão;
- aplicação do TSD em laboratório sobre mantas asfálticas;
- estudos de campo por meio da coleta da aplicação do revestimento aplicado sobre mantas asfálticas no trecho BR 020 Paramoti;
- submissão das mantas asfálticas ao ensaio de desgaste Wet Track Abrasion Test (WTAT);
- moldagem de placas com solo-brita no LMP/UFC;

- obtenção das taxas de agregado e ligante utilizados nos revestimentos aplicados sobre o solo-brita;
- revestimento das placas de solo-brita com TSD para serem submetidas ao simulador de tráfego do LMP/UFC;
- avaliação da microtextura e macrotextura;
- apresentação dos resultados e análise dos ensaios obtidos através de planilhas e gráficos;
- redação da dissertação de mestrado.

1.5 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi dividida em 6 capítulos, sendo que no Capítulo 1 descreve-se a introdução do trabalho.

O Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica sobre os tratamentos superficiais, onde destaca-se a importância e sua caracterização através de definições, as principais funções, suas aplicações e o que não se deve esperar dos tratamentos superficiais. Apresenta-se ainda os materiais, métodos de dosagem, equipamentos utilizados, técnicas construtivas e seus principais defeitos com as prováveis causas de sua evolução e correções. No Capítulo 3, apresenta-se um breve relato sobre o uso de resíduos das usinas siderúrgicas e emulsões asfálticas.

No Capítulo 4 são descritos os materiais e os métodos empregados para execução desta dissertação. No Capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos dos experimentos realizados. No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões a respeito das atividades teóricas e experimentais realizadas no laboratório, assim como sugestões e recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS NA ÁREA DE PAVIMENTAÇÃO

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Estado do Ceará, assim como em outras localidades, o uso de tratamento superficial na pavimentação asfáltica tem sido uma realidade crescente. Isso se dá pela praticidade de sua execução, por ele ter uma boa resistência e flexibilidade e, principalmente, por ser um revestimento de baixo custo. Em alguns países usa-se o tratamento superficial como revestimento, já em outros os tratamentos são usados para selar as superfícies trincadas e até proteger o revestimento existente contra o envelhecimento por oxidação. Destaca-se, portanto, a grande importância de conhecer-se melhor o revestimento do tipo tratamento superficial.

Este capítulo tem o propósito de definir e classificar os tipos de tratamentos superficiais mais usados, os materiais e métodos aplicados nas técnicas construtivas, os defeitos mais frequentes encontrados nos tratamentos e a importância desse tipo de revestimento para a pavimentação.

2.2 - DEFINIÇÃO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

O tratamento superficial consiste no espalhamento de material betuminoso e agregado mineral sobre uma base estabilizada com ou sem mistura, no qual o agregado é colocado uniformemente sobre o material asfáltico, constituindo uma camada esbelta com uma espessura que varia em função do diâmetro do agregado e do tipo de tratamento superficial. O tratamento superficial é submetido à operação de compressão e acabamento. Apresenta uma alta resistência ao desgaste e flexibilidade, proporcionando uma condição satisfatória para acompanhar as deformações do pavimento.

Para MELO e SANTANA (1970), “o tratamento superficial representa a mais simples e econômica camada de desgaste de um pavimento flexível. Pode ser utilizado sobre uma base imprimada, como primeiro revestimento ou sobre um revestimento antigo que se deseje rejuvenescer, a fim de diminuir sua permeabilidade ou melhorar sua textura”.

LARSEN (1985) define tratamento superficial por penetração como sendo “o revestimento flexível de pequena espessura, executado por espalhamento sucessivo de ligante betuminoso e agregado, em operação simples ou múltipla”. LARSEN (1985), afirma ainda que o tratamento superficial, corretamente projetado e executado, é uma capa econômica, de baixo consumo de matérias-primas e energia, de execução rápida, prestando-se a uma vasta gama de condições de uso, desde o tráfego leve em rodovias secundárias até o tráfego pesado e de alta velocidade.

Em seu Manual Básico de Emulsões Asfálticas, a ABEDA (2001) ressalta que o Tratamento Superficial por Penetração (TSP) é um revestimento flexível de pequena espessura, geralmente entre 0,5 a 2,5 cm. O TSP é um dos métodos mais antigos e econômicos de se fazer revestimento asfáltico para baixo volume de tráfego em vias urbanas e/ou secundárias, sobre bases granulares. O TSP recupera superfícies de rolamento de pavimentos que estejam degradadas superficialmente e que ainda se encontram em boas condições estruturais. ABEDA (2001) afirma ainda que com a introdução de ligantes modificados por polímeros, a aplicação do TSP estendeu-se às rodovias de médio volume de tráfego.

O DNIT (2006), em seu manual de pavimentação, define os revestimentos betuminosos por penetração invertida, como sendo “os revestimentos executados através de uma ou mais aplicações de materiais betuminosos, seguida(s) de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas. Conforme o número de camadas, tem-se intitulados tratamento superficial simples, duplo ou triplo.” Sua espessura é aproximadamente igual a maior dimensão dos fragmentos pétreos.

PINTO (2002) define o tratamento superficial como sendo “a mais singela e

econômica camada de desgaste de um pavimento flexível. Pode ser projetado para constituir a camada de revestimento de um pavimento novo, executado sobre camada de base imprimada ou como recapeamento de revestimento antigo. São capas de rolamento delgadas em que o agregado e o material betuminoso são espalhados sobre a superfície a ser revestida. Quando o agregado é distribuído uniformemente sobre o material betuminoso, aplicado previamente sobre a superfície a revestir, ele recebe a denominação de revestimento por penetração invertida. Caso contrário, de revestimento por penetração direta. No âmbito federal foi consagrado o termo penetração invertida considerando o modo pelo qual o ligante penetra no agregado, ou seja, de baixo para cima.”

Portanto, o tratamento superficial é um revestimento de superfície sem função estrutural, mais durável e funcional, que serve, também, como uma opção de manutenção de rodovias. O tratamento superficial é econômico, quando construído corretamente, e consiste de camada(s) formada(s) pela aplicação de um ligante asfáltico e agregado.

2.3 - FUNÇÃO DE UM TRATAMENTO SUPERFICIAL

A função primordial do tratamento superficial é a de servir como revestimento das estradas. Ele é capaz de proporcionar o desenvolvimento mais suave e seguro dos veículos, livrando-os da poeira, e ao mesmo tempo, de proteger a estrutura subjacente da ação deletéria das águas de infiltração.

O tratamento superficial, quando usado na manutenção de pavimento, tem como função selar a superfície trincada do pavimento existente contra água e ar, melhorar a qualidade da pista de rolamento e proteger a superfície contra o envelhecimento por oxidação. Além disso, o tratamento superficial restaura a superfície desgastada, mantém a superfície resistente ao deslizamento e melhora a visibilidade noturna pelas demarcações da pista. Esse tipo de tratamento superficial, usado na manutenção, compõe-se de uma fina camada de ligante e agregado com uma espessura que varia de 2 mm a 5 mm.

A Tabela 2.1, mostra um resumo das principais funções, aplicações e o que não se deve esperar dos tratamentos superficiais. Destaque-se que essa tabela foi elaborada mediante leitura de algumas referências bibliográficas sobre o assunto (MELO, 1978; LARSEN, 1985; FORTES, 1994).

Tabela 2.1 - Resumo das principais funções, aplicações e o que não se deve esperar dos tratamentos superficiais (MELO, 1978; LARSEN, 1985; FORTES, 1994).

Principais funções dos tratamentos superficiais
Proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, de elevada flexibilidade, porém de alta resistência contra desgaste
Impermeabilizar e rejuvenescer revestimentos fissurados
Impermeabilizar e proteger a infraestrutura do pavimento
Melhorar a resistência ao deslizamento, promovendo textura antiderrapante
Aumentar a resistência ao desgaste e a flexibilidade do revestimento
Proporcionar uma condição satisfatória para acompanhar as deformações relativamente grande da infraestrutura (evitar trinca por fadiga) do pavimento
Minimizar a reflexão, selando as trincas de bases e sub-bases cimentadas para o revestimento denso a ser construído
Aplicações dos tratamentos superficiais
Constituir a camada de rolamento de pavimentos novos ou reabilitados, sujeito aos tráfegos leve, médio ou pesado
Em estradas de terra ou revestimentos primários, para evitar a propagação de poeira (tratamento antipó)
Revestimento de acostamento
Manutenção de revestimentos asfálticos com superfícies desgastadas e porosas
Selagem de revestimentos asfálticos abertos, contra o envelhecimento por oxidação, água e ar
Selagem para cura de solo-cimento/solo-cal (aumentar aderência entre base e capa)
Proteção provisória de subleitos ou sub-base
Não se deve esperar do tratamento superficial
Devido à sua pequena espessura, um aumento substancialmente a resistência estrutural do pavimento
Corrigir irregularidades (longitudinais ou transversais) da pista.
Uma difícil execução, apesar da complexidade e controles no campo que se deve ter em sua execução. É conhecido como um revestimento meramente artesanal

O tratamento superficial, por sua capacidade de absorver deflexões elevadas sem fissurar, é de modo geral, o preferido como primeiro revestimento, mesmo em rodovias sujeitas a tráfego pesado. Neste caso, a execução de um tratamento superficial não tem, evidentemente, o caráter de revestimento definitivo, mas garante que ao ser executado dois, três ou quatro anos depois, as pequenas deformações já terão acontecido, havendo assim condições favoráveis para o bom funcionamento do revestimento definitivo, que é em geral, uma mistura asfáltica mais rígida e de custo mais elevado (MELO, 1978).

2.4 - CLASSIFICAÇÃO DE UM TRATAMENTO SUPERFICIAL

Para classificar e definir os diversos tipos de tratamentos superficiais, deve-se considerar o que eles têm em comum, que são: a modalidade de aplicação dos materiais, que é por espalhamento, e o envolvimento do ligante, que é pela sua penetração. As aplicações do agregado e do ligante, se individual ou combinadas, classificam os tratamentos em: Tratamento Superficial Simples (TSS), Tratamento Superficial Duplo (TSD) e Tratamento Superficial Triplo (TST). A Figura 2.1 mostra uma ilustração dos três tipos de tratamentos superficiais.

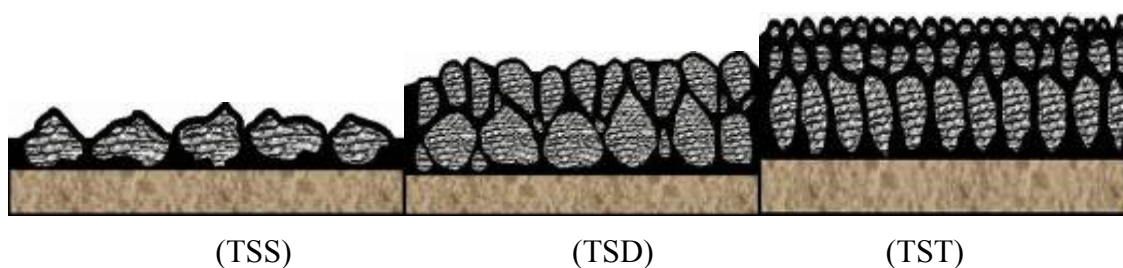


Figura 2.1 - Figura ilustrativa dos três tipos de tratamento superficial.

O TSS é a camada de revestimento do pavimento constituída por apenas uma aplicação de ligante betuminoso, coberta por uma camada de agregado mineral. Inicia-se pela aplicação do ligante que será coberto logo em seguida por uma única camada de agregado. A incorporação do ligante asfáltico é feita por penetração invertida, podendo ou não ser complementada com uma penetração direta. (DERT, 2000). Na Figura 2.2 ilustra-se um TSS executado na CE 377 (Rodovia do Melão) em 2001.



Figura 2.2 - Foto de uma rodovia em TSS.

O TSD é a camada de revestimento do pavimento constituída por duas aplicações, sucessivas e alternadas, de ligante betuminoso cobertas cada uma por camada de agregado mineral. Para o DERT (2000), TSD é o revestimento asfáltico constituído essencialmente pela execução sucessiva de dois TSS superpostos, sendo a incorporação do ligante asfáltico feita por penetração invertida (em sua maior porção) e por penetração direta (em sua menor porção). Na Figura 2.3 ilustra um TSD executado na CE 085 (Estruturante) em 1997.



Figura 2.3 - Foto de uma rodovia em TSD.

O TST é a camada de revestimento do pavimento constituída por três aplicações, sucessivas e alternadas, de ligante betuminoso cobertas cada uma por camada de agregado mineral e submetidas à compressão. Portanto, composto de três TSS superpostos, sendo a incorporação do ligante asfáltico feita por penetração invertida e por penetração direta.

2.5 - DENOMINAÇÕES DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Várias são as denominações dadas ao tratamento superficial em diversos países. As aplicações do ligante betuminoso em superfícies tratadas ou em revestimentos existentes, associadas à interação ligante-agregado, que tem uma espessura variando de 2 mm a 5 mm, são consideradas por alguns autores como sendo da família dos tratamentos superficiais. Os mais conhecidos são: Capa Selante (CS), Lama Asfáltica (LA), Tratamento Antipó (TAP), Micro Revestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e Macadame Betuminoso (MB).

Nos Estados Unidos e no Canadá o tratamento superficial é conhecido como: *chipseal*, *sealcoat*, *betuminoussurfacetreatment*. Segundo LEE (2007), na Austrália o tratamento superficial recebe uma denominação de *sprayedseal* e na Inglaterra de *surfacedressing*. O termo oficial usado nas especificações do *North Carolina Department of Transportation's* (NCDOT's) é *AsphaltSurfaceTreatment (AST)*. Na África do Sul é conhecido como *surfacingseals*. Na França os tratamentos superficiais são chamados de *enduitssuperficiels*.

A Capa Selante (CS) (*Seal Coat*) é um tratamento superficial simples que tem como finalidade selar revestimentos asfálticos com pequenas fissuras, com ou sem agregado miúdo, aplicado diretamente sobre a superfície do pavimento asfáltico, prevenindo-o contra a oxidação do ligante, causada pela exposição ao sol e ar, e a penetração de água. A CS reduz a perda do agregado, protege o revestimento contra os efeitos prejudiciais da água, impermeabiliza a superfície do pavimento e melhora a textura superficial. É composto de asfalto emulsificado, água e material de enchimento (*filler*). Quando não usada cobertura de agregado miúdo, usa-se o termo “pintura de impermeabilização” ou *Fog Seal* (BERNUCCI *et al.* 2007). A Figura 2.4 ilustra uma aplicação de CS em um serviço de conservação periódica.



Figura 2.4 - Aplicação de uma capa selante em serviço de conservação (ROMANELLI, 2009).

O manual do *Texas Department of Transportation* define *Seal Coats*, também conhecido como *Chip Seal*, como sendo uma aplicação de camada de ligante asfáltico coberta por uma camada de agregado, aplicadas a uma superfície de pavimento existente. É um revestimento simples, relativamente barato e altamente eficiente, quando os cuidados adequados no planejamento e na execução forem tomados.

A Lama Asfáltica (LA) (*Slurry Seal*) consiste na mistura, em consistência fluida, de emulsão asfáltica com características adequadas, agregado miúdo, material de enchimento (*filler*) e água. Portanto, uma capa selante por argamassa pré-misturada, com espessura acabada de 2 a 5 mm. É aplicada com equipamento especial em espessura reduzida. Sua finalidade é impermeabilizar a superfície de revestimentos antigos, selando as fissuras e melhorando sua superfície. O principal campo de aplicação é na manutenção preventiva de pavimentos asfálticos ou de cimento portland (ABEDA, 2001). A LA pode ser ainda aplicada como revestimento final sobre base estabilizada granulometricamente com mistura ou sem mistura e sobre tratamentos superficiais por penetração envelhecidos. A Figura 2.5 mostra uma aplicação de LA.



Figura 2.5 - Aplicação de uma lama asfáltica (ECOSUL S/A, 2009).

Segundo *CaliforniaPavementMaintenanceCompany* (CPM), *Slurry Seal* é uma mistura de asfalto emulsificado, agregado, água e aditivo (sulfato de alumínio, cimento Portland, cal, látex ou carbono preto). Esses aditivos serão usados dependendo de muitos fatores, inclusive local, condição de superfície e o tipo de superfície. Todos estes fatores devem ser considerados no projeto da mistura em laboratório.

O Tratamento Superficial Primário/Tratamento Antipó/Tratamento contra Pó (TAP) (*DustPalliative*) consiste na aplicação de ligante betuminoso de baixa viscosidade, com ou sem cobertura de agregado mineral, sobre uma superfície não revestida com o objetivo de evitar a propagação da poeira das estradas de terra ou revestimentos primários. O TAP é uma alternativa técnica paliativa de fácil aplicação e de baixo custo que só deve ser usada em estradas de baixo volume de tráfego.

Micro Revestimento Asfáltico a Frio (MRAF) (*Micro-Surfacing*) é definido pela ABEDA (2001) como sendo “uma mistura, à frio, de emulsão modificada por polímeros com agregado mineral, material de enchimento (*filler*), água, aditivos químicos para controle da velocidade de ruptura da emulsão, e dependendo do projeto, aditivos sólidos (fibras de reforço) para melhoria das propriedades mecânicas de flexibilidade do revestimento”. O MRAF é uma mistura de consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada. É empregada como camada selante, impermeabilizante e antiderrapante (PINTO, 2002). Na Figura 2.6 mostra-se uma ilustração da aplicação de um micro revestimento asfáltico.



Figura 2.6 - Aplicação de um micro revestimento asfáltico (ECOSUL S/A, 2009).

O Macadame Betuminoso (MB) é o revestimento típico por “penetração direta” que consiste no espalhamento do agregado especificado, nivelamento e compactação. Em seguida é espalhado o material betuminoso que penetra nos vazios do agregado. Tem processo construtivo similar ao TSD, com espessuras variadas e bem maiores, em função do número de camadas e das faixas granulométrica correspondentes (DNIT, 2006). Todas as etapas construtivas são executadas na própria pista e são: aplicações sucessivas (geralmente duas) de agregado e ligante, com espessura acabada maior que 20 mm. É usado freqüentemente como camada de base ou “binder”, em espessura maiores que 5 cm. Quando usado como base recebe o nome de “base negra”. A Figura 2.7 ilustra a textura de um macadame betuminoso.



Figura 2.7 - Detalhes da textura de um macadame betuminoso.

Alguns pesquisadores consideram a imprimação (*Prime Coat*) e a Pintura de Ligação (*TackCoat*) como revestimentos da família dos tratamentos superficiais. A imprimação é uma aplicação de ligante betuminoso sobre a superfície de uma base concluída, antes da execução de qualquer revestimento asfáltico. Tem como finalidade impermeabilizar e dar aderência entre a base e o revestimento. “A imprimação betuminosa pode ser definida como a aplicação de uma camada de material asfáltico sobre uma base granular, com a finalidade de melhorar suas qualidades tecnológicas” (RABÊLO, 2006). A taxa de aplicação do Asfalto Diluído (AD) varia com o tipo de AD e o tipo de solo, devendo ser determinada no início da execução do serviço, estando geralmente na faixa de 0,8 a 1,5 L/m² (DERT-ES-P-08/00,2000). A Figura 2.8 ilustra uma imprimação aplicada em uma camada de base.



Figura 2.8 - Imprimação em uma camada de base.

THE ASPHALT INSTITUTE (2001) define *Prime Coat* como sendo uma aplicação de *cutback* (asfalto diluído) ou emulsões asfálticas na superfície do subleito, quando tratar-se de fundações para aplicação de estruturas, ou na camada de base acabada. O *Prime Coat* tem como finalidade principal preencher os vazios da superfície, protegê-la contra as intempéries, estabilizar os finos minerais, endurecê-la e impermeabilizá-la, obstruindo a capilaridade e promovendo a sua adesão com a mistura asfáltica subsequente.

Os asfaltos diluídos do tipo Cura Rápida (CR), cujo solvente é a gasolina ou a nafta, e Cura Média (CM), cujo solvente é o querosene, são os mais usados no serviço de imprimação. Os asfaltos diluídos também podem ser usados em tratamento

superficial. Devido aos problemas de segurança e meio ambiente (emissões de hidrocarbonetos orgânicos voláteis – VOCS), os AD apresentam restrições para uso em serviço de imprimação (BERNUCCI *et al.* 2007). Essas restrições despertaram à atenção de administradores e pesquisadores, principalmente nos Estados Unidos e na Europa, para a busca de materiais alternativos menos poluentes ao meio ambiente. Uma das alternativas estudadas foi a substituição dos asfaltos diluídos pelas emulsões asfálticas, que se por um lado, não deixam de conter compostos voláteis, pelo menos os possuem em pouca ou nenhuma quantidade, segundo afirmações de CROSS e SHRESTHA (2004).

No LMP/UFC iniciou-se desde 2005 estudos utilizando solventes alternativos para testes de imprimação. RABELO (2006) utilizou Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) misturado ao CAP nos ensaios de imprimação, com o intuito de testar a sua interação com seis solos estudados. Os resultados mostraram que a mistura CAP/LCC tem penetrações satisfatórias para materiais mais arenosos.

VASCONCELOS (2009) também pesquisou a aplicação de biodiesel como solvente alternativo utilizado na diluição do CAP para testes de imprimação em laboratório. Foi produzida uma mistura de CAP/BIO (60% de CAP e 40% de biodiesel) que foi testada em três taxas distintas (0,8 L/m², 1,0 L/m² e 1,2 L/m²). A penetração da imprimação da mistura CAP/BIO foi também comparada com a do CM-30, obtendo-se valores muito próximos. Os resultados experimentais desse trabalho mostraram que a mistura CAP/BIO tem potencial técnico de ser aplicado como alternativa no processo de imprimação.

A Pintura de Ligação consiste na aplicação de ligante betuminoso sobre a superfície de uma base ou de um revestimento antigo a revestir ou recapear (PINTO, 2002). Tem como finalidade promover uma aderência entre o revestimento novo ou velho e a camada subjacente. Usa-se sobre bases imprimadas, base de solo-cimento, base de solo cal (quando o solo usado apresentar características impermeáveis), paralelepípedos, entre outras em que não é possível haver penetração de qualquer tipo de ligante asfáltico. Para o DER/CE (DERT-ES-P-09/00), esse é o serviço executado sobre a superfície de uma Camada Granular cuja imprimação já está curada; de uma

camada coesiva não asfáltica (solo-cimento, concreto rolado, etc) ou de uma mistura asfáltica (concreto asfáltico, pré-misturados, etc.) nova ou antiga, objetivando conferir uma boa aderência entre uma dessas camadas e uma camada de mistura asfáltica subjacente. Na Figura 2.9 mostra-se uma pintura de ligação em execução.



Figura 2.9 - Pintura de ligação (ECOSUL S/A, 2009).

Conforme DERT (2000), nota-se que a imprimação deve penetrar na camada e pode servir de pintura de ligação, enquanto esta não deve penetrar na camada e não pode servir de imprimação. Portanto, entende-se que a imprimação e a pintura de ligação são duas operações básicas de grande importância para o desempenho e durabilidade dos pavimentos asfálticos. Entretanto, prefere-se considerá-las como finas camadas de ligação que ajudam na união de camadas subsequentes do pavimento asfáltico e não necessariamente como sendo um revestimento do tipo tratamento superficial. Para LARSEN (1985), elas são apenas tratamentos construtivos, executados somente como complemento às camadas betuminosas superiores do pavimento.

Tackcoat é uma fina camada de ligante betuminoso, emulsão ou *cutback* (asfaltos diluídos) aplicada como camada de ligação entre misturas asfálticas a quente e a camada do pavimento (Tx DOT, 2001). Ligação adequada entre camada construída, e especialmente entre a superfície e uma nova camada, para que a estrutura do pavimento completada se comporte como uma única unidade e promova resistência adequada. Se camadas adjacentes não aderem umas as outras, elas se comportarão essencialmente como múltiplas camadas finas e independentes. Ligação inadequada entre camadas pode resultar em trinca longitudinal, trinca por fadiga, buraco, e outros defeitos, como afundamento em trilha de roda, que reduz a vida do pavimento.

2.6 - MATERIAIS USADOS NOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os principais materiais utilizados na execução dos tratamentos superficiais são o ligante betuminoso e o agregado mineral. Ambos com suas funções e particularidades, têm sua importância quanto à escolha do tipo, que se dá em função das condições climáticas, tráfego, textura e até pela cor da pista.

2.6.1 - Ligante

“O asfalto é um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem. Escavações arqueológicas revelam o seu emprego em épocas anteriores à era atual. Assim, na Mesopotâmia, o asfalto era usado como aglutinante em trabalhos de alvenaria e construção de estradas. Os reservatórios de água e as salas de banhos eram impermeabilizados com asfalto. Citações bíblicas revelam o seu emprego como impermeabilizante na Arca de Noé. Os egípcios utilizaram o asfalto em trabalho de mumificação. A história nos mostra que o asfalto tende a se perpetuar ao longo dos séculos” (IBP, 1978).

Ainda para o IBP (1978) “as pavimentações pioneiras datam de 1802 na França, 1838 nos Estados Unidos (Filadélfia) e 1869 na Inglaterra, sendo executadas com asfaltos naturais provenientes de jazidas. A partir de 1909 iniciou-se o emprego de asfalto derivado de petróleo, que pelas suas características de economia e pureza, em relação aos asfaltos naturais, constitui-se atualmente a principal fonte de suprimento”. A Figura 2.10 mostra a localização e denominação das refinarias de petróleo brasileiras que produzem asfalto.



Figura 2.10 - Localização e denominação das refinarias de petróleo brasileiras que produzem asfalto (BERNUCCI et al. 2007).

SANTANA e GONTIJO (1985) afirmam que as primeiras pavimentações rodoviárias no Brasil foram feitas em pavimento de concreto. A primeira rodovia a receber pavimentação asfáltica foi a chamada União de Indústria, de Petrópolis para Juiz de Fora, em 1938, construída com revestimento em macadame betuminoso, sendo o espalhamento do ligante feito manualmente com pistola. Esses autores afirmam, ainda, que o primeiro pavimento dimensionado pelo método do CBR (Califórnia Bearing Ratio) foi acompanhado e supervisionado pelo Eng^o americano William Haynes Mills (Mr. Mills), no estado do Espírito Santo, no trecho Vitória – Cachoeiro do Itapemirim. Esse pavimento era constituído de uma base estabilizada granulometricamente e um revestimento em TSD.

Percebe-se, assim, que o tratamento superficial como alternativa de revestimento é uma técnica bem antiga no setor rodoviário. Observa-se que desde a chegada do novo

século ocorreram diversas inovações na indústria da pavimentação, dentre elas pode-se citar o uso dos ligantes modificados, cuja aplicação ainda é incipiente na construção dos tratamentos superficiais do estado do Ceará.

Tendo-se em vista a importância dos ligantes betuminosos para uso nos tratamentos superficiais, pode-se afirmar que os mesmos têm como principais funções fixar o agregado e impermeabilizar o pavimento, desde a sua aplicação até o fim da vida útil do revestimento. Para fixar o agregado faz-se necessário que o ligante apresente uma elevada viscosidade e uma boa adesividade. Para impermeabilizar o pavimento, sua aplicação deve ser feita de forma uniforme sobre a superfície a ser revestida.

Alguns fatores são levados em conta para a escolha do ligante a ser usado nos tratamentos superficiais, tais como: condições climáticas no local da aplicação, tráfego, características e tipo do agregado, o estado da superfície na qual será aplicado, custo no local da obra de cada tipo de ligante e equipamento disponível para a realização dos serviços.

Para LARSEN (1985), quanto mais quente o clima e mais intenso e pesado o tráfego, tanto mais viscoso deve ser o ligante (ligante residual, no caso de emulsão) à temperatura média ambiente. MELO (1978) afirma que o ligante deve ser tanto mais viscoso quanto mais graúdo for o agregado, quanto mais intenso for o tráfego e quando mais quente for o clima. Para o INSTITUTO DE ASFALTO (IA) (1989) deve-se levar em conta, também, a temperatura da superfície na qual vai ser aplicado o tratamento superficial, umidade e vento.

Várias outras considerações podem influenciar na escolha do ligante mais adequado. Sua viscosidade não deve ser insuficiente nem excessiva, a ponto de escorrer para as bordas ou provocar um espalhamento irregular sobre a superfície do pavimento.

Para o IA (1989) o tipo e grau corretos do asfalto no tratamento superficial devem: a) quando da aplicação, ser bastante fluido para aspergir e cobrir a superfície uniformemente, entretanto, suficientemente viscoso para se manter como camada uniforme sem empoçar nas depressões ou, correr da parte mais elevada da declividade

transversal para baixo; b) após a aplicação, manter a consistência requerida para molhar o agregado aplicado; c) curar e desenvolver adesões rapidamente; d) depois da rolagem e cura, manter o agregado firmemente na superfície da estrada para evitar desalojamento pelo tráfego; e e) quando aplicado na exata proporção, não exsudar ou ser arrancado com as mudanças das condições atmosféricas.

Evidentemente, os aspectos mais importantes a serem considerados na escolha do ligante são os que estão ligados à qualidade e à durabilidade do revestimento. Os ligantes asfálticos mais usados na execução dos tratamentos superficiais são:

- a) Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP);
- b) Emulsão Asfáltica (EA);
- c) Asfalto Diluído de Petróleo (ADP);
- d) ligantes modificados, em casos especiais.

2.6.1.1 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

De acordo com a ASTM (1980), o asfalto é um material cimentante castanho escuro ou preto, em que os constituintes principais são betumes que ocorrem na natureza ou que se obtêm do processamento do petróleo. O asfalto se encontra em proporções variadas na maioria dos crus de petróleo.

Betume, de acordo com ASTM (1980), é uma classe de substâncias cimentantes pretas ou escuras (sólidas, semi-sólidas, viscosas), naturais ou fabricadas, composta principalmente de hidrocarbonetos de alto peso molecular, de que são típicos os asfaltos, alcatrões, piches e asfaltitas.

Para BERNUCCI *et al.*(2007), o asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem propriedades de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil, utiliza-se a denominação CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. O CAP é um material quase totalmente solúvel em benzeno,

tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono. Na Tabela 2.2 apresentam-se as especificações brasileiras para cada tipo de CAP.

Tabela 2.2 - Especificações Brasileiras de Cimento Asfáltico de Petróleo (ANP, 2005 *apud* BERNUCCI *et al.* 2007).

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	S	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20 rpm, mín.	Cp	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

(*)Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original, antes do ensaio do efeito do calor e do ar.

Nos tratamentos superficiais, o CAP é aquecido até adquirir a consistência apropriada para poder ser espalhado sobre: a base imprimada, uma camada de agregado (tratamentos múltiplos) ou em um revestimento já existente. Para SANTANA e GONTIJO (1985), por prudência, nunca se deve aquecer um CAP a mais de 175 °C – somente se pode empregar CAPs moles (CAP 150/200 para cima). É muito perigoso o uso do CAP 85/100, nem deve-se pensar em CAPs mais duros (50/60, 30/45, etc). Não há nenhum histórico do uso de CAPs 50/60 e 30/45 em tratamento superficial no estado do Ceará.

Para SANTANA e GONTIJO (1984), iniciou-se o emprego dos CAPs em

tratamento superficial duplo a partir de 1954. Os tipos mais utilizados tem sido o CAP 150/200 e o CAP 85/100. O uso do CAP 85/100, apesar das dificuldades que são criadas durante a execução, apresentou bom comportamento. Em épocas mais quentes, o uso do CAP 85/100 apresentou resultados entre sofríveis e regulares, havendo uma tendência de rejeição de agregado da segunda camada.

A temperatura de aplicação tem uma importância vital na escolha do CAP para aplicação nos tratamentos superficiais. É de se notar que há uma brusca queda de temperatura do CAP, no seu trajeto e ao entrar em contato com a superfície a ser tratada. Em climas frios, necessita-se de CAPs mais moles, como é o caso do CAP 150/200.

LARSEN (1985) ressalta a importância de se obedecer a um determinado limite de temperatura no aquecimento do CAP. LARSEN (1985), ainda afirma, que a viscosidade pode sofrer uma alteração (aumento) irreversível, no caso do ligante ser superaquecido ou mesmo por um aquecimento prolongado à temperatura recomendada para o espalhamento. Essa alteração de consistência deve-se a um conjunto de fenômenos: oxidação, polimerização e evaporação de voláteis do cimento asfáltico. O asfalto sofre uma diminuição na penetração e na ductilidade, bem como um aumento no ponto de amolecimento e na viscosidade. Assim, o ligante torna-se quebradiço na pista após um período que pode ser sensivelmente mais curto que o tempo no qual os mesmos fenômenos de desagregação manifestar-se-iam normalmente pelo intemperismo natural. Em temperaturas muito elevadas, pode ocorrer um craqueamento do asfalto com uma perda completa de suas propriedades aglutinantes.

DICKINSON (1980) *apud* LARSEN (1985), relata que a oxidação térmica é dobrada para cada aumento de 10°C de temperatura, aproximadamente. O autor afirma, também, que a temperatura mínima de aquecimento é aquela correspondente à viscosidade máxima (60 SSF, pelo critério do DNIT) para uma distribuição uniforme do ligante. Portanto, para atenuar os problemas de endurecimento precoce do ligante, é preferível um aquecimento o mais próximo possível a essa temperatura mínima. Mantendo-se o aquecimento na temperatura mínima admissível, o consumo de energia usada será também minimizado. Na Tabela 2.3 apresentam-se as temperaturas máximas

admissíveis para uso do CAP em tratamentos superficiais, em função da penetração de 0,1mm a 25 °C.

Tabela 2.3 - Limites de aquecimento do CAP.

Penetração do CAP, 0,1 mm a 25 °C	Temperatura máxima, °C
85/100 e 100/120	180
150/200	175

O ligante aquecido esfria rapidamente após a sua aplicação e atinge, em 1 a 2 minutos, uma temperatura próxima a da pista, dependendo também da temperatura ambiente, da temperatura do agregado e de sua umidade. A viscosidade do ligante durante a aplicação e compactação do agregado depende do intervalo de tempo entre essas operações e a aplicação do ligante. Daí a importância de se trabalhar com um espaçamento pequeno entre os equipamentos principais, ou seja: espargidor de ligante, distribuidor de agregado e compactador, para obter-se uma molhagem satisfatória do agregado pelo ligante.

Por outro lado, deve-se levar em conta também a necessidade do ligante ter uma viscosidade suficientemente alta para a coesão adequada já durante a compactação e, principalmente, nos primeiros dias após a abertura ao tráfego, para que não ocorra arrancamento do agregado. É necessário, portanto, respeitarem-se as temperaturas máxima e mínima durante e após a execução do tratamento superficial.

O uso do CAP em tratamento superficial tem suas vantagens e desvantagens. As principais vantagens são: desenvolver rapidamente uma elevada viscosidade; apresentar bom comportamento com o agregado graúdo ou quando submetido ao tráfego pesado; propiciar uma menor rejeição do agregado da última camada (MELO, 1978).

As principais desvantagens são: exige que após a sua aplicação seja feita a cobertura imediata com agregado; exige aquecimento no limite superior da temperatura admissível; exige maiores cuidados na distribuição, tendo em vista a maior possibilidade de entupimento dos bicos da barra do distribuidor de ligante (MELO 1978).

2.6.1.2 - Emulsão Asfáltica (EA)

As emulsões, contrariamente aos asfaltos diluídos, são de uso crescente mundialmente. No seu manuseio e aplicação, é menor o consumo de energia e é menor a poluição para o meio ambiente. As emulsões asfálticas são os ligantes mais empregados nos tratamentos superficiais.

O emprego de emulsão asfáltica em tratamento superficial nem sempre tem encontrado êxito. Entretanto, muitos defeitos ocorridos podem ser atribuídos aos erros de dosagem e até mesmo de execução. É comum a aplicação de uma taxa de emulsão (CAP + água) praticamente igual à taxa correspondente de CAP puro. Acredita-se que essa ação é um erro e a causa de sérias desagregações. A taxa correta de emulsão, levando-se em conta o teor de água usado na sua fabricação, para garantir o mesmo percentual de ligante residual deve ser maior que a respectiva taxa de CAP puro nas aplicações em tratamento superficial. Isso significa, para o comprador, um custo maior na aquisição do ligante emulsificado.

O uso de emulsões em tratamento superficial tem suas vantagens e desvantagens. Segundo ABEDA (2001) as principais vantagens são:

- representam uma alternativa econômica de aplicação, pois na maioria dos casos pode ser empregada sem necessidade de aquecimento;
- apresentam excelente afinidade com todos os tipos de agregados eliminando o uso de aditivos “dopes”, normalmente empregados para melhorar a adesividade do CAP em misturas a quente com agregados;
- possibilitam a utilização de agregados úmidos evitando a necessidade de combustíveis para secagem dos mesmos;
- permitem estocagem a temperatura ambiente em instalações simples que não requerem fonte de aquecimento, combustíveis derivados de petróleo e isolamento térmico;
- eliminam os riscos de incêndio e explosões, uma vez que não são utilizados solventes de petróleo em seu emprego;
- evitam os riscos de acidentes por queimaduras;

- não geram vapores tóxicos e poluentes, preservando o meio ambiente (produto ecologicamente correto);
- possibilitam a produção de grandes volumes de misturas em equipamentos de baixo custo e de fácil operação/distribuição.

Segundo MELO (1978) as principais desvantagens são:

- não desenvolve rapidamente a viscosidade;
- exigir controle da velocidade dos veículos que circularem nos primeiros dias após a execução;
- pode exigir variação no processo de execução por penetração invertida;
- quando o tratamento é executado por penetração invertida, há uma maior rejeição de agregado da última camada.

Para o IA (1989), as emulsões asfálticas oferecem, em relação aos cimentos asfálticos aquecidos, vantagem de poderem ser usadas com agregados à temperatura ambiente ou aquecidos secos ou úmidos. A possibilidade de usar as emulsões asfálticas com agregados úmidos também representa uma vantagem em relação aos asfaltos diluídos.

A emulsão pode ser aniônica ou catiônica. No Brasil, a emulsão aniônica tem sido quase completamente substituída pela emulsão catiônica, por esta possuir uma ruptura mais rápida e uma adesividade maior em praticamente todos os agregados brasileiros usados em pavimentação. De fato, a emulsão catiônica, por ser considerada um ligante pré dopado, representa uma vantagem significativa em relação ao CAP e ao ADP.

Quando aplicada em tratamento superficial, a emulsão deve possuir a ruptura mais rápida possível, para garantir sua adesão e fixação imediata sobre o agregado (LARSEN, 1985). As especificações brasileiras estabelecem limites para aplicações das emulsões asfálticas catiônicas, conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas (Conselho Nacional de Petróleo – CNP, 07/88) (ABEDA, 2001).

Característica	Métodos		Tipo de Ruptura				
	ABNT	ASTM	Rápida		Media		Lenta
			RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C
Ensaio sobre a emulsão							
Viscosidade Saybolt-Furol, s, 50°C	NBR 14491	D 88	20-90	100-400	20-200	100-400	Max. 70
Sedimentação, % em peso max.	NBR 6570	D 244	5	5	5	5	5
Peneiração, 0,84mm % em peso max.	NBR 14393	14393	D 244	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência a água, % min. de cobertura	NBR 6300	D 244					
Agregado seco			80	80	60	60	60
Agregado úmido			80	80	80	80	80
Mistura com cimento, % max.	NBR 6297	D 244	-	-	-	-	2
ou mistura com filer silício	NBR 6302		-	-	-	-	1,2 a 2,0
Carga da partícula	NBR 6567	D 244	positiva	positiva	positiva	positiva	Positiva
pH, máx.	NBR 6299	D 244	-	-	-	-	6,5
Destilação	NBR 6568	D 244					
Solvente destilado, % em vol.			0-3	0-3	0-12	3-13	Nula
Resíduo, % em peso min.			62	67	62	65	60
Desemulsibilidade	NBR 6568	D 244					
% em peso min.			50	50	-	-	-
% em peso max.			-	-	50	50	-
Ensaio sobre o solvente destilado							
Destilação, 95% evaporados, °C, máx.	NBR 9619	-	-	-	360	360	-
Ensaio sobre o solvente destilado							
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	D 5	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
Teor de betume, % em peso min.	NBR 14855	D 2042	97	97	97	97	97
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	D 113	40	40	40	40	40

É evidente o interesse de se usar uma emulsão com ruptura mais rápida possível em qualquer tratamento superficial convencional, com agregado limpo e de graduação satisfatória. VOGT (1975) *apud* LARSEN (1985) admite que se use RR-1C em tratamento múltiplo, desde que a desemulsibilidade desta seja maior que 70% e que a viscosidade a 50% esteja na faixa de 40 a 80 SSF. Caso contrário, e sempre em tratamento simples, usar RR-2C.

LARSEN (1985) sugere para as condições brasileiras, uma temperatura máxima da pista de 50°C para aplicação da emulsão RR-1C e de 60°C para aplicação da emulsão RR-2C. Para temperaturas maiores deve-se executar uma irrigação na pista, para uma redução adequada da temperatura da superfície, antes de se iniciar o tratamento.

2.6.1.3 - Asfalto Diluído de Petróleo (ADP)

O ADP, também conhecido como asfalto dissolvido ou “cut-back”, resulta da diluição do CAP por destilados de petróleo, solventes apropriados que liquefazem o asfalto. O principal uso do ADP na pavimentação é no serviço de imprimação de base de pavimentos (DNER ES 306/97). Quando se utiliza ADP, terminada a construção, o solvente evapora e fica o cimento asfáltico no desempenho de sua função (IA, 1989). Devido à evaporação do solvente, a regulamentação ambiental pode restringir ou proibir o uso dos AD em várias áreas.

Para o INSTITUTO DO ASFALTO (1989), os solventes do petróleo utilizados na dissolução do cimento asfáltico são diversamente chamados destilados, diluentes e agentes de recorte. Se o solvente usado na produção do ADP for extremamente volátil ele escapará rapidamente por evaporação. Os solventes de volatilidade menor evaporam-se mais rapidamente. Tendo em conta a velocidade de evaporação dos AD, esses se dividem em três tipos:

1. de Cura Rápida (CR ou “RC” em inglês) – cimento asfáltico e diluente leve de alta volatilidade que geralmente é a gasolina ou a nafta (RC-70, 250, 800, 3000);
2. de Cura Média (CM ou “MC” em inglês) – cimento asfáltico e diluente médio de volatilidade intermediária que geralmente é o querosene (MC-30, 70, 250, 800, 3000); e
3. de Cura Lenta (CL ou “SC” em inglês) – cimento asfáltico e óleos de baixa volatilidade que agem como diluentes (SC-70, 250, 800, 3000).

No Brasil são fabricados dois tipos de ADP, os de cura média e os de cura rápida. No Ceará, emprega-se muito os ADP de cura média do tipo CM 30 em estradas e aeroportos. Entre suas aplicações mais importantes estão à mistura em campo, pré-misturados e aplicações por espargimento (tais como: camada de imprimação, ligação e selante).

Entretanto, por serem os diluentes desses materiais muito ativos, que se perdem por evaporação e devido à regulamentação ambiental, os mesmos tendem a ser substituídos pelas emulsões asfálticas na maioria das aplicações. Em alguns países, esses materiais já foram substituídos pelas emulsões asfálticas. Na Tabela 2.5 apresenta-se a especificação brasileira de asfalto diluído, tipo cura média.

Tabela 2.5 - Especificações brasileira de Asfalto Diluído, tipo cura média (ANP, 2007).

(www.proasfalto.com.br).

Características	Métodos		Tipos de CM	
	ABNT/NBR	ASTM	CM-30	CM-70
No asfalto diluído				
Viscosidade cinemática, cSt, 60°C	14756	D 2170	30-60	70-140
Viscosidade Saybolt-Frol, s	14950	D 88	75-150	-
25°C			-	60-120
50°C				
Ponto de fulgor (V.A. Tag), °C, mín.	5765	D 3143	38	38
Destilação até 360°C % volume total destilado, mín.	14856	D 402		
225°C			25	20
260°C			40-70	20-60
316°C			75-93	65-90
Resíduo, 360°C, % volume, mín.			50	55
Água, % volume, máx.	14236	D 95	0,2	0,2
No resíduo da destilação				
Viscosidade, 60°C P ²	5847	D 2170	300-1200	300-1200
Betume, % massa, mín. ²	14855	D 2042	99	99
Dutilidade, 25°C, cm, mín. ^{1,2}	6293	D 113	100	100

¹Se a dutilidade obtida a 25°C for menor do que 100cm., o asfalto diluído estará especificado se a dutilidade a 15,5°C for maior que 100cm.

²Ensaio realizado no resíduo da destilação

2.6.1.4 - Ligantes Modificados

Muita pesquisa tem sido feita sobre aditivos modificadores da qualidade dos ligantes betuminosos convencionais, inclusive sobre os usados em tratamento superficial. Entre os mais pesquisados estão os polímeros e pó de borracha inservíveis. Esses materiais geralmente melhoram as propriedades adesivas e coesivas do ligante, diminuindo sua susceptibilidade térmica. Embora sejam de custo elevado, os ligantes modificados são usados, com vantagem, em trechos de maior solicitação de tráfego, como em curvas fechadas e em intersecções.

Os polímeros mais comuns para uso em pavimentação são os termoplásticos, normalmente usados em modificação de CAP, que consistem de copolímeros em bloco

de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e acetado de vinila (EVA) (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A Tabela 2.6 mostra a especificação técnica para asfalto modificado com polímero.

Tabela 2.6 - Especificação técnica para asfalto modificado por polímero (ANP) (DNER – EM 396/99) (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Característica	Exigência	
	Mínima	Máxima
Penetração, 100g, 5s, 0,1mm	45	-
Ponto de fulgor, °C	235	-
Dutilidade, 25°C, 5 cm/mín, cm	100	-
Densidade relativa 25°C/4°C	1,00	1,05
Ponto de amolecimento, °C	60	85
Ponto de ruptura Fraass, °C	-	-13
Recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	85	-
Viscosidade cinemática, 135°C, CST	850	
Estabilidade ao armazenamento, 500ml em estufa a 163°C por 5 dias:		
• diferença de ponto de amolecimento, °C	-	4
• diferença de recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	-	3
Efeito do calor e do ar (ECA)		
• variação em massa, %	-	1,0
• porcentagem da penetração original	50	-
• variação do ponto de amolecimento, °C	-	4
• recuperação elástica, %	80	-

Segundo BERNUCCI *et al.*, (2007), nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao CAP, e nem todo CAP quando modificado por polímeros apresenta estabilidade à estocagem. Os asfaltos que melhor se compatibilizam com polímeros são aqueles que apresentam uma certa aromaticidade. A quantidade de polímero que deve ser adicionada ao ligante é variável e depende das propriedades finais desejadas.

Para BERNUCCI *et al* (2007), uma forma de se incorporar os benefícios de um polímero ao ligante asfáltico e ao mesmo tempo reduzir problemas ambientais, é utilizar a borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas. Os pneus inservíveis são problemas para a sociedade, e sua utilização em pavimentação tem sido uma das técnicas mais utilizadas em todo o mundo.

Nos tratamentos superficiais, o uso de asfaltos modificados vem crescendo dia a dia. No Brasil, já há fabricação de ligante modificado por borracha moída de pneus, totalmente diferente daquele usado em misturas usinadas, especialmente para ser aplicado nos tratamentos superficiais. Já as emulsões asfálticas melhoradas por polímero têm sido usadas com frequência nos micro revestimentos asfálticos.

No estado do Ceará, o autor do presente trabalho tem notícia que nos trechos do entroncamento BR 116 – Várzea Alegre e entroncamento BR 116 – divisa CE/PB foram usados emulsões asfálticas melhoradas por polímero SBS no revestimento em tratamento superficial duplo.

2.6.2 - Agregado

Todos os revestimentos asfálticos são constituídos de uma associação de ligantes asfálticos e agregados, e em alguns casos de produtos complementares.

Agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas e em seu estado processado. Há ainda de se considerar também os agregados artificiais, tais como: a escória de alto-forno e de aciaria, a argila calcinada e argila expandida. Um dos tipos de agregados artificiais atualmente muito utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subproduto da indústria do aço (BERNUCCI *et al.* 2007).

Há também o uso, em pavimentação, de agregados reciclados, que são provenientes de reuso de materiais diversos. A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e em alguns países já é a fonte principal de agregados (BERNUCCI *et al.* 2007). Destaca-se também a utilização crescente de resíduos de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição destes resíduos (FERNANDES, 2004).

As funções principais do agregado no tratamento superficial são: transmitir as cargas até o substrato, resistir à abrasão e à fragmentação pela ação do tráfego; resistir

ao intemperismo; assegurar uma superfície antiderrapante, promover uma drenagem superficial adequada e destacar uma determinada textura ou tonalidade de cor da superfície, quando desejado.

Para BERNUCCI *et al.* (2007), o agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas próximas e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios são utilizados para a previsão do seu comportamento em serviço.

O agregado a ser usado em tratamento superficial pode ser pedra britada, seixo rolado britado, cascalho britado ou outros indicados no projeto. O agregado deve, por inspeção visual, possuir partículas limpas, duras, isentas de qualquer cobertura e de torrões de argila. Na escolha do tipo de agregado, as características que interessam estudar são (DERT-ES-P-11/00, 2000):

- a) isenção de pó;
- b) resistência ao choque e à abrasão;
- c) forma e textura satisfatória;
- d) granulometria adequada;
- e) boa adesividade com o ligante asfáltico; e
- f) durabilidade.

Cada uma dessas características serão explicadas nos sub-itens de 2.6.2.1 a 2.6.2.6.

2.6.2.1 - Isenção de pó

A presença de pó é um dos maiores inconvenientes que pode apresentar um agregado, acontecendo freqüentemente com britas de calcário e de arenito. Havendo presença de pó o agregado deve ser obrigatoriamente lavado, não aceitando-se a retirada do pó através de peneiramentos, jatos de ar e outros artificios. A presença do pó causa

diminuição da retenção do agregado após a execução do tratamento, pois impede diretamente uma aderência satisfatória entre ligante e agregado.

2.6.2.2 - Resistência ao choque e à abrasão

O desgaste por Abrasão Los Angeles (LA) (DNER-ME 035/98) para tratamento, normalmente, deve ser: $LA \leq 40\%$, admitindo-se eventualmente um agregado com $LA \leq 45\%$ se apresentar bom comportamento, quando submetido na pista a uma compressão de 5 coberturas (passadas no mesmo ponto) de um rolo liso estático com o mínimo de 35 kgf/cm, por inspeção visual. Já o DER/CE estabelece um limite de até 55% (DERT-ES-P-11/00, 2000). Estes limites são estabelecidos pelas normas para poder escolher agregados mais resistentes. Alguns pesquisadores defendem estabelecer este limite para um $LA \leq 30\%$, embora o autor do presente trabalho acredite que não há necessidade de se estabelecer limites tão rígidos.

2.6.2.3 - Forma e textura satisfatória

A forma afeta o tratamento superficial especialmente no que diz respeito à espessura. É preferível que a forma seja sempre cúbica. A forma deve ser tal que o índice de forma (DNER-ME 086/94) não seja inferior a 0,5. A porcentagem de grãos defeituosos (fora dos padrões estabelecidos pelas normas rodoviárias) não poderá ultrapassar 20% e, eventualmente, a 25% (para basalto e diabásios) segundo a (DERT-ES-P-11/00, 2000).

Quanto à natureza da rocha, os basaltos tem tendência a apresentar forma menos cúbica que os granitos e gnaisses. Os calcários são os que apresentam melhor forma (MELO, 1978). A forma do agregado é um parâmetro importante na avaliação da dosagem dos materiais, bem como da estabilidade e das características antiderrapantes do tratamento superficial. Em geral, as partículas de forma arredondada, lamelar (achatadas) e alongadas devem ser evitadas. Em comparação com a forma de partícula cúbica, a partícula lamelar provoca a exsudação com maior facilidade.

LARSEN (1985) afirma que é difícil estabelecer o modelo geométrico da forma

ideal do agregado. Entretanto, algumas formas são indesejáveis e inconvenientes para uso em tratamento superficial, tais como: os agregados que causam um maior teor de vazios, os que necessitam de maiores taxas de ligante, os que formam camadas com superfícies antiderrapantes e os que formam camadas com baixa estabilidade (poucos pontos de contatos).

Para LARSEN (1985), a forma cúbica é a ideal para o agregado. Entretanto, se todos os grãos fossem desta forma (impossível na prática), teria-se uma drenagem superficial deficiente e um risco maior de exsudação do ligante. A forma mais desejável, provavelmente, seria um poliedro, intermediário entre o cubo e a esfera, com numerosas arestas obtusas que facilitassem o travamento entre as partículas e aumentassem a aderência roda/superfície (maior coeficiente de atrito).

Quanto à textura, a melhor é a rugosa, pois facilita a adesividade com o ligante asfáltico, como também com uma pequena porosidade. Para LARSEN (1985), os agregados de superfície rugosa oferecem maior atrito interno, mais fácil adesão com o ligante e maior aderência roda/superfície da pista (a baixas velocidades). Requerem, por outro lado, uma maior taxa de ligante do que os lisos de mesma forma.

2.6.2.4 - Granulometria adequada

A distribuição granulométrica é de grande importância na escolha do agregado para emprego em tratamento superficial. Dois aspectos devem ser levados em conta: a granulometria do agregado e o diâmetro máximo do agregado de cada camada.

Os tamanhos do agregado deverão ser escolhidos, principalmente, em função do tráfego e da natureza da superfície a tratar. Quanto mais pesado e intenso for o tráfego maior deverá ser o tamanho do agregado. Por outro lado, quanto mais duro for o substrato menor será o tamanho. (LARSEN, 1985).

Para o estabelecimento da classe granulométrica, o DER/CE sugere para o TSS a classe granulométrica mostrada na Tabela 2.7. Nesta tabela considera-se que D é o diâmetro da malha da peneira 100% passando e d é o diâmetro da peneira 0% passando.

Tabela 2.7 - Classe granulométrica para o TSS (DERT-ES-P-10/00,2000).

Classes granulométricas para o TSS		
Classe	D- d	N
Classe I	19 – 16 mm (3/4” – 5/8”)	$2,5 \times 10^5 < N \leq 7,5 \times 10^5$
Classe II	16 – 10 mm (5/8” – 3/8”)	$7,5 \times 10^4 < N \leq 2,5 \times 10^5$
Classe III	10 – 6,3 mm (3/8” – 1/4”)	$N \leq 7,5 \times 10^4$

Para o TSD, o DER/CE sugere três combinações entre as quatro classes definidas, de acordo com o tráfego. A classe IV – III é mais sujeita a exsudação, sendo recomendada para tráfego leve. Na formação de classe granulométrica para TSD, deve-se observar sempre que $D_2 \approx d_1$, ou pelo menos $D_2 \geq 0,6 d_1$ para que não haja maiores perigos de exsudação. A Tabela 2.8 mostra a classe granulométrica sugerida pelo DER/CE para uso em TSD (DERT-ES-P-11/00, 2000). Nesta tabela considera-se que D é o diâmetro da malha da peneira 100% passando e d é o diâmetro da peneira 0% passando.

Tabela 2.8 - Classe granulométrica para o TSD (DERT-ES-P-11/00,2000).

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

Observou-se, também, no que concerne à granulometria, que as especificações abordam o assunto de dois modos. Algumas indicam os tipos de agregados a empregar em cada camada pelos diâmetros máximos e mínimos, como é o caso do DER/CE, e outras indicam as faixas granulométricas nas quais os agregados devem se enquadrar, como é o caso do DNIT (DNER-ES 310-97). Na Tabela 2.9 apresenta-se a faixa granulométrica especificada pelo DNIT para o caso do TSS, TSD e TST.

Tabela 2.9 - Granulometrias especificadas pelo DNIT para os tratamentos superficiais.
(DNER ES-310-97).

Tratamento Superficial		Simples			Duplo			Triplo		
		A	B	C	1ª Cam.	2ª Camada		Camadas		
						A	B	1ª	2ª	3ª
Granulometria	1"	-	-	-	100	-	-	90-100	-	-
	3/4 "	-	-	-	90-100	-	-	20-55	100	-
	1/2"	-	100	100	20-55	100	-	0-10	90-100	-
	3/8"	100	85-100	85-100	0-15	85-100	100	0-5	40-70	100
	Nº 4	85-100	10-30	0-10	0-5	10-30	85-100	-	0-15	85-100
	Nº 10	10-40	0-10	0-1	-	0-10	10-40	-	0-5	10-40
	Nº 200	0-2	0-2	-	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

2.6.2.5 - Boa adesividade com o ligante asfáltico

A adesividade é uma propriedade do par agregado/ligante e deve ser determinada com o ligante que se vai realmente usar. Os agregados eletronegativos têm geralmente adesividade não satisfatória com o CAP 150/200. É o caso do granito, gnaisse, quartzito e arenito. Nesse caso, deve-se usar um melhorador de adesividade (também chamado de “dope”), geralmente de 0,4 a 0,6 do peso do CAP.

O “dope” deve necessariamente ser adquirido separadamente e incorporado ao CAP no canteiro de serviço, na porcentagem indicada pelo ensaio de adesividade (DNER-ME 78/94). A adesividade deve ser sempre satisfatória com o “dope”. As emulsões catiônicas apresentam sempre boa adesividade com agregados tanto eletronegativos como com os eletropositivos (basalto, diabásio, calcário, etc).

2.6.2.6 - Durabilidade

Se a pedra for de diabásio ou de basalto, ou de uma natureza mineralógica sujeita a alterações, deve ser realizada a avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER-ME 89/94). Se houver uma perda superior a 12% com sulfato de sódio, em 5 ciclos, deve-se impedir a britagem da pedra.

Uma boa britagem é fundamental para se obter agregados com boa forma. Deve-se seguir a orientação dos Manuais de Britagem, dando-se especial atenção para: Relação de Britagem (RB), que é a relação entre a dimensão do bloco de pedra que entra no britador primário e a dimensão máxima do que sai, e para as vantagens da britagem em circuito fechado (o material que sai do secundário volta para o primário). Algumas rochas, como basalto e diabásio, podem exigir britadores especiais, para fornecerem uma brita razoavelmente “cúbica”. A Figura 2.11 ilustra o serviço de britagem.



Figura 2.11 - Britagem do agregado.

Caso se trate de cascalho ou seixo britados, deve-se exigir pelo menos duas faces britadas. Deve-se recomendar que a britagem seja feita com uma relação RB a maior possível.

2.7 - MÉTODOS DE DOSAGEM

2.7.1 - Métodos de dosagem do agregado

Há basicamente dois tipos de métodos para determinação da taxa de agregado para tratamento superficial: (a) métodos diretos, nos quais a quantidade de agregado é determinada experimentalmente, e (b) métodos indiretos, nos quais são utilizadas fórmulas estabelecidas por diversos autores e que se baseiam nos resultados de ensaios realizados sobre os agregados.

Os métodos diretos são os mais empregados. O método direto mais usado é o método da placa ou bandeja, também conhecido como método do mosaico. Consiste em espalhar o agregado sobre uma placa plana de área conhecida (50cm por 50cm) de modo a cobrir a área da placa e obter um mosaico uniforme de agregado sem superposição e sem falhas. A operação deve ser repetida pelo menos três vezes. Calcula-se a taxa de agregado graúdo (T_g) pela equação 2.1.

$$T_g = \frac{P_t - P_p}{A} \quad (2.1)$$

Onde,

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

P_p : peso da placa (kg); e

A : área da placa (m^2).

A Figura 2.12 ilustra o método da bandeja para determinação da taxa de agregado para um TST, o qual também é usado para definir as taxas do TSS e TSD.



Figura 2.12 - Ilustração do método da bandeja para determinação da taxa de agregado.

Outro método direto recomendado por LARSEN (1985) é o da caixa dosadora. Essa caixa tem dimensões de 80cm por 25cm por 4cm. O procedimento da dosagem é simples: coloca-se o agregado sobre o fundo da caixa, em posição horizontal, num mosaico igual ao que se deseja na pista, isto é, com cobertura densa. Em seguida, levanta-se a caixa até a posição vertical e lê-se diretamente a taxa do agregado, em L/m^2 , pela graduação marcada na tampa transparente da caixa. A Figura 2.13 mostra a caixa dosadora.

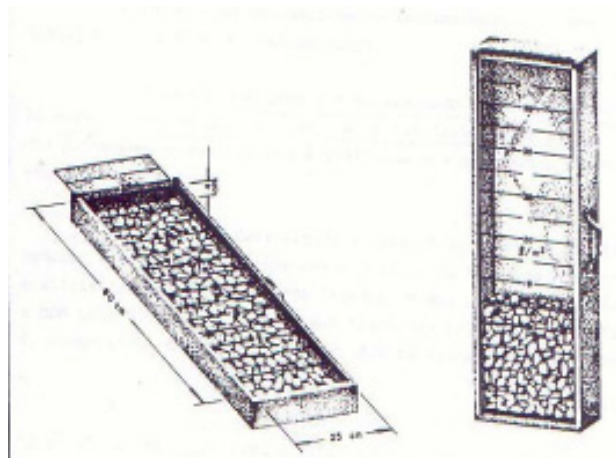


Figura 2.13 - Caixa dosadora para determinar a taxa de agregado (LARSEN, 1985).

O DER/CE estabelece em suas especificações para TSD (DERT-ES-P-11/94, 1994), um método indireto que de um modo geral deve obedecer às classes granulométricas apresentadas nas Tabelas 2.7 e 2.8. Como primeira indicação, a taxa de agregado, T_{ag} (kg/m^2) para o TSD, pode ser obtida usando-se para cada uma das 2 camadas a equação 2.2.

$$T_{ag} = \frac{K(D + d)}{2} \quad (2.2)$$

Onde,

T_{ag} : taxa do agregado, em kg/m^2 ;

D: diâmetro máximo (mm);

d: diâmetro mínimo (mm); e

$K = 0,90$ se $d \geq 16\text{mm}$ (5/8)

$= 0,93$ se 10mm (3/8) $\leq d < 16\text{mm}$ (5/8)

$= 1,10$ se $d < 10\text{mm}$ (3/8)

Após a definição das taxas do agregado, por qualquer um dos métodos, MELO (1978), LARSEN (1985), GUARNIERI e FERREIRA (1985), consideraram necessária uma sobretaxa de agregado, devido à rejeição de alguns grãos pela ação do tráfego inicial e às imperfeições inevitáveis na aplicação.

Para LARSEN (1985), essa sobretaxa deve ser de 10% na dosagem da última camada. Para GUARNIERI e FERREIRA (1985), a sobretaxa deve ser de até 20% na rejeição dos agregados da última camada. Para a especificação do DER/CE (DERT-ES-

P-11/00, 2000), essa sobretaxa deve ser de 3% a 7%.

A sobretaxa deve ser reduzida ao máximo, para evitar-se quebra de pará-brisa e faróis dos veículos. Ela deve ser escolhida para cada obra em função das condições locais (tráfego, equipamento e tipo de material a ser usado). Em serviços considerados de maior importância, testam-se as taxas de agregado e de ligante em verdadeira grandeza, antes do início dos mesmos, usando-se tantos seguimentos de 40m (área correspondente a 40m por 3,5m = 140m²) quantos julgados necessários.

Na opinião do autor deste trabalho, as taxas do agregado devem ser definidas após a determinação do volume de tráfego e a britagem do agregado, usando-se o método simples do mosaico. Considera-se o método do mosaico como o que melhor retrata as características da superfície do revestimento em laboratório, visto que ele é aplicado em uma bandeja de dimensões definidas e logo pesado. Em função da forma do agregado e do tipo, deve-se, após sua pesagem, estimar uma sobretaxa de no máximo 5%.

2.7.2 - Métodos de dosagem do ligante

A dosagem do ligante é estabelecida por diversas fórmulas teóricas ou experimentais. A quantidade ideal de ligante depende das dimensões e da porosidade do agregado, da natureza e da intensidade do trânsito e das condições da superfície sobre a qual será executado o tratamento.

Os diferentes métodos de dosagem de ligantes fornecem, de modo geral, a quantidade básica de ligante residual. Para aplicação da taxa calculada, faz-se necessário introduzir correções que levem em conta o estado da superfície (lisa, porosa, taxa de imprimação, etc.), tipo de ligante a ser empregado (AD, emulsão, CAP, etc.) e a variação de volume com a temperatura (MELO, 1978).

MELO (1978) cita alguns métodos para estabelecer a dosagem do ligante, tais como: o método de Hanson, método da Califórnia, método de Linckenhyl, método de Kearley e o método de Tagle. As dosagens por esses métodos estão sujeitas as correções, na maioria dos casos. A quantidade de ligante a ser aplicada poderá diferir

daquela calculada. As prováveis correções são devido a textura da superfície sobre a qual se executará o tratamento, ao tipo de ligante e a variação de volume com a temperatura.

Para a especificação do DER/CE (DERT-ES-P-11/00, 2000), a Taxa de Cimento Asfáltico de Petróleo (T_{CAP}) para cada camada pode ser determinada através da equação 2.3.

$$T_{CAP} = Tag/12 \quad (2.3)$$

Onde,

T_{CAP} : taxa de CAP (L/m^2)

Tag: taxa de agregado a espalhar (L/m^2)

As taxas das Emulsões Asfálticas Catiônicas (RR-1C e RR-2C) são calculadas em função da taxa do CAP, levando-se em conta: (a) que o teor do CAP é 62% para a emulsão RR-1C e 67% para a emulsão RR-2C e (b) que, em virtude de sua menor viscosidade, há cerca de 10% de melhor aproveitamento da emulsão asfáltica catiônica em relação ao CAP, considerando-se o volume aplicado.

Portanto, para calcular as taxas das emulsões asfálticas catiônicas usam-se as equações 2.4 e 2.5.

$$T_{(RR-1C)} = (0,90 \times T_{CAP})/0,62 \quad \text{ou} \quad T_{(RR-1C)} = 0,121 \times Tag \quad (2.4)$$

Onde,

$T_{(RR-1C)}$: taxa da emulsão asfáltica catiônica RR-1C (L/m^2)

T_{CAP} : taxa do CAP (L/m^2);

Tag: taxa do agregado

$$T_{(RR-2C)} = (0,90 \times T_{CAP})/0,67 \quad \text{ou} \quad T_{(RR-2C)} = 0,112 \times Tag \quad (2.5)$$

Onde,

$T_{(RR-2C)}$: taxa da emulsão asfáltica catiônica RR-2C (L/m^2)

T_{CAP} : taxa do CAP (L/m^2);

Tag: taxa do agregado.

As emulsões asfálticas catiônicas apresentam um maior poder de penetração do que o CAP. Considerando-se o somatório da primeira e segunda aplicações, é vantajoso utilizar-se uma taxa da emulsão na 2ª aplicação em aproximadamente 60% e na 1ª aplicação em aproximadamente 40%. Além disso, é de grande vantagem subtrair 0,5 L/m² da 2ª taxa de aplicação da emulsão e diluir em água na proporção de 1:1, e aplicar esse banho diluído após a compressão da 2ª camada do agregado (DERT-ES-P-11/00,2000).

Na Tabela 2.10 apresentam-se as taxas do CAP sugeridas pelo DER/CE, em função da classe granulométrica, para uso em TSD (DERT-ES-P-11/00, 2000).

Tabela 2.10 - Taxas do CAP em função da classe granulométrica (DERT-ES-P-11/00, 2000).

CLASSE	D1 – d1	D2 – d2	1ª camada	2ª camada	Total
I – II	19 – 16mm	16 – 10mm	Tag: 16 kg/m ²	12 kg/m ²	28 kg/m ²
	(3/4” – 5/8”)	(5/8” – 3/8”)	T _{CAP} : 1,32 L/m ²	1,01 L/m ²	2,33 L/m ²
II – III	16 – 10mm	10 – 6,3mm	Tag: 12 kg/m ²	9 kg/m ²	21 kg/m ²
	(5/8” – 3/8”)	(3/8” – 1/4”)	T _{CAP} : 1,01 L/m ²	0,75 L/m ²	1,76 L/m ²
III – IV	19 – 10mm	10 – 6,3mm	Tag: 13 kg/m ²	9 kg/m ²	22 kg/m ²
	(3/4” – 3/8”)	(3/8” – 1/4”)	T _{CAP} : 1,12 L/m ²	0,75 L/m ²	1,87 L/m ²

Na Tabela 2.11 apresentam-se as taxas das emulsões asfálticas, sugeridas pelo DER/CE, em função da classe granulométrica, para uso em TSD (DERT-ES-P-11/00,2000).

Tabela 2.11 - Taxas das emulsões asfálticas em função da classe granulométrica (DERT-ES-P-11/00, 2000).

CLASSE	<u>D₁ – d₂</u>		RR – 1C (L/m ²)	RR – 2C (L/m ²)
	D ₂ - d ₂		T _L : (1) – (2) – (3)	T _L : (1) – (2) – (3)
I - II	19 – 16mm	28 kg/m ²	<u>3,38</u> : 1,35 – 1,53 – 0,50	<u>3,12</u> : 1,25 – 1,37 – 0,50
	16 – 10mm			
II - III	16 – 10mm	21 kg/m ²	<u>2,55</u> : 1,02 – 1,03 – 0,50	<u>2,36</u> : 0,94 – 0,92 – 0,50
	10 – 6,3mm			
IV - III	19 – 10mm	22 kg/m ²	<u>2,72</u> : 1,09 – 1,13 – 0,50	<u>2,52</u> : 1,01 – 1,01 – 0,50
	10 – 6,3mm			

2.8 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL

Os equipamentos necessários para execução do tratamento superficial não são sofisticados e não requerem grandes investimentos. Os equipamentos consistem em distribuidor de ligante (espargidor), distribuidor de agregado e rôlo compactador. Para o abastecimento de agregado utiliza-se carregadeira e caminhões basculantes. São usados tanques móveis ou fixos para o ligante.

Pode-se utilizar equipamentos auxiliares quando as condições locais os exigirem. Os principais equipamentos auxiliares são: vassoura rotativa para limpeza preliminar da pista a ser tratada, vassoura de arrasto para a redistribuição do agregado antes da sua compactação e vassoura rotativa, para a remoção de agregado ainda solto após a consolidação do tratamento.

LARSEN (1985) afirma que na década de 1930 já existiam máquinas de aplicação única de ligante e agregado (Single Pass Machines). Na atualidade, os fabricantes dessas máquinas têm mostrado um grande interesse pela fabricação desse tipo de equipamento, utilizando tecnologia mais avançada, acoplando o distribuidor de ligante e o distribuidor de agregado em um único caminhão. Para isso, usaram princípios básicos que são: a aplicação do ligante (a quente ou a frio) e do agregado simultaneamente, desde que o ligante ainda esteja em ótimas condições para envolver e aderir o agregado. A importância de uma aplicação simultânea do ligante e do agregado está na necessidade de diminuir-se custo e executar um revestimento de boa qualidade.

Para o DER/CE (DERT-ES-P-11/00, 2000), todo equipamento deve ser cuidadosamente examinado pela fiscalização, devendo dela receber a aprovação para que seja dada a ordem de serviço. Na Figura 2.14 apresentam-se os tipos de equipamentos que compõem a patrulha básica para execução dos tratamentos.



(a) Espargidor de ligante.



(b) Distribuidor de agregado.



(c) Distribuidor ligante/agregado.



(d) Rolo de pneu.

Figura 2.14 - Equipamentos básicos para execução do tratamento superficial.

Descreve-se, nos itens 2.8.1, 2.8.2 e 2.8.3, as modalidades de operação desses equipamentos, tanto das máquinas tradicionais quanto das que receberam inovações mais recentes.

2.8.1 - Espargidor de ligante

O espargidor de ligante é o equipamento mais importante para a execução do tratamento superficial. É composto por: (a) tanque para armazenar ligante com capacidade variável, em litros, que dispõe de isolamento térmico; (b) sistema de aquecimento, de modo geral constituído por dois maçaricos com câmara de vaporização, e dotado de válvula reguladora; (c) sistema de circulação do ligante; (d) barra de distribuição do ligante, com comprimento variável, podendo alcançar 7,30 m, dotada de bicos espargidores e suspensão elástica podendo sua altura ser regulada; e (e) controles.

2.8.2 - Distribuidor de agregado

O distribuidor de agregado, como o espargidor de ligante, deve espalhar o material na taxa definida pelo projeto, com uma uniformidade aceitável nos sentidos transversal e longitudinal.

Os tipos convencionais de distribuidores são: (a) portátil, montado na traseira do caminhão basculante, que se desloca em marcha ré; (b) rebocável, empurrado pelo caminhão basculante, que se desloca em marcha ré; (c) autopropulsionado, desloca-se em marcha avante e reboca o caminhão basculante em marcha ré. Há também o distribuidor de agregado combinado com o distribuidor de ligante, que é um equipamento mais moderno (ver Figura 2.14 - c).

2.8.3 - Compactador

Os compactadores mais usados atualmente em tratamento superficial são os rolos de pneus e os rolos tandem de cilindro metálico liso. Algumas vezes os dois se completam na obra.

O rolo pneumático autopropulsor, com pressão regulável, pode substituir o rolo metálico. O rolo pneumático é um compactador eficiente, principalmente quando o agregado não possui uma alta resistência mecânica ou quando a superfície a receber o tratamento apresenta pequenas irregularidades, o que acontece com muita freqüência. Deve ser dotado de dispositivo que permita a calibragem da pressão.

Com o rolo liso tandem, pode-se também obter resultados satisfatórios, especialmente quando usado em conjunto com o rolo pneumático. A carga por largura de roda deve ser de 25 a 45 kg. Os rolos muito pesados não são recomendados, devido os mesmo esmagar com freqüência muitas partículas, deixando riscos na superfície. Tem-se usado ultimamente rolos combinados de cilindro e pneumático, há também os de cilindro revestidos de borracha. Esses rolos têm apresentado ótimos resultados: maior adensamento, redução da fragmentação de partículas, velocidade relativamente alta (até 12 km/h) e redução de até 50% do número de passadas.

2.9 - TÉCNICAS CONSTRUTIVAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

É importante um bom planejamento para se ter uma execução de tratamento superficial sem imperfeições e/ou paralisações desnecessárias. Nas operações construtivas, deve-se elaborar um planejamento em função das condições específicas da obra a ser executada, tais como: projeto executivo, abastecimento de materiais, equipamento e mão-de-obra disponíveis, condições meteorológicas, prazo de execução, controles tecnológicos exigidos, controle do tráfego durante e depois da execução.

Para executar-se um bom revestimento em tratamento superficial é importante que os três equipamentos principais (espargidor de ligante, distribuidor de agregado e o compactador) ou, o equipamento conjugado (com os distribuidores de ligante e agregado e o compactador) trabalhem “em comboio” com espaçamento mínimo. Essa prática é necessária devido o ligante após o espalhamento atingir num curto tempo, da ordem de um a dois minutos, a temperatura da superfície tratada, bem como no caso da emulsão a ruptura desta se dá também rapidamente, em poucos minutos.

Os itens seguintes definem basicamente as principais operações na execução dos tratamentos superficiais.

2.9.1 - Limpeza da superfície a ser tratada.

A superfície a receber o TS deve ser limpa, por varredura mecânica ou jato de ar comprimido, para se garantir a boa aderência ao tratamento. Eventualmente, pode ser feita somente a varredura manual. Em qualquer caso, deve ser assegurada uma superfície completamente limpa, isenta de pó, poeira ou outros elementos congêneres (DERT-ES-P-11/00,2000).

2.9.2 - Aplicação do ligante.

Antes de iniciar-se a aplicação do ligante faz-se necessário observar as condições de operação da barra espargidora. Deve-se verificar sua altura e fazer-se uma

descarga, fora da plataforma a ser aplicado, para observar se os bicos encontram-se desobstruídos e em perfeito alinhamento. O espargidor de ligante deve ser operado cuidadosamente para que não ocorram variações na taxa de aplicação o que pode significar no fracasso do tratamento. É importante que se obedecem aos valores determinados na calibragem da bomba, altura da barra e velocidade do caminhão espargidor.

O ligante asfáltico deve ser aplicado de uma só vez em toda largura a ser trabalhada. Cuidados especiais devem ser tomados na execução das juntas transversais (início e fim de cada etapa de espargimento) e longitudinais (espargimento em meia pista). Se um bico da barra espargidora entupir, parcial ou totalmente, deve-se parar o caminhão imediatamente, trocar o bico e corrigir manualmente a estria defeituosa com um regador adaptado a esse serviço. Não é aconselhável a limpeza de bicos entupidos durante a execução do tratamento. Deve-se trocar o bico defeituoso por outro. É totalmente contra-indicado a limpeza dos bicos por ferramenta ou arame.

2.9.3 - Distribuição do agregado.

O distribuidor de agregado deve seguir o espargidor de ligante com um pequeno espaçamento, da ordem de 20m para CAP e de 60m para Emulsão Asfáltica Catiônica (DERT-ES-P-11/00, 2000). Essa exigência é particularmente importante para tratamento simples e para qualquer tipo de tratamento em tempo frio (LARSEN, 1985).

A distribuição do agregado deve ser feita pelos equipamentos indicados, sendo que as falhas locais das áreas defeituosas ou com excesso de agregado devem ser corrigidas manualmente antes da compressão. Um excesso de agregado deve ser removido para fora e não redistribuído na pista se não houver deficiência nas áreas adjacentes.

Para corrigir deficiências ou imperfeições na distribuição do agregado usam-se vassouras manuais. Quando se usa vassoura de arrasto, deve-se controlar o seu peso para evitar o arrancamento do agregado já fixado pelo ligante. A varredura pode e deve ser reduzida ao mínimo, e se possível eliminada, pelo uso de equipamento mais

eficiente e/ou operários de pista. Na distribuição do agregado, as juntas transversais e longitudinais devem ser monitoradas com cuidados especiais. O motorista deve ter experiência na execução dessa fase do serviço, provavelmente a mais difícil.

2.9.4 - Compactação

Para o (DERT-ES-P-11/00, 2000), a compressão do agregado deve, preferencialmente, ser feita por um rolo liso tandem (25 a 45 kgf/cm) seguido por um rolo pneumático de pressão variável (35 a 120 psi – 2,5 a 8,4 kgf/cm²). Essa operação deve ser realizada o mais rapidamente possível após o espalhamento do agregado (principalmente para o CAP).

No TSD, no caso de se dispor de apenas um rolo liso, deve-se aplicar de 2 a 4 coberturas na 1ª camada e de 2 a 3 na 2ª camada. Se o rolo disponível for o pneumático, deve-se dar de 3 a 5 coberturas na primeira camada e de 3 a 6 na segunda camada, com pressão de 90 a 110 psi.

A compressão do agregado deve ser feita das bordas para o eixo em tangente e da borda mais baixa para a borda mais alta nas curvas, iniciada o mais rapidamente possível após o espargimento do ligante.

Para LARSEN (1985), os objetivos da compactação do tratamento superficial são de promover o entrosamento inicial do agregado pela reorientação de suas partículas, bem como aumentar a adesão ligante/agregado e agregado/substrato. O número de passadas necessárias para se conseguir bons resultados, depende das características do compactador, do substrato, do agregado e do ligante. Essas características apresentam uma difícil apreciação na prática. Por isso, encontra-se na literatura uma grande disparidade de opiniões a respeito. Na Figura 2.15 apresenta-se uma seqüência de fotos ilustrativas das etapas construtivas do tratamento superficial acompanhadas pelo autor do presente trabalho.



Figura 2.15 - Seqüência de fotos ilustrativas das etapas construtivas de um TS.

2.10 - PRINCIPAIS DEFEITOS DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os pavimentos são estruturas complexas que envolvem muitas variáveis tais como: cargas de tráfego, solicitações ambientais, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais, etc. O pavimento representa uma parcela expressiva da infra-estrutura de transportes. Melhoramentos nos seus componentes podem resultar em grandes economias em termos absolutos. Assim, torna-se de grande importância o conhecimento do tipo e do nível de severidade dos defeitos para a execução das atividades de manutenção e reabilitação, dentro do Sistema de Gerência de Pavimento (SGP).

Portanto, deve-se dar ao pavimento toda atenção, através das técnicas de engenharia utilizadas em sua construção e manutenção, para mantê-lo em condições satisfatória se assim poder oferecer ao usuário segurança e conforto. Quando a estrutura do pavimento estiver de alguma forma ameaçada, algum tipo de reparo ou de reabilitação deve ser feito, para que o mesmo volte a oferecer aos usuários boas condições de rolamento e segurança.

Para MEDINA (1997), a identificação dos defeitos (trincas, panelas, afundamentos, exsudação, desgaste superficial, etc.) é o primeiro passo a tomar-se em

um projeto de restauração. Assim sendo, deve-se procurar associar a natureza dos defeitos às causas determinantes, tais como a intensidade e a extensão dos defeitos, fatores que afetam a integridade estrutural e/ou o desempenho funcional dos pavimentos.

Os defeitos mais freqüentes encontrados nos revestimentos do tipo tratamentos superficiais são decorrentes de causas que se localizam no próprio revestimento. Considerando-se apenas os defeitos resultantes de falhas no próprio revestimento, pode-se afirmar que eles podem decorrer de técnicas de execuções inadequadas, emprego de equipamento defeituoso, equipamento usado inadequadamente e, até mesmo, utilização de ligante e agregado de má qualidade. Alguns outros defeitos podem ser decorrentes da má qualidade dos materiais usados na construção das camadas inferiores do pavimento, na concepção errada do projeto e devido o pavimento encontrar-se no final de sua vida útil.

É difícil estabelecer uma única terminologia para os defeitos nos pavimentos (SANTANA, 1992). Alguns defeitos desenvolvem-se nas misturas asfálticas a quente, outros têm suas particularidades nos tratamentos superficiais e, até mesmo, nos pavimentos rígidos os defeitos podem surgir por razão estrutural ou funcional.

DOMINGUES (1993), em seu Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos, afirma que os defeitos de revestimento dos pavimentos podem ser diferenciados entre duas classes: classe estrutural e classe funcional. Os defeitos de classe estrutural estão associados à habilidade que o pavimento tem de transportar a carga de projeto. Já os defeitos de classe funcional estão associados às qualidades do rolamento e da segurança do pavimento. Deve-se salientar que os pavimentos com defeitos estruturais apresentarão, também, defeitos funcionais, enquanto que os pavimentos funcionalmente defeituosos podem estar estruturalmente corretos.

Para FORTES (1994), existe um grande inter-relacionamento dos diversos tipos de defeitos observados nos pavimentos em geral. O surgimento de determinado tipo de defeito muitas vezes está associado a um estágio avançado de outro tipo. Este fato torna a análise dos defeitos bastante complexa, com um número praticamente ilimitado de

possibilidades de relacionamento entre causa, ocorrência e evolução, dificultando a análise em separado de cada tipo.

Segundo LARSEN (1985), os defeitos manifestam-se conforme sua natureza, de várias maneiras e a diferentes idades do revestimento, desde os primeiros dias após a abertura ao tráfego até após vários anos de uso. No aparecimento de um determinado defeito no tratamento, nem sempre é fácil a identificação da sua causa que pode ser, inclusive, uma somatória de causas ou reação em cadeia de causas e efeitos.

Em São Paulo, FORTES (1994), NOGAMI e VILIBOR (1995) estudaram os defeitos de maior ocorrência nos pavimentos de baixo custo com uso de SAFL (Solo Arenoso Fino Laterítico) ligados a técnica construtiva inadequada, bem como no uso de materiais impróprios na execução do pavimento ou mesmo no final de sua vida útil. Esses defeitos foram relacionados ao revestimento, interface base-revestimento, suporte da camada do pavimento e outras ocorrências significativas. Esses pesquisadores enfocaram apenas os tratamentos superficiais. Isso deu pelo fato da grande maioria dos pavimentos de baixo custo no Estado de São Paulo (cerca de 95%) terem sido construídos em tratamento superficial duplo ou triplo na época dessa investigação.

Nesta dissertação serão analisados os defeitos que mais ocorrem nos tratamentos superficiais do estado do Ceará, dando-se especial atenção aqueles causados por falhas do próprio revestimento. Ressalta-se que algumas ocorrências não são propriamente defeitos do revestimento, mas estão associados ao final da sua vida útil. Serão apresentados os defeitos diretamente ligados a pista de rolamento, ou seja, todos os que influenciam diretamente no desempenho e conforto das rodovias revestidas com tratamentos superficiais. Na Tabela 2.12 apresentam-se os principais defeitos detectados nas rodovias do estado do Ceará, através de investigações realizadas pelo autor da presente dissertação.

A Tabela 2.12 foi elaborada partindo-se do defeito encontrado, de sua descrição, das causas mais prováveis de sua ocorrência, de sua possível evolução, de recomendações para sua correção, bem como de uma foto ilustrativa de cada defeito visualizado em campo.

Vale ressaltar que alguns defeitos apresentados na Tabela 2.12 não sugerem preocupações quanto à sua interferência na degradação do pavimento, por ser um defeito de estética, como por exemplo, juntas de construção defeituosas. Na grande maioria, se for feita a devida correção com brevidade, nenhum problema de maiores proporções afetará o pavimento. Não acrescentou-se as trincas por reflexão, por considerar-se que o fenômeno da reflexão de trincas não ocorre nos tratamentos superficiais. Convém observar que as trincas no tratamento superficial não decorrem de um problema de fadiga, mas sim devido à retração da camada de base, com a conseqüente ruptura, devido aos tratamentos acompanharem as deformações da base.

Tabela 2.12 - Principais defeitos detectados nas rodovias do Ceará.









DEFEITOS		DESCRIÇÃO	CAUSAS MAIS PROVÁVEIS	EVOLUÇÃO	CORREÇÃO	FOTO
Desagregação	Longitudinal (penteaduras)	Falhas longitudinais devido ao desprendimento do agregado	Altura da barra espargidora. Ângulo dos bicos. Bomba de ligante. Temperatura do ligante. Falha de bico	Perda de agregado pelo tráfego. Buraco. Panela.	Logo no início uma capa selante. Quando buraco ou panela, um remendo.	
	Do Revestimento	Desprendimento de partículas de agregado sob ação do tráfego e do intemperismo. São normalmente localizadas.	Adesividade ligante/agregado. Subdosagem do ligante. Excesso de agregado. Granulometria deficiente. Presença de pó/impurezas. Natureza/estado do substrato.	Buraco. Panela.	Remendo do revestimento	
Rejeição excessiva de agregado		Rejeição excessiva de agregado da última camada pela ação do tráfego.	Excesso de pó. Agregado úmido. Abertura imediata ao tráfego. Alta velocidade na abertura. Granulometria deficiente. Excesso de agregado. Subdosagem do ligante.	Textura rugosa. Exsudação.	Reposição do agregado da última camada. Capa selante	
Exsudação		Afloramento do ligante excessivo na superfície do revestimento. Ocorre em zonas localizadas ou faixas	Excesso de ligante	Escorregamento do revestimento. Arrancamento do revestimento.	Adicionar agregado. Capa selante ou tratamento superficial em grandes áreas.	

Tabela 2.12 - Principais defeitos detectados nas rodovias do Ceará (continuação).

DEFEITOS		DESCRIÇÃO	CAUSAS MAIS PROVÁVEIS	EVOLUÇÃO	CORREÇÃO	FOTO
Desgaste	Do Agregado	Tipos de agregados sujeitos sob a ação do tráfego, podendo sofrer arredondamento ficando c/ a superfície lisa	Utilização do agregado natural arredondado, liso e sem britagem. Agregado com baixa resistência abrasão.	Superfície derrapante quando molhada.	Capa selante. Micro-revestimento	
	Da Borda	Consiste no arrancamento do agregado situado nas bordas do revestimento	Arrancamento do agregado pelo tráfego nas rodovias estreitas ou sem acostamento	Danifica o revestimento.	Recuperar a borda reconstruindo o tratamento manualmente	
Superposição ou Encravamento		Taxa elevada de agregado por deficiência de dosagem ou técnica construtiva.	Taxa elevada de agregado. Deficiência de ligante. Técnica construtiva.	Corrugação do revestimento.	Novo tratamento. Grande remendo no revestimento	
Juntas de construção defeituosas.		Juntas longitudinais e transversais visíveis. É um defeito estético.	Execução deficiente. Recobrimento de ligante excessivo e agregado insuficiente. Superposição das juntas.	Exsudação. Prejudica a sinalização do eixo.	Colocar papel laminado para evitar a superposição.	
Corrugações		Pequenas ondulações formadas no sentido transversal	Distribuição do ligante. Bomba dosadora. Velocidade da bomba.	Ondulações transversais.	Aplicar agregado e ligante nas faixas deficientes, manualmente. Capa selante	
Rugosidade geométrica inadequada		Superfície demasiadamente lisa, apresentando baixa resistência a derrapagem.	Excesso de ligante. Baixa viscosidade ligante. Agregado inadequado.	Exsudação; Superfície derrapante.	Capa selante. Micro-revestimento	

2.11 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo definiu-se, classificou-se e apresentou-se as principais funções e aplicações dos tratamentos superficiais. Foram apresentados os materiais usados, os principais métodos de dosagens, os equipamentos utilizados e as técnicas construtivas adequadas para ter-se um tratamento de boa qualidade e sem imperfeições. Investigaram-se os principais defeitos encontrados nas rodovias cearenses, as definições desses defeitos, as causas mais prováveis, a evolução e as operações que possam corrigi-los.

No capítulo seguinte serão apresentadas as escórias de aciaria e as emulsões melhoradas por polímero SBS, suas características e importância para uso em tratamento superficial, uma vez que a presente dissertação busca investigar o comportamento desses materiais para execução dos tratamentos superficiais.

CAPÍTULO 3

CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS E EMULSÕES MELHORADAS POR POLÍMEROS NA ÁREA DE PAVIMENTAÇÃO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

É crescente a demanda por agregados para o uso em obras de engenharia e em particular para obras rodoviárias. A carência de agregados tradicionais, aliada às exigências e limitações ambientais impostas na construção de pavimentos, tornou imperativa a investigação cuidadosa de materiais alternativos, procurando-se com isso soluções técnicas mais econômicas e que minimizem os impactos ao meio ambiente (ROHDE *et al.*, 2003).

Juntamente com a carência de agregados para obras rodoviárias e com o surgimento da emulsão asfáltica RR-2C melhorada por polímero (RRP-2C), buscou-se nesta pesquisa estudar a viabilidade técnica e econômica das aplicações desses materiais em tratamentos superficiais.

Portanto, neste capítulo, por ser a escória de aciaria e a emulsão RRP-2C materiais a serem investigados e testados nessa dissertação, serão apresentadas suas características e importâncias para uso em tratamento superficial.

3.2 - A ESCÓRIA DE ACIARIA

3.2.1 - Processo de produção

A NBR 5019/82, define escória como sendo um produto líquido ou pastoso, produzido durante operações piro metalúrgicas, geralmente contendo sílica, o que a torna sólida à temperatura ambiente. A escória de aciaria pode também ser chamada de agregado siderúrgico, pois é um co-produto advindo da produção do aço.

Para IBS (2008), “o aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal, formando uma liga de ferro e carbono. O ferro é encontrado em toda crosta terrestre, fortemente associado ao oxigênio e à sílica. O minério de ferro é um óxido de ferro, misturado com areia fina. O carbono é também relativamente abundante na natureza e pode ser encontrado sob diversas formas. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro de um equipamento chamado alto forno. 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”.

“Mais de 20% da produção de aço do país provêm de usinas que operam fornos elétricos, cuja matéria-prima básica é a sucata ferrosa. Outras vias de produção de aço também utilizam a sucata como insumo metálico importante. Ressalta-se que a produção de aço à base de sucata é definida pelo volume disponível dessa última no mercado, o que, no Brasil, é ainda fator limitante devido ao baixo consumo de aço no país”. (IBS, 2008)

Segundo informações do IBS (2008), a siderurgia brasileira teve uma produção de janeiro a maio de 2008 correspondente ao que está apresentado na Tabela 3.1. A produção de aço bruto por processo está apresentado na Tabela 3.2. A produção de aço bruto da América Latina, que tem o Brasil como o maior produtor, corresponde ao que está apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.1 - Produção siderúrgica brasileira (IBS, 2008).

PRODUTO (t)	JAN/MAI		08/07	MAR	ABR	MAIO		08/07	ÚLTIMOS 12 MESES
	2008(*)	2007	%	2008	2008	2008(*)	2007	%	
Aço bruto	14.513,2	13.593,9	6,8	2.960,0	2.900,4	2.972,3	2.891,1	2,8	34.701,6
Laminados	10.913,8	10.386,8	5,1	2.212,6	2.200,3	2.215,5	2.189,2	1,2	26.377,1
Planos	6.412,4	6.424,2	0,2	1.316,3	1.269,0	1.281,7	1.325,7	3,3	15.679,5
Longos	4.501,4	3.962,6	13,6	896,3	931,3	933,8	863,5	8,1	10.697,6
Semi-acabados	2.672,7	2.284,6	17,0	557,4	565,6	548,6	542,3	1,2	6.210,5
Placas	1.855,7	1.465,8	26,6	366,1	394,0	363,9	336,9	8,0	4.325,8
Lingotes, blocos e tarugos	817,0	818,8	0,2	191,3	171,6	184,7	205,4	10,1	1.884,7
Ferro-gusa	15.202,0	14.193,9	7,1	3.080,6	2.958,1	3.125,9	2.987,9	4,6	36.579,0
Usina integradas	11.279,9	10.215,2	10,4	2.266,6	2.193,8	2.286,6	2.155,3	6,1	27.007,5
Produtores	3.922,1	3.978,7	(1,4)	814,0	764,3	839,3	832,6	0,8	9.571,5
Ferro-esponja	124,6	136,3	(8,6)	30,1	30,7	22,0	32,9	33,1	350,3

(*) Dados Preliminares.

Tabela 3.2 - Produção de aço bruto por processo (IBS, 2008).

PRODUTO (t)	JAN/MAI		08/07	MAR	ABR	MAIO		08/07	ÚLTIMOS
	2008(*)	2007	%	2008	2008	2008(*)	2007	%	12 MESES
ACIARIA									
Oxigênio (LD)/EOF	11.070,5	10.310,5	7,4	2.236,1	2.198,3	2.279,1	2.183,7	4,4	26.461,2
Elétrico	3.442,7	3.283,4	4,9	723,9	702,1	693,2	707,4	(2,0)	8.240,4
TOTAL	14.513,2	13.593,9	6,8	2.960,0	2.900,4	2.972,3	2.891,1	2,8	34.701,6
LINGOTAMENTO									
Convencional	821,4	965,0	(14,9)	155,8	185,3	175,2	210,4	16,7	2.084,7
Contínuo	13.674,1	12.611,5	8,4	2.800,8	2.711,8	2.792,2	2.676,7	4,3	32.573,1
AÇO P/FUNDIÇÃO	17,7	17,4	1,7	3,4	3,3	4,9	4,0	22,5	43,8

NOTA: Produção de Aço Bruto = Aço em Lingotes + Produtos de Lingotamento Contínuo + Aço para Fundição.

OBS: As estatísticas de Usinas incorporam as de Cosipa.

(*) Dados Preliminares.

Tabela 3.3 - Produção de aço bruto da America Latina (IBS, 2008)

PAÍS	JAN/ABR		08/07	MAR	ABRIL		08/07
	2008	2007	%	2008	2008	2007	%
BRASIL	11.540,9	10.702,8	7,8	2.960,0	2.900,4	2.707,8	7,1
MÉXICO	6.367,3	5.749,6	10,7	1.637,8	1.609,7	1.435,0	12,2
ARGENTINA	1.869,0	1.700,9	9,9	509,2	500,9	472,8	5,9
VENEZUELA	1.316,8	1.691,9	(22,2)	232,6	362,9	377,9	(4,0)
CHILE	579,1	556,2	4,1	148,0	143,9	142,6	0,9
COLÔMBIA	360,8	404,0	(10,7)	83,0	83,0	100,5	(17,4)
PERU	372,6	283,3	31,5	95,0	93,7	61,6	52,1
TRINIDAD-TOBAGO	127,0	219,3	(42,1)	16,3	16,3	63,4	(74,3)
AMÉRICA CENTRAL	126,4	123,5	2,3	31,5	31,5	20,5	53,7
CUBA	92,3	91,5	0,9	24,3	24,3	27,1	(10,3)
PARAGUAI	28,6	29,8	(4,0)	6,7	6,6	6,3	4,8
EQUADOR	27,6	29,7	(7,1)	6,6	7,2	6,4	12,5
URUGUAI	23,5	19,6	19,9	6,5	8,2	6,7	22,4
TOTAL	22.831,9	21.602,1	5,7	5.757,5	5.788,6	5.428,6	6,6

A siderurgia é dividida em dois grandes 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). A segunda é mais atuante por possuir uma matéria-prima de menor custo, mais disponível e, ainda, ser reciclável.

A utilização da sucata é ainda superior porque esta apresenta melhores características mecânicas se comparada com as outras matérias-primas utilizadas no processo de produção do aço. Isto ocorre devido à maior porcentagem de elementos químicos, tais como: cobre, níquel, cromo e estanho nas sucatas que ficam presentes nas escórias (MAIA, 2002; BELGO, 2009). A Figura 3.1 mostra o processo simplificado da produção do aço.

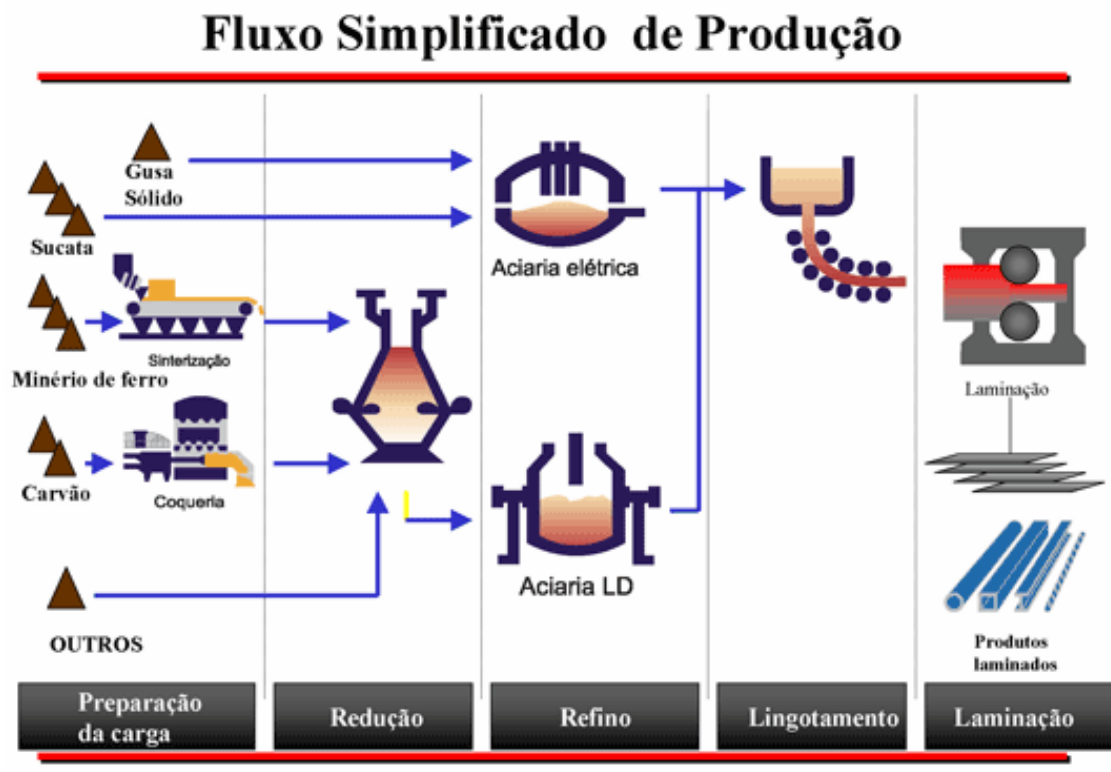


Figura 3.1 - Fluxo simplificado da produção de aço (IBS, 2008).

Nos processos de produção do aço são gerados diversos tipos de escória. Basicamente existem três processos, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (Open Heart – OH), o conversor a oxigênio (Linz e Donawitz – LD ou Blast Oxygen Furnace - BOF) e o forno elétrico a arco (Electric Arc Furnace).

Os dois processos mais utilizados mundialmente são: (a) o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco e (b) o de refino do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio. A utilização de fornos do tipo Siemens-Martin está em declínio, não ocorrendo no Brasil (ROHDE, 2002).

Segundo FILEV (2003), a escória de aciaria é resultado da agregação de diversos elementos que não interessam estar presentes no material aço. Tem como características marcantes ser composta de muitos óxidos, como CaO e MgO e ser expansível, devido às reações químicas desses óxidos. As limitações encontradas no material são basicamente: heterogeneidade, alto teor de cal livre e a ausência de atividade hidráulica.

A composição química da escória é função da matéria prima, da tecnologia de produção do aço e até mesmo do revestimento do alto forno. A Tabela 3.4 mostra a composição dos principais elementos das escórias de convertedor (LD) e de forno elétrico (EAF).

Tabela 3.4 - Comparação das escórias produzidas por vários tipos de forno (FILEV, 2003).

TIPO		COMPOSIÇÃO (%)							
		Si O ₂	CaO	Al ₂ O ₃	FeT	MgO	S	MnO	TiO ₂
Escória de Convertedor (LD)		13,8	44,3	1,5	17,5	6,4	0,07	5,3	1,5
Escória de Forno Elétrico (EAF)	Escória Oxidada	19,0	38,0	7,0	15,2	6,0	0,38	6,0	0,7
	Escória Reduzida	27,0	51,0	9,0	1,5	7,0	0,50	1,0	0,7

SILVA *et al.*, (2007) citam que a escória do tipo LD apresenta elevada resistência ao desgaste, aliada a uma textura rugosa e morfologia cúbica, módulo de resiliência 43% superior ao da brita de basalto e 74% superior ao da brita de granito e boa adesividade para CAPs e emulsões.

“O processo siderúrgico gera, em média, no Brasil, 450 kg de co-produtos e resíduos por tonelada de aço produzida, índice que tem variações em função da rota tecnológica de produção, e que já foi superior a 700 Kg. Desse total, as escórias representam 70%. O setor desenvolve, continuamente, pesquisas para utilização desse material e alguns usos já se encontram amplamente disseminados como a produção de cimento e pavimentação” (IBS, 2008).

No entanto, apesar das diversas aplicações, as escórias ainda são enquadradas como resíduos, competindo em bases desiguais com materiais aos quais podem substituir em condições ambientalmente mais favoráveis. Isto ocorre devido à falta de normalização e às restrições não fundamentadas impostas por alguns órgãos ambientais, o que desestimula potenciais consumidores ou desvaloriza seu preço no mercado (IBS, 2008).

3.2.2 - Produção de agregado siderúrgico no Estado do Ceará.

No Ceará são produzidas em torno de 120.000 toneladas de aço por ano, resultando deste total, 15,0% em massa de escória de aciaria, conforme informações obtidas pela Multiserv, em novembro de 2009.

A única siderúrgica instalada no estado do Ceará é a Gerdau Cearense S.A, fundada em 1982, localizada no município de Maracanaú, a uma distância de aproximadamente 30 km da cidade de Fortaleza. Essa empresa utiliza o processo EAF em seu refino. O fluxo de produção da Gerdau cearense S.A é mostrado na Figura 3.2.

“A Gerdau Cearense S.A. utiliza como matéria-prima a sucata ferrosa e o ferro gusa, aproximadamente 90,0% e 10,0% de cada, respectivamente. A sucata é colocada em um pátio onde a mesma é separada e prensada (para o caso da sucata leve) ou cortada (para o caso da sucata pesada), com o intuito de reduzir o volume. Posteriormente este material é colocado em cestões com capacidade para dez toneladas e conduzido para os fornos através de pontes rolantes. A matéria-prima é então fundida em dois fornos” (CASTELO BRANCO, 2004).

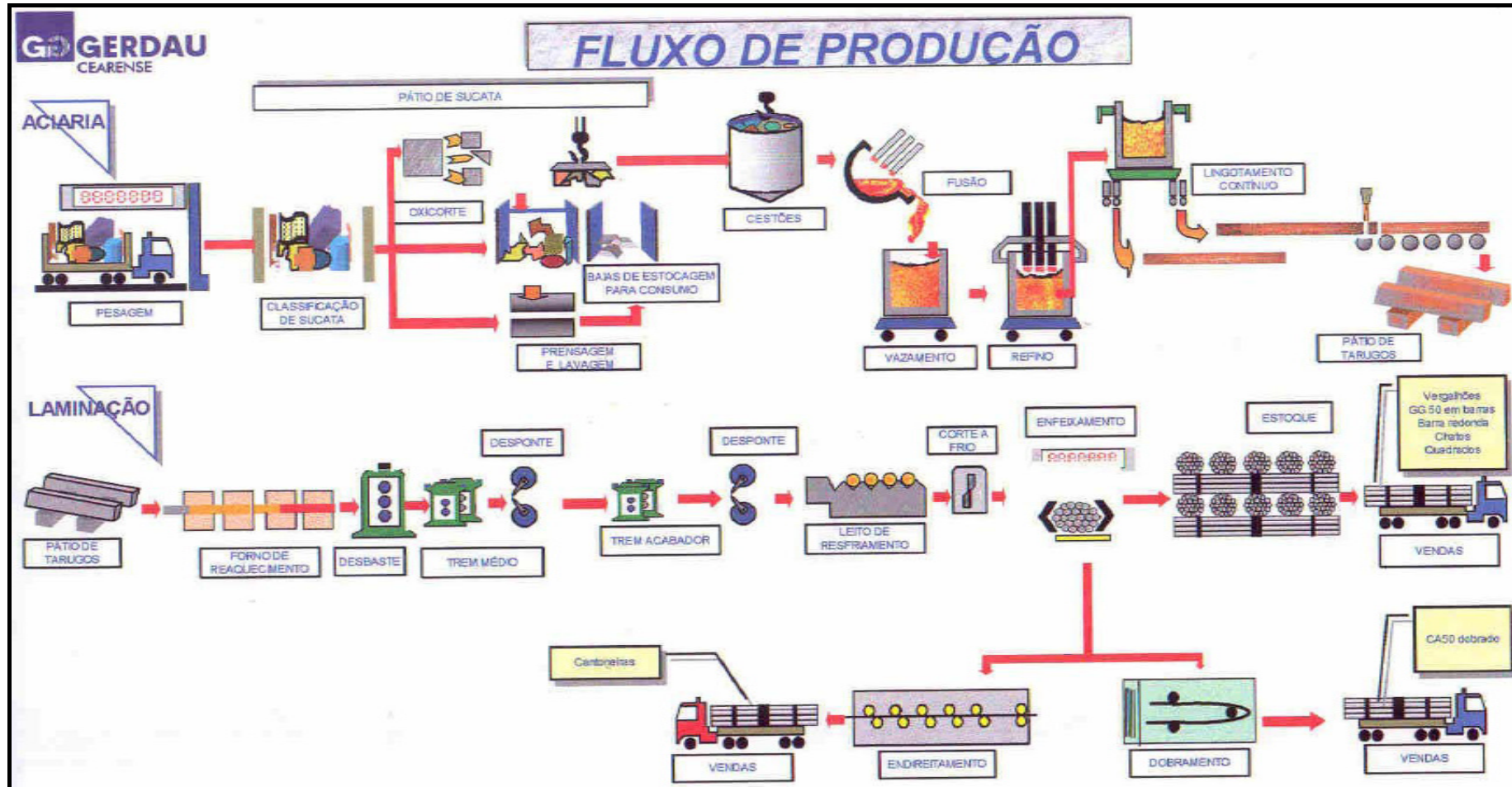


Figura 3.2 - Fluxograma da produção do aço pela Gerdau Cearense (CASTELO BRANCO, 2004).

“No primeiro, forno elétrico, são feitas adições de grafite, carbono e oxigênio e é gerada a escória de refino oxidante. Neste forno são gerados em torno de 80,0% da escória produzida. No segundo, forno panela, são feitas adições de ligas ferro-silício, ferro-manganês e cal (com a finalidade de absorver e neutralizar os óxidos ácidos que seriam responsáveis por ataques ao forno) e é gerada a escória de refino redutor. Essas adições são também feitas para ajustar a composição química do aço. As etapas para separação da matéria-prima, bem como os fornos da Gerdau Cearense S.A. estão mostradas na Figura 3.3” (CASTELO BRANCO, 2004).



Pilha de matéria-prima (sucata).



Pátio de separação da matéria-prima.



Forno de arco elétrico.



Forno panela.

Figura 3.3 - Fornos utilizados no processo de beneficiamento do aço, Gerdau Cearense S.A. (CASTELO BRANCO, 2004).

3.2.3 - A expansibilidade das escórias de aciaria e sua estabilização

SILVA *et al*, (2007) afirmam que a escória de aciaria é caracterizada por elevada densidade, baixa absorção de água e coloração predominante cinza claro. A escória de aciaria LD possui CaO e MgO, livres em sua composição, que durante o processo de envelhecimento envolvem reações de hidratação e carbonatação que resultam em expansão volumétrica.

Alguns problemas podem surgir nos pavimentos executados com a utilização de escórias provocados pela sua expansão volumétrica. Esses problemas são causados, principalmente, pela hidratação do óxido de cálcio (CaO) e do óxido de magnésio ou periclásio (MgO). Os agentes que provocam a estabilização das escórias de aciaria são a água e o ar atmosférico, através de reações de hidratação e carbonatação dos óxidos CaO e MgO acima mencionados, transformando-os em hidratos e carbonatos estáveis (CAMARGO et al., 2007). A Figura 3.4 mostra um trecho pavimentado onde ocorreu expansão da escória de aciaria.



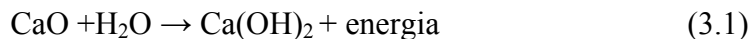
Erupções na pista

Pavimento trincado

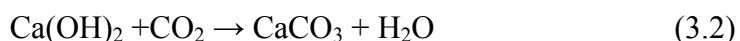
Figura 3.4 - Pavimentos que ocorreu a expansão da escória (CASTELO BRANCO, 2004).

No caso do CaO, a expansão pode ser de até 99% em volume e 55% em superfície e o MgO livre pode expandir até 120% em volume. A expansão nas escórias pode formar trincas radiais, fissurações longitudinais irregulares e descontínuas generalizadas, solevações longitudinais e transversais traduzidas por protuberâncias e deslocamentos rotacionais refletindo na camada do CBUQ. Esses defeitos ocorrem, segundo o Instituto de Engenharia da Pensilvânia – EUA, quando não é atendido o seu percentual de expansão máximo de 3,0% pelo ensaio PTM-130. A ASTM C 1260 preconiza um índice de expansão de no máximo 0,10% para que o agregado seja considerado não reativo (RAPOSO, 2005).

“O CaO se apresenta livre ou combinado na forma de silicatos ou em solução sólida, sendo que a forma livre é a que desenvolve a expansão no material e alcança teores de até 10% do total de CaO. O CaO livre se expande durante a sua transformação em hidróxido de cálcio, conforme a equação (3.1), causando desagregação do material e um aumento de volume de 99,4% em relação ao CaO” (RAPOSO, 2005).



Embora seja em menor escala, ocorre também a formação de CaCO_3 (aragonita ou calcita) por carbonatação do Ca(OH)_2 , conforme a equação (3.2), gerando um aumento de volume de 11% em relação ao hidróxido de cálcio (OKAMOTO *et al.*, 1981 *apud* RAPOSO, 2005).



“A expansão devida ao CaO é influenciada por fatores como o teor e o tipo de CaO, à porosidade e o tamanho dos grãos da escória de aciaria. Quanto maior a porosidade, mais superfície é exposta e mais rápida será a hidratação do CaO. Diferentes fatores alteram a porosidade da escória de aciaria, como o fluxo de gás liberado durante o resfriamento, que forma canais internos na escória de aciaria” (WACHSMUTH *et al.*, 1981; PENA, 2004).

“O tamanho dos grãos de escória de aciaria é também importante, pois com a redução da granulometria, mais superfície é exposta, possibilitando uma hidratação mais rápida do CaO. Além disso, as frações menores que 8 μm apresentam maiores teores de cálcio e menores teores de ferro, quando comparadas às frações mais grossas, possibilitando uma maior expansão dessas frações” (GEYER, 2001; PENA, 2004).

O óxido de magnésio (MgO) contido na escória de aciaria LD é proveniente do uso da dolomita no forno, utilizado para minimizar o desgaste do revestimento refratário, e do próprio material refratário desgastado, podendo chegar a um teor total de até 10% na escória de aciaria LD. O MgO se apresenta na forma livre (periclásio), propicia à expansão, e também quimicamente combinado ou em solução sólida, em geral apresentando comportamento estável (MACHADO, 2000; THOMAS, 2000; SBRIGHI e BATTAGIN, 2002; ROHDE, 2002).

“O periclásio origina-se, principalmente, da dissolução incompleta da dolomita durante o refino. Este composto normalmente se forma quando existem teores maiores que 3% de MgO total na escória de aciaria, o que ocorre na maior parte das aciarias.

Para controlar o problema, pesquisadores sugerem que o tamanho do grão seja o menor possível, para facilitar a dissolução e a reação completa desse óxido” (PENA, 2004).

A reação expansiva de hidratação do MgO na forma de periclásio forma o hidróxido de magnésio (brucita), conforme a equação (3.3), um composto que tem variação de volume de 119,5% em relação ao MgO (MACHADO, 2000; SBRIGHI e BATTAGIN, 2002).



O periclásio causa uma expansão mais tardia que a expansão ocasionada pelo óxido de cálcio livre, visto que o periclásio se hidrata mais lentamente, expandindo por um longo período de tempo (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; CASTELO BRANCO, 2004; PENA, 2004).

A expansão devida ao óxido de magnésio, a exemplo do que ocorre com o CaO, é também influenciada por fatores como o teor e tipo da espécie na escória de aciaria, a porosidade e o tamanho dos grãos. Além das reações com o CaO e MgO, a corrosão e a oxidação do ferro metálico residual e a mudança na forma alotrópica do C2S também são responsáveis, em menor escala, pela expansão da escória de aciaria (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; CASTELO BRANCO, 2004; PENA, 2004).

Ocorre, no entanto, que as escórias de aciaria são depositadas em pilhas, nos pátios descobertos das siderúrgicas. Assim, quando a água de chuva cai sobre uma pilha de escória, a água reage com os óxido CaO e MgO fazendo com que se forme uma película que dificulta a penetração da água nas camadas mais profundas da pilha. Portanto, em geral a estabilização das escórias apresenta variações em função da profundidade do material empilhado. Não existe um consenso acerca do período necessário para que as escórias de aciaria, expostas ao tempo, se estabilizem.

Enquanto algumas literaturas determinam 6 meses, outras determinam de 1 a 2 anos para que ocorra a estabilização. A diferença entre as condições de estabilização do exterior e do interior das pilhas de escórias de aciaria é um dos principais fatores que

resultarão em problemas na pavimentação. Segundo alguns pesquisadores pode-se assumir, erroneamente, que o material já esteja estabilizado após o período de 6 meses ou 1 ano.

Entretanto, a estabilização da escória inicia-se desde o processo do seu resfriamento, cujas propriedades físicas características - densidade, granulometria e propriedades estruturais – variam com a maneira como é feito o resfriamento deste resíduo. Pode ocorrer grande variação na composição das escórias, mesmo sendo produzidas em uma mesma indústria (RUBIO e CARRETERO, 1991). Ao sair do forno à temperatura próxima de 1500 °C a escória fundida pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento (ROHDE, 2002).

A escória pode ser resfriada naturalmente ao ar. Dessa forma, os óxidos componentes da escória se cristalizam e perdem as características hidráulicas, podendo-se considerá-las inertes. A escória solidificada apresenta estrutura vesicular, textura superficial rugosa e maior superfície específica quando comparada aos agregados mais lisos, favorecendo a aderência com material betuminoso e cimento (MASUERO, 2001).

Caso sofra resfriamento rápido, a escória é previamente expandida através da aplicação de uma quantidade controlada de água. Devido à ação da água e do vapor gerado, a escória incorpora ar e expande, apresentando uma estrutura alveolar e baixa massa específica, sendo denominada escória expandida. A escória expandida apresenta maior porosidade e densidade que a escória resfriada ao ar (MASUERO, 2001).

Outra forma de resfriamento gera a escória granulada, obtida por resfriamento brusco, através de fragmentação por jato d'água, seguido por resfriamento em tanque com água, onde se granula. Dessa maneira, obtém-se uma escória vítrea, com estrutura porosa, textura áspera e granulometria semelhante à da areia de rio, ocorrendo pouca ou nenhuma cristalização (MACHADO, 2000). As escórias de aciaria no Brasil são resfriadas ao ar em um processo lento, recebendo pequenos jatos d'água para auxiliar no processo logo que chegam nos pátios de escória.

3.2.4 - Breve relato da aplicação da escória de aciaria como agregado em pavimentação

SILVA (1994) e SILVA e MENDONÇA (2001) *apud* CASTELO BRANCO (2004), informam que desde 1979 a escória de aciaria vem sendo utilizada na infraestrutura de estradas em países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá. No Brasil, este uso teve início em 1986 com a execução de 100 km de base e sub-base no estado do Espírito Santo. Países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia utilizam escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos.

Para CAMARGO *et al.*, (2007), o emprego da escória de aciaria como agregado em concreto asfáltico a quente já é normalizado no Japão, desde 1979. As normas japonesas prevêm a produção de escórias para pavimentação através de diferentes formas de estabilização e com diferentes granulometrias, para emprego em pavimentação rodoviária. No Brasil, o DNER desenvolveu a normalização EM 262/1994, que especifica a utilização de escórias em pavimentos flexíveis.

Na Europa, em 1982, foram produzidas, aproximadamente, 9×10^6 toneladas de escória, o que alertou para o fato de que este material deveria ser reutilizado para muitos outros fins, além de matéria-prima para a indústria de fertilizantes (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004).

A escória de aciaria tem sido utilizada em um número crescente de aplicações nos últimos tempos. Entre as suas diversas aplicações, destacam-se o emprego como agregado para pavimentação, tanto participando da mistura asfáltica como para base e sub-base, agregado para construção de leito para estrada de ferro, estabilização de solos, além de ser empregada como fertilizante, matéria-prima na indústria de vidro e vitro-cerâmica, matéria-prima para produção de cimentos e agregado na produção de concreto. Atualmente, no Brasil, apenas 35% da escória de aciaria elétrica gerada é utilizada, especialmente como agregado para construção de estradas, sendo o restante estocado (IBS, 2008). A procedência deste rejeito, em relação ao campo de aplicação da mesma, pode ser visualizada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Campo de aplicação das escórias de diferentes origens (GEYER, 2001; CASTELO BRANCO, 2004).

CAMPO DE APLICAÇÃO	PROCEDÊNCIA DA ESCÓRIA		
	ACIARIA	ALTO-FORNO	FERRO LIGA
Ferroviário	X		
Rodoviário	X	X	X
Construção Civil	X	X	X
Fábrica de Cimento	X	X	X
Metalúrgico	X	X	

SILVA (1994) *apud* CASTELO BRANCO (2004) avaliou misturas de escória, argila e areia (em várias proporções) em sub-bases, bases e em misturas asfálticas a frio (faixas C do DER-SP e B3 da Ipiranga). A mistura com solo argiloso do tipo A-7-6, foi indicada para combater a expansão do rejeito nas camadas de base e sub-base. Neste estudo foram utilizadas emulsões de RL-1C e RM-1C. A mistura que utilizou a faixa C do DER-SP apresentou maior estabilidade Marshall quando comparada com a mistura na faixa B3 da Ipiranga.

FARRAND e EMERY (1995) *apud* CASTELO BRANCO (2004) utilizaram a escória de aciaria como agregado em misturas asfálticas em rodovias americanas. O desempenho dos pavimentos foi considerado satisfatório, porém os autores recomendam o controle tanto da produção do material (para evitar a alta heterogeneidade), quanto do potencial expansivo do mesmo.

LIMA *et al.*, (2000) compararam dois pavimentos, sendo um revestido com CBUQ e outro com TSD, com dois outros pavimentos revestidos com Brita Graduada Simples (BGS) e Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). Todos os pavimentos foram construídos com utilização de escória de aciaria nas camadas de base e sub-base. Os autores concluíram que pavimentos com revestimentos delgados, tipo tratamento superficial, feitos com a utilização de escória de aciaria são equivalentes aos espessos executados com agregados convencionais.

SILVA e MENDONÇA (2001) apresentaram a dosagem Marshall de uma mistura asfáltica do tipo CBUQ utilizando 97,0% de escória de aciaria com graduação menor do que 12,5 mm, filler calcário e CAP 20. A mistura foi enquadrada na faixa C do DNER e a escória utilizada foi envelhecida durante mais de 3 anos, o que lhe conferiu expansão (1,83%) abaixo do limite estabelecido pela norma do DNER (EM 262/94) que é de 3%.

No estado do Ceará, alguns estudos foram desenvolvidos com uso de escória de aciaria. Podem ser citados os trabalhos de CASTELO BRANCO (2004) e SANTOS NETO (2007). CASTELO BRANCO (2004), dimensionou um trecho na região metropolitana de Fortaleza, entre os municípios de Pajuçara e Pacatuba (CE – 060). Para a realização do seu trabalho, CASTELO BRANCO (2004) substituiu o revestimento utilizado no trecho (CBUQ convencional) por misturas investigadas em sua pesquisa. As misturas escolhidas para as análises foram com 60 % e 40% de escória no revestimento em CBUQ. Essa autora concluiu que a escória de aciaria objeto de sua pesquisa apresentou possibilidade de uso em revestimentos asfálticos.

SANTOS NETO (2007) avaliou o potencial do uso da escória de aciaria misturada com solo de má qualidade. Os resultados obtidos apresentaram melhores características mecânicas com o uso de escória de aciaria na mistura do que com brita convencional. Segundo SANTOS NETO (2007), “para distâncias de até 70 km entre a Gerdau e a obra, o uso da escória se mostra mais econômico”.

Escolheu-se a escória de aciaria como um dos produtos a ser usado nesta pesquisa, levando-se em considerações todos os estudos e experiências expressos neste capítulo, por acreditar ser um agregado com qualidades satisfatórias para uso em tratamento superficial. Foi usado, concomitantemente, com a escória de aciaria, a emulsão asfáltica RR 2C melhorada por polímero.

3.3 - OS ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMERO

Os asfaltos modificados por polímero tem sido usados frequentemente nas construções e manutenções das rodovias, com o objetivo de obter-se uma melhor

qualidade do revestimento, no que diz respeito ao conforto e segurança dos usuários.

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas (BERNUCCI *et al.*, 2007). É sabido que o transporte de carga vem sofrendo constantes alterações em seus limites de peso por carga transportada. Devido a essas cargas mais pesadas e conseqüentemente ao aumento na pressão dos pneus, os pavimentos asfálticos têm sofrido desagregação precoce. Devido a tal problema, viu-se a possibilidade de melhorar os revestimentos asfálticos com a adição de polímeros ao ligante (LEWANDOWSKI, 1994; LEITE, 1999; ODA, 2000).

Para BERNUCCI *et al.*, (2007), o grau de melhoria e modificação do ligante e o seu custo, dependem das necessidades do local onde será aplicado, considerando-se o tipo de obra (nova ou reforço), as variações térmicas e cargas mecânicas às quais o trecho estará submetido, o potencial para deformação permanente ou fadiga, etc. Como o asfalto é um material termoviscoelástico, suas características vão influenciar diretamente no desempenho das misturas asfálticas, tanto de deformação permanente quanto de fadiga.

Segundo BERNUCCI *et al.*, (2007), na Europa, particularmente na Alemanha, misturas asfálticas feitas com asfalto modificado por polímero foram introduzidas na década de 1970. Na Itália foram executados revestimentos asfálticos com polietileno adicionado na própria usina misturadora.

Ainda segundo BERNUCCI *et al.*, (2007), no Brasil, a utilização de ligantes modificados por polímero deu-se a partir de 1974, quando uma primeira experiência com CAP modificado com resina epóxi foi aplicada em um trecho de 275m na BR-116, entre Rio Janeiro e São Paulo. Logo em seguida foi feita uma aplicação, na ponte Rio - Niterói, de asfalto com 15% de resina epóxi líquida com 40% de extrato aromático e mais um reticulador. Posteriormente, foi feita uma aplicação com látex introduzido diretamente no tambor misturador da usina de concreto asfáltico, no Aeroporto Santos Dumont, em um pequeno trecho na Avenida Atlântica e outro na Avenida Brasil, todos no Rio de Janeiro.

Trabalhos pioneiros envolvendo mistura de asfalto com polímero foram efetuados, também, pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER no Rio de Janeiro, em 1990. O DNER recobriu um trecho de cerca de 300 m da Rua Leopoldo Bulhões com mistura asfáltica com asfalto modificado por copolímero SBS e outros 300 m com asfalto modificado por copolímero EVA, e comparou com trechos onde foram usados ligante tradicional (RAMOS *et al.*, 1995).

Na forma de emulsão asfáltica modificada por polímero, a primeira experiência, na década de 1980, foi para uso em lama asfáltica e pintura de ligação no Autódromo de Jacarepaguá. Nesse mesmo autódromo foi feita uma segunda aplicação de mistura asfáltica com polímero SBS entre 1996 e 1997, utilizando asfalto com SBR para a pintura de ligação (PINTO e FARAH, 1983 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2007).

A companhia Ipiranga, em seu segmento dedicado a asfaltos, também investiu no asfalto-polímero, e desde 1997 está comercializando asfaltos modificados por SBS (BERNUCCI *et al.*, 2007). A Petrobras iniciou a comercialização de asfaltos modificados por SBS e SBR a partir de 1998 (LEITE, 1999).

A Tabela 3.6 mostra em termos qualitativos as influências de vários tipos de modificadores de asfalto no comportamento da mistura asfáltica no pavimento ao longo da vida útil, considerando defeitos de deformação permanente, fadiga, trincas térmicas, envelhecimento e adesividade (SHELL, 2003).

Tabela 3.6 - Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto. (modificado de Shell, 2003 apud BERNUCCI et al., 2007).

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas de Fadiga	Dano por Umidade	Envelhecimento
Elastômeros	*	*	*		*
Plastômeros	*				
Borracha de pneu	*	*	*		*
Negro-de-fumo	*				*
Cal				*	*
Enxofre	*				
Modificadores químicos	*				
Antioxidante					*
Melhorador de adesividade				*	*
Cal hidratada				*	*

(*) Símbolo significa que há benefício.

Segundo JUVÊNCIO (2001), os polímeros em geral agrupam-se em duas categorias, nos elastômeros termoplásticos e nos plastômeros termorrígidos. Os elastômeros termoplásticos são aqueles que se liquefazem e tornam-se maleáveis recuperando sua forma quando aquecidos. Apresentam cadeias lineares, todavia, podem ser também ramificadas. Destacam-se entre os elastômeros termoplásticos os blocos de copolímeros do tipo SBS, SIS e SRB. Os plastômeros termorrígidos são aqueles que formam uma cadeia tridimensional rígida e dura, não recuperando sua forma quando aquecidos. Entre os plastômeros incluem o EVA, polietileno, polipropileno e as poliolefinas.

Para BERNUCCI *et al.*, (2007), não basta conhecer somente o nome genérico do polímero, pois muitos deles têm apresentação comercial diferenciada, tanto na formulação e obtenção das cadeias como na forma de apresentação (se granulado grosso ou fino, pó fino, líquido etc). O copolímero SBS é comercializado tanto em forma de pó como em grânulos. O polímero SBR, em geral, é em forma de látex, e o EVA e o LDPE (polietileno de baixa densidade) em grânulos. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram as representações esquemáticas de alguns desses polímeros.

emulsão RR – 2C melhorada por polímero SBS para ser aplicada em tratamento superficial com agregado siderúrgico. Apresenta-se na Tabela 3.7 as especificações de asfalto polímero SBS (ANP, 2007 *apud* BERNUCCI *et al.* 2007).

Tabela 3.7 - Especificação asfalto polímero SBS (BERNUCCI et al. 2007).

Tipo					
Grau (Ponto de amolecimento mín./ Recuperação elástica a 25°C mín.) (°C/%)	Método ABNT	50/65	55/75	60/85	65/90
Ensaio na amostra virgem					
Penetração 25°C, 5s, 100g. 0,1mm	NBR 6576	45-70	45-70	40-70	40-70
Ponto de amolecimento, mín., °C	NBR 6560	50	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 RPM, máx., cP	NBR 15184	1.500	3.000	3.000	3.000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 RPM, máx., cP	NBR 15184	1.000	2.000	2.000	2.000
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 RPM, máx., cP	NBR 15184	500	1.000	1.000	1.000
Ponto de fulgor, mín., °C	NBR 11341	235	235	235	235
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, mín., %	NBR 15086	65	75	85	90
Recuperação elástica a 4°C, 10cm, %	NBR 15086	anotar	anotar	anotar	anotar
Ensaio no resíduo após RTFOT					
Varição de massa, máx. %	NBR 15235	1	1	1	1
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	6	7	7	7
Redução do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	3	5	5	5
Porcentagem de penetração original, mín.	NBR 6576	60	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	NBR 15086	80	80	80	80

3.4 - AS EMULSÕES ASFÁLTICAS CATIÔNICAS

Para o IBP (1978) e ABEDA (2001), emulsão asfáltica é um sistema constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou de uma fase aquosa em uma fase asfáltica (inversa), de pequenas partículas de um líquido em outro líquido. Assim, a emulsão pode ser formada por dois líquidos não miscíveis onde geralmente a fase contínua é a água.

Para o IBP (1978), as emulsões são obtidas a partir da mistura, em meio intensamente agitado, de asfalto aquecido, água e agentes emulsificantes os quais envolvem as partículas com cargas elétricas iguais, mantendo a solução sem coagulação. Os emulsificantes têm a finalidade de dar estabilidade à mistura, favorecer a dispersão, revestir os glóbulos de asfalto com película protetora e conferir a estes carga elétrica.

Segundo a SHELL (2003), emulsões betuminosas são sistemas bifásicos que consistem em betume, água e um ou mais aditivos para ajudar na formação e estabilização, e modificar as propriedades da emulsão.

3.4.1 - Processo de produção das emulsões

Segundo a ABEDA (2001), pode-se dizer que a produção em escala industrial das emulsões asfálticas, teve início na França, na cidade de Lutterbach, em 1905, com o químico Emile Feigel. Foi em 1951 que a ESSO, na França, deu um passo importante na utilização desse produto, quando colocou à disposição no mercado as emulsões catiônicas.

No Brasil, o desenvolvimento das emulsões asfálticas catiônicas trouxe vantagens indiscutíveis para a evolução das técnicas de pavimentação e, principalmente, para os serviços de conservação. Segundo a ABEDA (2001), a emulsão foi introduzida no Brasil em 1962, por uma empresa brasileira através do engenheiro químico Jean Claude Vogt, e posteriormente seu emprego foi disseminado através de outros renomados técnicos, entre eles: os engenheiros João Bento Jácome Lopes, Johannes Larsen e Carlos Alberto da Silva Paranhos. MELO (1978) afirma que no Nordeste as emulsões vêm sendo usadas desde 1968. A Figura 3.7 mostra as fábricas de emulsões asfálticas existentes no Brasil.

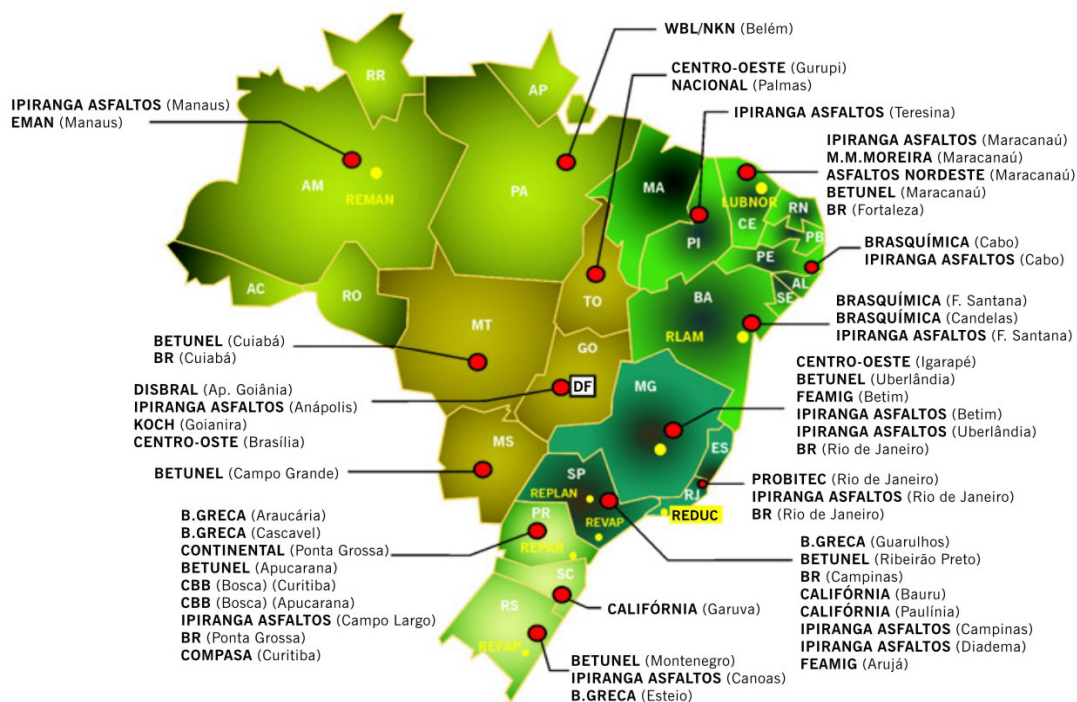


Figura 3.7 - Fábricas de emulsões asfálticas (ABEDA, 2001).

As emulsões asfálticas são produzidas, conforme ABEDA (2001), pelo processo de emulsificação, sendo necessário que se promova a quebra do CAP em partículas micrométricas e que o mesmo fique disperso no meio aquoso. Na emulsificação, estes componentes são introduzidos em um mecanismo conhecido como moinho coloidal que cisalha o asfalto em pequenos glóbulos. Para promover o cisalhamento do CAP são aplicadas energias térmica e mecânica, obtendo-se uma emulsão de asfalto em água, bem homogênea. Na Figura 3.8 mostra-se a representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação da emulsão.

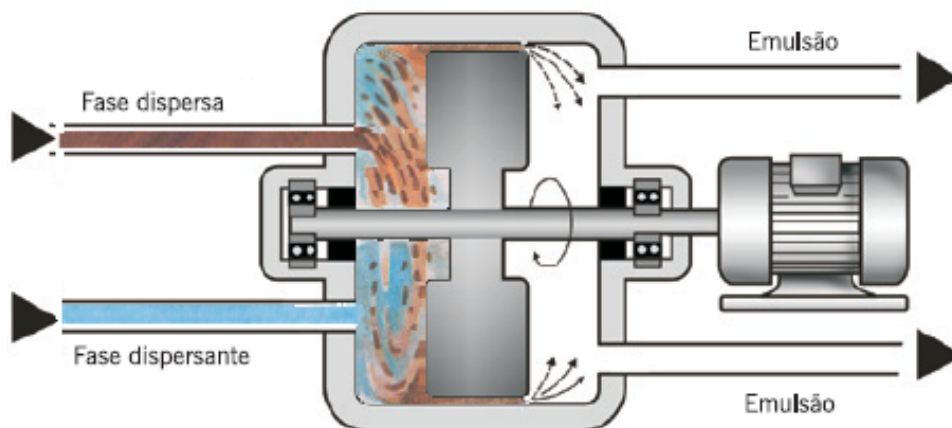


Figura 3.8 - Esquema de um moinho coloidal (BERNUCCI et al., 2007).

Para o IA (1989), o aquecimento é uma maneira de liquefazer o cimento asfáltico para uso em construção. O asfalto tem que ser liquefeito antes de bombeá-lo através de tubulações, de misturá-lo ao agregado ou espalhá-lo através dos bicos da barra distribuidora. Quando o cimento asfáltico esfria, torna-se um material aglutinante semi-sólido. Existem, no entanto, outros modos de liquefazer o asfalto para as operações de construção. Pode-se dissolvê-lo em solventes de petróleo apropriados ou emulsioná-lo com um agente emulsificador e água. O asfalto liquefeito por esses métodos é conhecido como asfalto diluído (ou dissolvido) e asfalto emulsionado (ou emulsão asfáltica).

Diz-se que a água é a fase contínua e os glóbulos de asfalto são a fase descontínua (IA, 1989). O emulsificante, que é um agente tenso-ativo, mantém os glóbulos em uma suspensão estável além de definir a estabilidade à ruptura. O resultado é um produto líquido com consistência que pode ser usado em processos a frio de construção e manutenção de estradas. Na Figura 3.9, apresenta-se um esquema simplificado de produção da emulsão asfáltica catiônica.

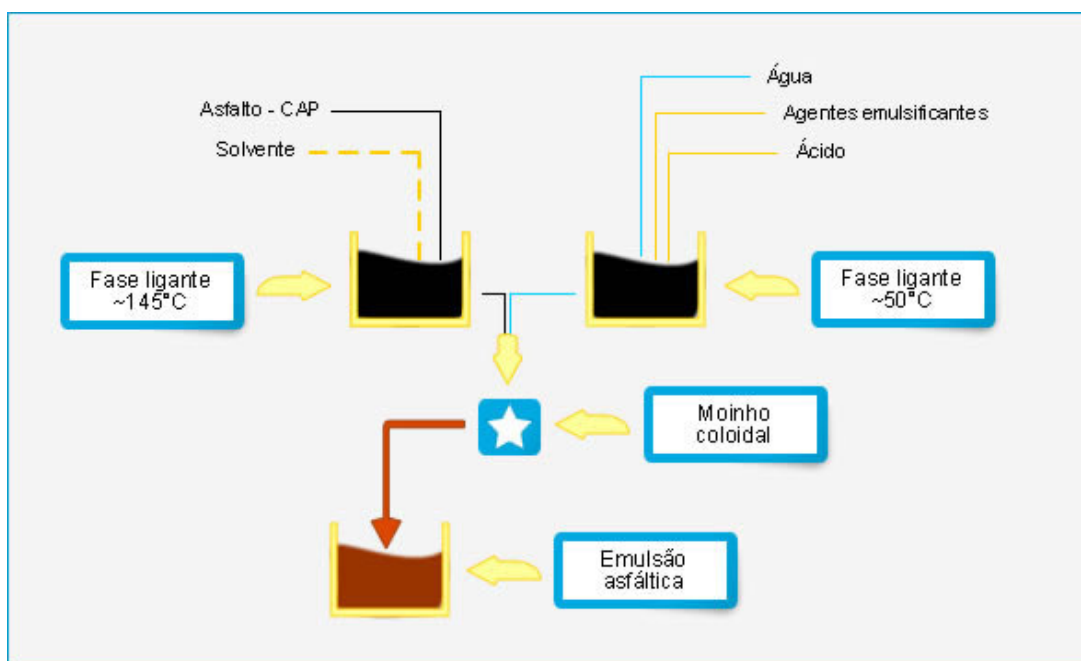


Figura 3.9 - Esquema básico de produção de emulsão asfáltica catiônica (ABEDA, 2005).

Assim, normalmente, o cimento asfáltico é aquecido a uma temperatura que varia entre 140 a 145°C e a fase água, a uma temperatura que varia entre 50° a 60°C, na

qual já se encontram previamente dissolvidos os agentes emulsificantes. O principal propósito desses agentes é evitar que as partículas de asfalto se aglomerem, mantendo as duas fases em equilíbrio durante um período de tempo que pode variar de algumas semanas a alguns meses. Na Figura 3.10 são mostrados alguns equipamentos e instalações de uma fábrica onde são produzidas as emulsões.



Figura 3.10 - Instalações de uma fábrica de emulsão (BERNUCCI et al., 2007).

3.4.2 - Tipos de emulsões

Para BERNUCCI *et al.*, (2007), os emulsificantes geralmente têm dois componentes com afinidades diferentes com a água e com o óleo que serão responsáveis pela carga elétrica final que a emulsão asfáltica vai apresentar. Um dos ensaios de

qualificação da emulsão é a medida dessa carga elétrica que terá importância fundamental no desempenho do produto na pavimentação. Por exemplo, agentes emulsificantes do tipo sulfato de sódio produzem emulsões aniônicas (carga negativa) e emulsificantes tipo amina produzem emulsões catiônicas (positivas).

As emulsões catiônicas são as de maior uso atualmente pelo seu melhor desempenho nos serviços de pavimentação (HUNTER, 2000; ABEDA, 2001). É possível também produzir emulsões sem carga elétrica que são designadas de não-iônicas. A forma de uso da emulsão consiste em provocar a ruptura ou quebra do equilíbrio frágil da mistura óleo-água, deixando os glóbulos livres para se reunirem. Portanto, resultando na reconstituição do asfalto residual, que tanto quanto possível deve ser igual ao original antes da emulsificação (BERNUCCI et al., 2007)

A emulsão asfáltica pode ser do tipo Rápida, designada pela letra R, quando sua ruptura ocorre rapidamente ou em pouco tempo após seu contato com os agregados. Ruptura Média, designada pela letra M, quando esse tempo de exposição é maior que o anterior, podendo ser misturada com agregados isentos, praticamente, de pó. Finalmente, o tipo Lenta, designada pela letra L, é quando a ruptura ocorre de modo prolongado em relação aos outros tipos, podendo ser misturada com agregados em presença de material fino (pó-de-pedra). Assim, a seguinte nomenclatura é obedecida: RR – emulsão de Ruptura Rápida; RM – emulsão de Ruptura Média; RL – emulsão de Ruptura Lenta.

Dependendo da quantidade de CAP envolvido na fabricação das emulsões, elas podem se classificar em 1C e 2C, onde a terminologia C indica emulsão do tipo catiônica e os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e quantidade de CAP empregado na fabricação. Essa especificação também se encontra na ABNT NBR 14594/2000.

As emulsões asfálticas são os materiais mais aplicados nos tratamentos superficiais. No Brasil, as emulsões mais usadas são as catiônicas, do tipo RR-1C e RR-2C. De acordo com a SHELL (2003), as mais importantes propriedades da emulsão betuminosa são: estabilidade, viscosidade (ou, mais atualmente, reologia), ruptura e adesividade.

O balanço entre a estabilidade da emulsão e a velocidade da ruptura (desemulsibilidade) é crítico no seu desempenho e no sucesso dos serviços, devendo a emulsão apresentar estabilidade adequada para o transporte e estocagem, mas ao ser aplicada deve apresentar ruptura em tempo adequado ao tipo de serviço. A ruptura da emulsão é usualmente iniciada por adsorção entre a emulsão e os agregados. Em função do tipo de emulsão e do tipo de agregado, a ruptura passa a ser muito dependente das condições climáticas para acelerar a evaporação da água (BERNUCCI *et al.*, 2007).

LARSEN (1985) considera que a emulsão está sujeita a uma alteração progressiva da sua consistência, iniciando-se pela ruptura e terminando-se pelo endurecimento completo (“cura”) do ligante residual, o que geralmente demora alguns dias ou até algumas semanas em tempo frio e úmido. Somente após esse período voltará o ligante ao seu estado primitivo, ou seja ao CAP (85/100 ou 50/60, na maioria dos casos).

3.4.3 - Emulsões melhoradas por polímero

Atualmente estão disponíveis no mercado brasileiro também emulsões que utilizam asfalto modificado por polímero como base. Nas Tabelas 3.8 e 3.9 são mostradas as propostas de especificação brasileira para essas emulsões modificadas por SBR e SBS, respectivamente. As emulsões de cimentos asfálticos de petróleo modificadas por polímero SBR ou SBS são classificadas segundo a velocidade de ruptura nos tipos rápida, média, lenta e controlada (BERNUCCI *et al.*, 2007)

Nessas tabelas aparecem alguns ensaios parecidos com os descritos para as emulsões sem polímero ou para o asfalto, porém eles apresentam certas especificidades de procedimento. Esses ensaios não serão descritos aqui, devendo o leitor consultar as respectivas normas brasileiras. Alguns desses ensaios são: recuperação elástica ABNT NBR 15086, resíduo seco por evaporação ABNT 14896, etc.

Tabela 3.8 - Especificações brasileiras de emulsões modificadas por polímero SBR (proposta do IBP para ANP em 2007, *apud* BERNUCCI *et al.*, 2007).

EMULSÕES CATIÔNICAS MODIFICADAS POR SBR						
Características	Métodos de Ensaio	Ruptura Rápida		Ruptura Média	Ruptura Lenta	Ruptura Controlada
	(ABNT/ASTM)	RR1C-R	RR2C-R	RM1C-R	RL1C-R	RC1C-R (*)
Ensaio sobre a emulsão						
a) Viscosidade Saybolt-Furol. s. a 50°C	NBR 14491	70 máx.	100-400	20-200	70 máx.	70 máx.
b) Sedimentação, % peso máx.	NBR 6570	5	5	5	5	5
c) Peneiração 0,84 mm, % peso máx.	NBR 14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d) Resistência à água, % mín. de cobertura	NBR 6300					
Agregado seco		80	80	80	80	80
Agregado úmido		80	80	60	60	60
e) Mistura com cimento, % máx. ou filler silícico	NBR 6297 NBR 6302	-	-	-	2 1,2-2,0	-
f) Carga de partícula	NBR 6567	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máx.	NBR 6299	-	-	-	6,5	6,5
h) Destilação	NBR 6568					
Solvente destilado, % (v/v).		0-3	0-3	0-12	nula	nula
Resíduo seco, % peso. mín		62	67	62	60	62
i) Desemulsibilidade, % peso, mín	NBR 6569	50	50	-	-	-
máx		-	-	50	-	-
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtidos pela ABNT NBR 14896						
a) Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45-150	45-150	45-150	45-150	45-150
b) Ponto de amolecimento, °C, mín.	NBR 6560	50	50	50	50	50
c) Viscosidade Brookfield, 135°C, SP 21, 20RPM, cP, mín.	NBR 15184	550	550	550	550	550
d) Recuperação elástica, 25°C, 20cm, %, mín.	NBR 15086	60	60	60	60	60

(*) Essa emulsão deve atender a Tabela 5 de instrução ABNT NBR 14948/2003 (Microrevestimento Asfáltica a Frio Modificado por Polímero).

Tabela 3.9 - Especificações brasileiras de emulsões modificadas por polímero SBS (proposta do IBP para ANP em 2007 apud BERNUCCI et al., 2007).

EMULSÕES CATIÔNICAS MODIFICADAS POR SBS					
Características	Métodos de Ensaio	Ruptura Rápida		Ruptura Lenta	Ruptura Controlada
		(ABNT)	RR1C-S	RR2C-S	RL1C-S
Ensaio sobre a emulsão					
a) Viscosidade Saybolt-Furol, s, a 50°	NBR 14491	70 máx.	100-400	70 máx.	70 máx.
b) Sedimentação, % peso, máx.	NBR 6570	5	5	5	5
c) Peneiração 0,84 mm, % peso, máx.	NBR 14393	0,10	0,10	0,10	0,10
d) Resistência à água, % mín. de cobertura	NBR 6300				
Agregado seco		80	80	80	80
Agregado úmido		80	80	60	60
e) Mistura com cimento, % máx.	NBR 6297	-	-	2	-
ou filter silícico	NBR 6302	-	-	1,2-2,0	-
f) Carga de partícula	NBR 6567	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máx.	NBR 6299	-	-	6,5	6,0
h) Destilação	NBR 6568				
Solvente destilado a 360°C, % vol.		0-1	0-1	0-1	0-1
Resíduo seco, % peso, mín.	NBR 14376	62	67	60	62
i) Desemulsibilidade, % peso, mín.	NBR 6569	50	50	-	-
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896					
a) Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45-150	45-150	45-150	45-150
b) Ponto de amolecimento, °C, mín.	NBR 6560	50	55	55	55
c) Viscosidade Brookfield, 135°C, SP 21, 20 RPM, cP, mín.	NBR 15184	550	650	650	650
d) Recuperação elástica, 25°C, 20cm, %, mín.	NBR 15086	65	75	75	75

(*) Essa emulsão deve atender a Tabela 5 de instrução ABNT NBR 14948/2003 (Microrevestimento Asfáltico a Frio Modificado por Polímero).

A ABEDA (2001), classifica as emulsões asfálticas melhoradas por polímero em:

1) emulsão asfáltica com polímero SBS, especificação DNER-EM 396/99 – Emulsão catiônica modificada contendo no mínimo 62% de asfalto modificado por polímero SBS, a qual possui no mínimo 3% de polímero em peso e viscosidade SSF (25°C) entre 20 e 100 segundos. O polímero é incorporado diretamente no asfalto a altas temperaturas antes a emulsificação em condições tecnológicas específicas. Seu maior campo de aplicação está na produção de micro revestimento asfáltico à frio.

2) emulsão asfáltica com polímero SBR, especificação DNER-EM 396/99 – Emulsão catiônica modificada contendo no mínimo 62% de asfalto modificado por

polímero SBR, a qual possui no mínimo 3% de polímero em peso e viscosidade SSF (25°C) entre 20 e 100 segundos. O polímero é incorporado diretamente no asfalto a altas temperaturas antes a emulsificação em condições tecnológicas específicas. Seu maior campo de aplicação está na produção de micro revestimento asfáltico à frio.

3) emulsão asfáltica com polímero SBR ou SBS para pintura de ligação, especificação DNER-ES 396/99 – Emulsão catiônica modificada por polímero SBR ou SBS, contendo no mínimo 50% de asfalto modificado por polímero e viscosidade SSF (25°C) entre 20 e 100 segundos. Empregada em pintura de ligação sobre superfície imprimada ou revestimento betuminoso anterior à execução de uma camada betuminosa qualquer.

Nesta pesquisa usou-se a emulsão asfáltica catiônica RR-2C melhorada por polímero SBS (RRP-2C), para aplicações em tratamentos superficiais duplos com agregado siderúrgico. A escolha para esta pesquisa se deu devido a emulsão RRP-2C apresentar boa viscosidade, boa estabilidade no transporte e estocagem e ruptura rápida. Usou-se a especificação estabelecida pela norma brasileira para emulsões modificadas por polímero SBS, conforme Tabela 3.9.

3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, tratou-se de algumas considerações sobre o uso dos resíduos das usinas siderúrgicas e das emulsões asfálticas melhoradas por polímero para uso em pavimentação, bem como dos asfaltos melhorados por polímero. Apresentaram-se os processos de produção dos materiais usados nesta pesquisa, suas aplicações e os tipos existentes no mercado. No capítulo seguinte serão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados para elaboração da presente pesquisa.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais escolhidos para esta pesquisa, os tipos de ensaios usados para caracterizar esses materiais, o processo de preparação do tratamento superficial sobre uma manta asfáltica, em laboratório, para ser submetido ao ensaio de *Wet Track Abrasion Test* (WTAT). Serão apresentados, também, os procedimentos utilizados em campo para aplicação do TSD nas mantas asfálticas e o programa experimental adotado. Na Figura 4.1 apresenta-se o fluxograma da metodologia de trabalho realizado nesta pesquisa.

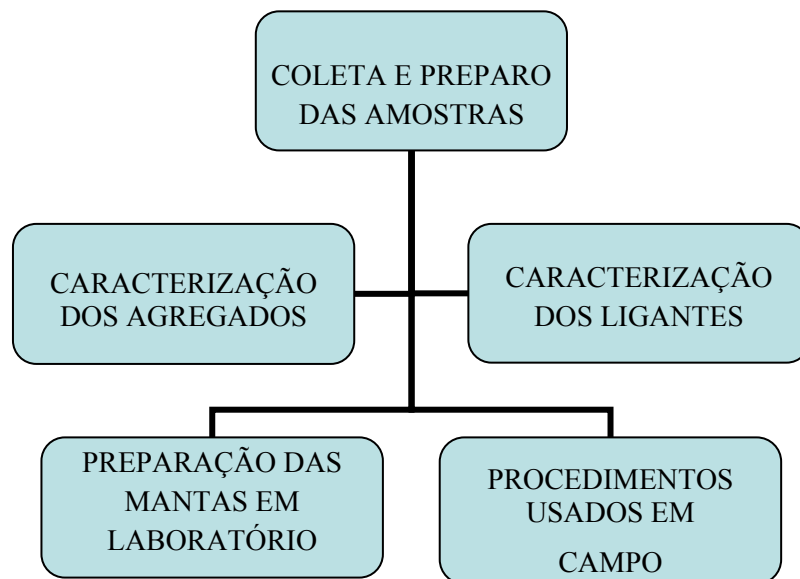


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia de trabalho realizado.

4.2 - O PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.2.1 - Considerações Gerais

Para atingir o objetivo desta pesquisa, realizaram-se a escolha dos materiais e os ensaios de caracterização dos agregados mineral e siderúrgico e das emulsões asfálticas (sem polímero e com polímero). Após todos os ensaios laboratoriais, definiu-se a taxa

dos agregados e dos ligantes asfálticos. Posteriormente, os agregados foram distribuídos uniformemente, após as aplicações dos ligantes, sobre uma manta asfáltica para funcionarem como um tratamento superficial duplo. Em seguida, usou-se um cilindro de aço como rolo compressor e submeteu-se o revestimento ao ensaio WTAT. Maiores detalhes desse procedimento serão vistos mais adiante no item (4.2.4.3). As mantas asfálticas foram moldadas no LMP/UFC e na empresa Asfaltos Nordeste, localizada na cidade de Maracanaú, na Região Metropolitana de Fortaleza.

Foram, também, submetidas ao ensaio WTAT amostras coletadas em campo do tratamento superficial duplo executado no trecho BR- 020-Paramoti/CE, para se verificar a viabilidade técnica e econômica das taxas aplicadas. Avaliou-se, também, a rejeição do agregado aplicado no tratamento superficial duplo. Os revestimentos moldados em laboratório e extraídos em campo foram submetidos ao ensaio de mancha de areia.

Analisou-se o comportamento dos materiais convencionais e materiais pesquisados, quando aplicados a uma placa de solo brita, moldada em laboratório. As placas foram confeccionadas com revestimento em tratamento superficial duplo. Após a moldagem e aplicação do revestimento, essas placas foram submetidas a uma avaliação da textura, através dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico. Posteriormente, foram submetidas ao simulador de tráfego para avaliar-se o desempenho do revestimento.

Buscou-se nesta pesquisa aplicar e simular em laboratório, os procedimentos usados nas etapas construtivas de um revestimento em tratamento superficial duplo, como forma de elaborar e testar métodos para avaliar o desempenho desse tipo de revestimento. Assim, cuidados especiais foram tomados nas aplicações dos ligantes betuminosos e agregados nas atividades de laboratório. Para fazer as aplicações foram usados equipamentos adaptados devido a falta de equipamentos de dimensões apropriadas para uso em laboratório. As amostras coletadas em campo foram moldadas pelos equipamentos utilizados em campo, na execução do TSD. Dividiu-se o experimento da pesquisa aqui apresentada em procedimentos experimentais, descritos nos itens 4.2.3 a 4.2.7.

4.2.2 - Materiais selecionados

Os agregados utilizados na pesquisa foram o agregado mineral e a escória de aciaria. Os ligantes asfálticos usados foram a Emulsão Asfáltica RR-2C e a Emulsão Asfáltica RR-2C modificada por polímero SBS (RRP-2C).

4.2.2.1 - Agregado mineral

O agregado mineral selecionado foi o agregado mais usado nos tratamentos superficiais no estado do Ceará, coletado no município de Itaitinga. Nesse município, localizado na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), encontra-se um grande número de pedreiras comerciais que produzem brita para uso em edificações e rodovias. O granito é a rocha que predomina em maior abundância no município de Itaitinga. São rochas ígneas, minerais duros e resistentes. Nas Figuras 4.2 e 4.3 mostra-se a localização da pedreira de Itaitinga, o processo de britagem e o transporte do agregado usado, respectivamente.

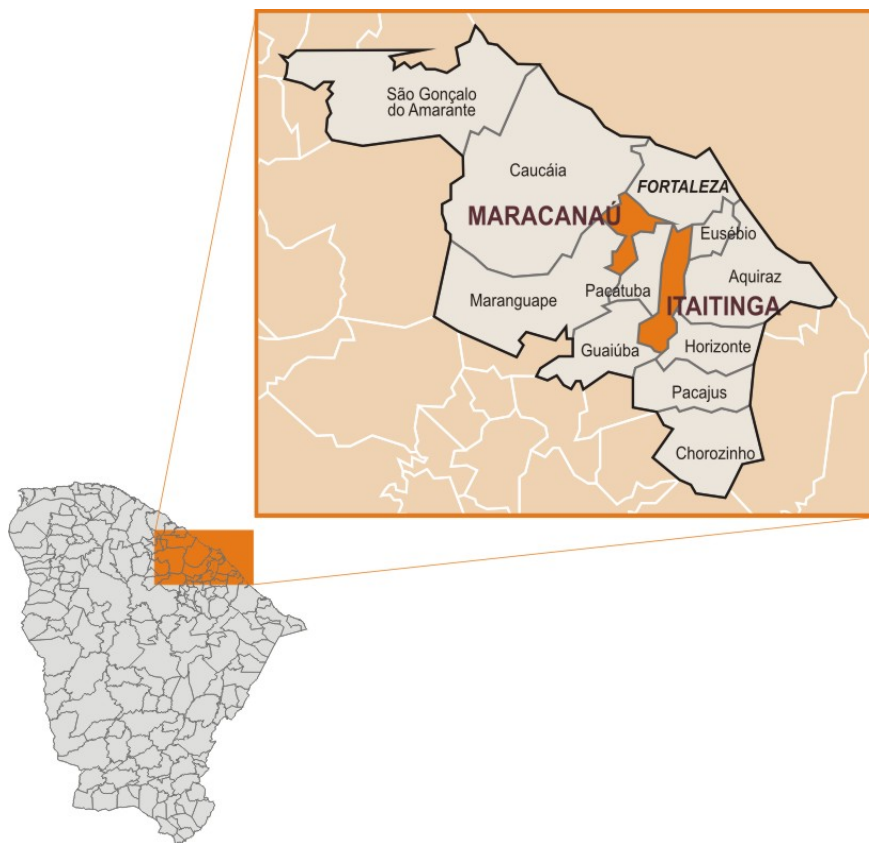


Figura 4.2 - Localização dos municípios de Itaitinga e Maracanaú na RMF.



Figura 4.3 - Exploração da pedreira, britagem e transporte do agregado.

4.2.2.2 - Agregado siderúrgico

A opção de utilizar-se a escória de aciaria como agregado, deu-se devido ao fato da mesma já estar sendo usada em pavimentação para outras finalidades, por ser um passivo ambiental e por se desejar investigar se a mesma pode ser empregada em tratamentos superficiais. A escória de aciaria foi usada, também, com a finalidade de comparar seu desempenho ao da brita convencional para uso em tratamento superficial duplo.

A escória foi coletada na sede da Gerdau, no município de Maracanaú – CE. O município de Maracanaú está localizado na RMF, distante 20 km da cidade de Fortaleza ver (Figura 4.2). A Multiserv, localizada em Maracanaú, comercializa a escória produzida na Gerdau. O material é britado e, por meio de correias rolantes, separado nas graduações de 1”, 3” e 8”. A escória é estocada pela empresa em pilhas a céu aberto, o que provoca uma pré-expansão da mesma. Apresenta-se na Figura 4.4 fotos tiradas pelo autor desse trabalho, da escória já processada pela Multiserv, do britador empregado para sua britagem e do estoque para comercialização da mesma.



Escória processada

Britador

Estoque de escória

Figura 4.4 - Escória processada, britador e estoque para comercialização.

4.2.2.3 - Emulsão asfáltica RR-2C

A razão pela escolha da emulsão asfáltica de ruptura rápida RR-2C se deu por ser a emulsão mais usada nos tratamentos superficiais convencionais no estado do Ceará. A mesma tem se tornado uma excelente alternativa para a pavimentação urbana e rural, pelas suas características de manuseio à temperatura ambiente. Essa emulsão foi fabricada e fornecida pela empresa Asfaltos Nordeste.

4.2.2.4 - Emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero (RRP-2C)

Com o advento dos asfaltos modificados por polímeros e o surgimento das emulsões asfálticas de alto desempenho, a técnica de construção dos tratamentos superficiais pode ser inovada. Buscou-se, assim, investigar o uso deste tipo de emulsão em tratamentos superficiais. A emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero SBS (RRP-2C) foi fabricada e fornecida pela empresa Asfaltos Nordestes.

4.2.3 - Primeiro procedimento experimental - Ensaio realizados nos agregados e nas emulsões asfálticas

4.2.3.1 - Ensaio realizados no agregado mineral e agregado siderúrgico

Os agregados mineral e siderúrgico foram submetidos aos ensaios de desgaste “Los Angeles”, índice de forma, absorção, densidade, granulometria, durabilidade e adesividade. Esses ensaios foram realizados conforme os métodos de ensaios estabelecidos pelas normas rodoviárias do DNIT, os quais têm como objetivos principais verificar se os mesmos encontram-se dentro das faixas estabelecidas para uso em pavimentação.

Além dos ensaios acima citados foram realizados na escória de aciaria outros ensaios considerados importantes, tais como: análise química MVE (Microscópio de Varredura Eletrônica), difração de raio X, expansão pelo método PTM 130. Os riscos de danos ambientais foram analisados através dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Na Figura 4.5, apresenta-se o fluxograma dos ensaios realizados para caracterização do agregado mineral.



Figura 4.5 - Fluxograma dos ensaios realizados para caracterização do agregado mineral.

A caracterização da escória de aciaria seguiu todas as condições estabelecidas pela norma do DNER – EM 262/94. A escolha de suas taxas foram definidas nas próprias mantas asfálticas pelo método do mosaico, enquadrando-se na faixa estabelecida pela norma do DER para as classes granulométricas de TSD II – III, conforme apresentado no Capítulo 2, item 2.3.2.4. A caracterização deste rejeito seguiu o fluxograma da Figura 4.6.



Figura 4.6 - Fluxograma dos ensaios para caracterização do agregado siderúrgico.

O ensaio de desgaste “Los Angeles” foi realizado conforme a norma do DNER – ME 035/98. O ensaio define o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm e 33 rpm. O desgaste é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm. A Figura 4.7 mostra o equipamento “Los Angeles” usado na pesquisa.

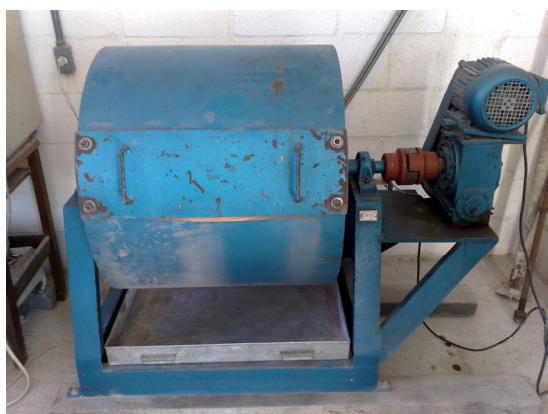


Figura 4.7 - Equipamento “Los Angeles”.

O ensaio de índice de forma foi determinado pelo método de ensaio do DNER – ME 086/94. Este método fixa o modo pelo qual se determina a variação dos eixos

multidirecionais das partículas que compõem o agregado, definindo-a pelo índice de forma. Na Figura 4.8 são mostrados os equipamentos utilizados nesta pesquisa para obtenção do índice de forma.



Figura 4.8 - Equipamentos usados para obtenção do índice de forma.

O ensaio de absorção e densidade foi executado conforme método de ensaio DNER – ME 081/98. O ensaio fixa o procedimento para a determinação da densidade aparente e densidade real do agregado graúdo e da absorção d'água. Na Figura 4.9 ilustram-se algumas etapas utilizadas para obter-se a absorção da água, na brita e escória.



Figura 4.9 - Procedimentos para obtenção da absorção da água na brita e escória.

A granulometria dos agregados foi avaliada através da norma DNER – ME 083/98. A norma fixa o procedimento para análise granulométrica de agregados miúdos e graúdos, por peneiramento. As amostras de brita e escória foram submetidas a um peneiramento, após serem secas em estufa e esfriadas a temperatura ambiente. Ilustra-se na Figura 4.10 a série de peneiras utilizadas nesse ensaio.



Figura 4.10 - Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.

Para o ensaio de Durabilidade, usou-se a norma DNER – ME 089/94. A amostra de agregado foi imersa em uma solução de sulfato de sódio (NaSO_4).

A avaliação da Adesividade ao ligante seguiu a norma DNER – ME 078/94. Esse ensaio verifica a adesividade entre a película de ligante e os grãos do agregado graúdo, depois que os mesmos são submetidos ao contato com a umidade (submersão em água destilada a 40°C , por 72 horas). O ensaio é dito satisfatório quando não há deslocamento da película de asfalto e não satisfatório quando há. Na Figura 4.11 apresenta-se uma ilustração do ensaio de adesividade feito na brita e escória.



Figura 4.11 - Ensaio de adesividade da brita e escória.

O ensaio de expansão na escória foi realizado através do método de ensaio de expansão PTM – 130/1978, do Departamento de Transportes da Pennsylvania, adaptado pela DMA-1/DER-MG (1982). Este método descreve a determinação do grau de expansão da escória de aciaria, quando compactada e testada em laboratório. Foram colocados três corpos de prova submersos, com umidade próxima da ótima, sendo que um foi colocado no ramo seco, outro no ramo úmido e outro entre os dois anteriores. Em cada corpo de prova foi colocado um extensômetro para que fossem realizadas medidas todos os dias, por quatorze dias consecutivos. Sendo por sete dias no estado submerso e por mais sete dias no estado de saturação. Na Figura 4.12 ilustra-se o procedimento usado para obtenção da expansão da escória de aciaria.



Figura 4.12 - Procedimentos para obtenção da expansão.

Os riscos de danos ambientais causados pela escória de aciaria foram avaliados através dos ensaios de lixiviação e solubilização. Para a classificação de resíduos foram realizados ensaios analíticos de lixiviação e solubilização, conforme especifica a norma ABNT-NBR 10.004 (2004). Pelas características obtidas nas análises físico-químicas dos ensaios realizados, o resíduo é classificado como: parâmetros complementares; extrato lixiviado; extrato solubilizado. Os ensaios foram executados pelo Laboratório Puriquima, localizado na cidade de São Paulo. Para realizar os ensaios esse laboratório usou as normas: ABNT-NBR 10.005 (2004) - Lixiviação de resíduos – Procedimentos e ABNT-NBR 10.006 (2004) - Solubilização de resíduos – Procedimentos.

A norma ABNT-NBR 10.005 (2004) fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT-NBR 10.004 (2004) como classe I – perigosos e classe II – não perigosos. A norma 10.006 fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de

resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na ABNT- NBR 10.004 (2004) como classe II A - não inertes e classe II B – inertes. Essa norma não se aplica aos resíduos no estado líquido.

De acordo com a origem do resíduo, poderão ser executadas análises complementares na massa bruta. Caso os resultados analíticos ultrapassem os valores máximos permitidos pela legislação no lixiviado, o resíduo será classificado como: Classe I - Resíduo Perigoso. Ultrapassando no solubilizado, o resíduo será classificado como: Classe II-A - Resíduo Não-Perigoso Não-Inerte. Não ultrapassando em nenhum dos ensaios analíticos supracitados, o resíduo será classificado como: Classe II-B – Resíduo Não-Perigoso Inerte.

A análise química quantitativa da escória de aciaria foi realizada pelo Departamento de Física da UFC. As amostras de escória sofreram primeiramente uma digestão, ou “abertura”, processo no qual a escória é misturada com ácido clorídrico, ácido anídrico e peróxido, sendo colocada em um forno de microondas. Esse processo de digestão é realizado para que os elementos que não serão analisados sejam dissolvidos e, conseqüentemente, eliminados da caracterização. A análise foi realizada com a utilização do equipamento de fluorescência de raios-X (modelo Rigaku ZSX Mini II, conforme indicado pelo LMA (2009). A Figura 4.13 ilustra o equipamento.



Figura 4.13 - Equipamento utilizado na análise química quantitativa.

A análise química qualitativa foi realizada no Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE) do Laboratório de Microscopia Avançada (LMA) do Departamento de Física da UFC com uma amostra de escória de aciaria passada na peneira de nº 200.

A Figura 4.14 ilustra o MVE usado na pesquisa. Como mostra a Figura 4.15, a amostra foi recoberta com ouro (para tornar o material mais condutor).

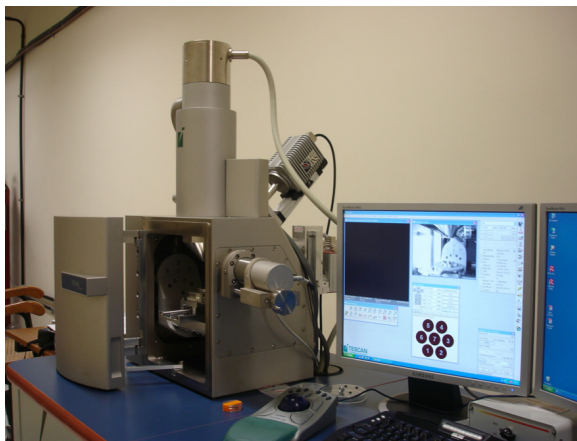


Figura 4.14 - Microscópio de Varredura Eletrônica.



Figura 4.15 - Equipamento utilizado para o recobrimento da amostra com ouro (metalização).

A difração de raio-X foi realizada pelo Departamento de Física da UFC, em um difratômetro de raio-X convencional (modelo Planalytical - XPert Pro MPD) a 23°C. A Figura 4.16 ilustra o equipamento mencionado. O ensaio tem como intuito identificar a composição mineralógica da escória de aciaria. A difração é o efeito da interferência entre ondas que reforça as intensidades dos picos. As partículas são formadas por estruturas cristalinas com padrões de difrações diferentes e característicos de cada fase. O feixe de raios-X é incidido em ângulos variáveis na amostra de policristal, em forma de pó e com arranjo atômico ou molecular com estrutura que se repete de forma periódica e tridimensional (SASAKI e BLEICHER, 2009).



Figura 4.16 - Difratorômetro de raios X - Planalytical (XPert Pro MPD).

4.2.3.2 - Ensaios realizados na emulsão asfáltica RR-2C e emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero (RRP-2C).

As emulsões asfálticas RR-2C convencional e RR-2C modificada por polímero (RRP-2C) foram submetidas aos ensaios de viscosidade Saybolt Furol, sedimentação, carga da partícula, resíduo por evaporação, peneiração, pH, desemulsibilidade, penetração, recuperação elástica, ductilidade e ponto de amolecimento. Esses ensaios foram realizados conforme os métodos de ensaios estabelecidos pelas normas rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Normas Brasileiras e Métodos Brasileiros (NBR e MB, respectivamente) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Instituto Brasileiro de Petróleo, observando-se sempre os de publicação mais recente (ver Tabela 4.1).

Os ensaios de recuperação elástica, penetração, ductilidade e ponto de amolecimento foram executados somente na emulsão asfáltica RR-2C modificada com polímero, intitulada de RRP-2C. Os ensaios de caracterização da emulsão asfáltica RR-2C e RRP-2C, empregadas na pesquisa, foram realizados no laboratório da empresa Asfaltos Nordeste e seguiram os procedimentos descritos nas normas apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ensaio para a caracterização da emulsão asfáltica RR-2C e RRP-2C.

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

O ensaio de viscosidade Saybolt Furol foi realizado seguindo-se as normas técnicas da ABNT-NBR 14491. Essa norma fixa o procedimento para a determinação da consistência de emulsões asfálticas, utilizando o viscosímetro Saybolt Furol. Viscosidade Saybolt Furol é o tempo em segundos para que 60 mL de emulsão escoem em fluxo contínuo através de um orifício de dimensões padronizadas (orifício Furol), sob condições especificadas. Na Figura 4.17 mostra-se o viscosímetro utilizado para a execução do ensaio.

**Figura 4.17** - Viscosímetro usado no ensaio.

O ensaio de sedimentação foi realizado através do método de ensaio DNER-ME 006/2000. Essa norma fixa o procedimento para a determinação da sedimentação de emulsões asfálticas empregadas em obras rodoviárias. Foram utilizadas duas provetas de 500 ml cada uma. Nas provetas foram colocadas duas amostras de emulsão e

agitadas até homogeneizá-las completamente. As mesmas foram fechadas com rolhas esmerilhadas e deixadas em repouso durante cinco dias. Após este período os resíduos asfálticos das amostras foram determinados. Apresenta-se na Figura 4.18 ilustrações dos procedimentos utilizados nesse ensaio.



Figura 4.18 - Procedimentos usados no ensaio de sedimentação.

A carga da partícula foi obtida através do ensaio normatizado pela ABNT NBR 6567, a qual destina-se a identificar emulsões asfálticas. Aquelas cujas partículas são carregadas positivamente são classificadas como catiônicas e as carregadas negativamente como aniônicas. Caso não exista carga de partícula, a emulsão é considerada não-iônica, e se carregada positiva e negativamente, é considerada anfotérica. A emulsão foi submetida a uma corrente elétrica através de duas placas de aço inoxidável. Na Figura 4.19 apresenta-se o equipamento e algumas etapas dos procedimentos usados no ensaio para obter-se a carga da partícula.



Figura 4.19 - Equipamento e procedimentos para o ensaio carga da partícula.

O ensaio de resíduo por evaporação foi realizado através da norma técnica da ABNT NBR 14376. Essa norma determina a quantidade de material asfáltico contido em uma emulsão asfáltica. A emulsão asfáltica é colocada em um béquer de vidro termorresistente ou recipiente metálico que é aquecido com agitação contínua até a total evaporação da água. Na Figura 4.20, ilustra-se o ensaio sendo executado.



Figura 4.20 - Ensaio de resíduo por evaporação.

O ensaio de peneiração foi realizado somente na emulsão RR-2C sem polímero. A norma usada foi da ABNT NBR 14393 que estabelece o procedimento para determinação da peneiração de emulsões asfálticas. Uma amostra de 1000 g de emulsão asfáltica foi vertida através de uma peneira de abertura de 841 μm . A peneiração é a porcentagem, em massa, da emulsão retida nesta peneira.

O pH das emulsões foi obtido através da norma técnica da ABNT NBR 6299 que estabelece o procedimento de determinação do pH das emulsões asfálticas. O pH é o logaritmo decimal do inverso da concentração hidrogeniônica. O pH das amostras das emulsões foi determinado por meio de um potenciômetro previamente calibrado com soluções-padrão. A amostra foi colocada em um recipiente de vidro com 250 mL de capacidade. Foi imerso um eletrodo e feita a leitura. Na Figura 4.21 ilustra-se o ensaio para obtenção do pH das emulsões sendo realizado.



Figura 4.21 - Procedimento para obtenção do pH das emulsões.

O ensaio da desemulsibilidade seguiu a norma do DNIT, método de ensaio DNER-ME 063/94, que fixa o modo de proceder no ensaio de desemulsibilidade das emulsões asfálticas catiônicas de ruptura rápida e ruptura média. É um ensaio de estabilidade. O procedimento se dá para a determinação da porcentagem do resíduo de destilação, conforme ABNT MB-586, em três ensaios para cada amostra.

O método de ensaio utilizado para determinação da penetração foi o estabelecido pela norma rodoviária do DNIT, DNER-ME 003/99, a qual fixa o procedimento para a determinação da penetração de materiais betuminosos semi-sólidos e sólidos. A norma define penetração como sendo a distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura. Na Figura 4.22 ilustra-se o penetrômetro utilizado no ensaio.



Figura 4.22 - Penetrômetro.

Para determinar-se a recuperação elástica da emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero, usou-se o método de ensaio DNER-ME 382/99. O método define a recuperação elástica como sendo a medida da capacidade de retorno do sistema asfalto-polímero após interrupção de tração mecânica especificada. Na Figura 4.23 ilustram-se os procedimentos usados na elaboração do ensaio.



Figura 4.23 - Procedimentos do ensaio para determinação da recuperação elástica.

A determinação da ductilidade deu-se através do método brasileiro da ABNT IBP P-MB-167, a qual define ductilidade como sendo a distância, em centímetros, em que um corpo de prova de material betuminoso, em condições padronizadas e submetido a uma tração em condições especificadas, se rompe.

O ponto de amolecimento foi determinado através do método do anel e bola do IBP MB-164-ASTM-D-36. Esse método fixa o meio de proceder-se à determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos, na faixa de 80 °C a 157 °C com o uso de glicerina ou água destilada na faixa de 30 °C a 80 °C. Na Figura 4.24 ilustra-se o ensaio para determinação do ponto de amolecimento sendo realizado.



Figura 4.24 - Ensaio para determinar o ponto de amolecimento.

4.2.4 - Segundo procedimento experimental - confecção dos tratamentos superficiais duplos em laboratório

Após a seleção dos dois tipos de agregados e dos dois tipos de ligantes, procedeu-se ao processo de preparação de quatro tipos de revestimento em tratamento superficial duplo sobre mantas asfálticas, com diâmetro de 286 mm. Na primeira manta, usou-se emulsão asfáltica RRP-2C modificada com polímero e escória de aciaria. Na segunda manta, usou-se emulsão asfáltica RRP-2C modificada com polímero e brita. Na terceira manta, usou-se emulsão asfáltica RR-2C sem polímero e escória de aciaria e na quarta manta, usou-se emulsão asfáltica RR-2C sem polímero e brita. Apresenta-se, na Figura 4.25, um esquema de aplicação dos tratamentos sobre as mantas asfálticas.

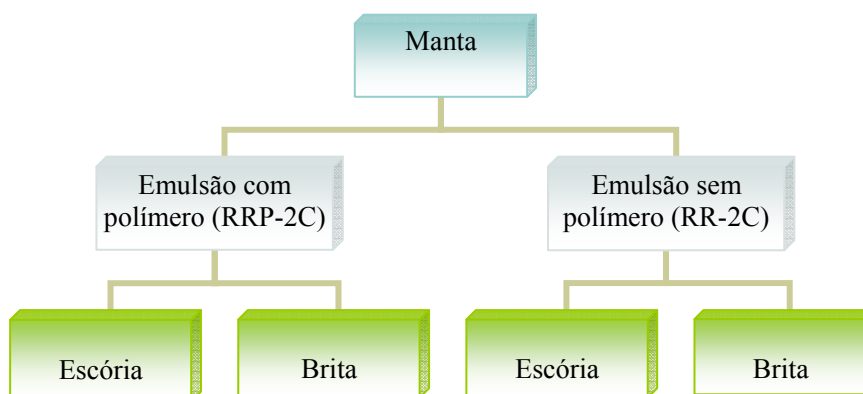


Figura 4.25 - Esquema de aplicação dos tratamentos sobre as mantas asfálticas.

4.2.4.1 - Definição das taxas dos ligantes

Procurou-se definir taxas que dessem uma boa aderência entre os agregados da primeira e da segunda camada. As primeiras aplicações do ligante foram feitas usando-se taxas definidas pelas normas do DER para tratamento superficial duplo conforme apresentadas no Capítulo 2, item 2.4.2.

Iniciou-se a execução do tratamento superficial duplo sobre a manta asfáltica, pela primeira aplicação do ligante. A manta foi pesada para obter-se a primeira taxa do ligante, seguindo-se de imediato a aplicação da primeira camada do agregado. Após a aplicação da primeira camada do agregado, fez-se a segunda aplicação do ligante, observando-se o envolvimento do ligante com o agregado. A manta asfáltica foi novamente pesada para obter-se a taxa da segunda aplicação do ligante. Por fim, aplicou-se a segunda camada do agregado.

4.2.4.2 - Definição das taxas dos agregados

A granulometria e a taxa de aplicação dos agregados foram determinadas de maneira a evitar a sua sobreposição, reduzindo a possibilidade de rejeição dos agregados na pista. O DER-CE define as taxas do agregado estabelecendo classes granulométricas, considerando um maior e um menor diâmetro, conforme foram apresentados na Tabela 2.8, do Capítulo 2.

Procedeu-se a escolha das taxas dos agregados da seguinte forma: 1) aproveitando-se a área da própria manta, espalhou-se o agregado da 1ª camada de forma uniforme e sem superposição, sobre o ligante já aplicado, pesou-se e obteve-se a taxa; 2) fez-se a 2ª aplicação do ligante, e em seguida espalhou-se os agregados da 2ª camada, procurando-se preencher todos os vazios da 1ª camada, pesou-se e obteve-se a taxa do agregado da 2ª camada. Na Figura 4.26 são ilustrados os procedimentos usados para obtenção das taxas dos agregados.



Figura 4.26 - Procedimentos para obtenção das taxas dos agregados.

Observe-se que o procedimento descrito no parágrafo anterior, para definir-se as taxas dos agregados, corresponde ao método do mosaico. O método do mosaico é o mais usado em campo, por apresentar resultados que correspondem às melhores taxas quando aplicadas na pista de rolamento. O procedimento para esse método foi apresentado no Capítulo 2, item 2.4.1 (métodos de dosagens), e serve, também, como um meio para confirmar as taxas definidas pelos projetistas.

4.2.4.3 - Procedimentos utilizados, em laboratório, na aplicação do tratamento superficial duplo nas mantas asfálticas

Usando-se mantas asfálticas e moldes metálicos, com a mesma dimensão (286 mm de diâmetro) da cuba usada no ensaio WTAT, aplicou-se o tratamento superficial duplo. Procurou-se desenvolver procedimentos compatíveis com os usados em campo, mantendo-se todos os critérios e cuidados nas aplicações dos ligantes e agregados, com a finalidade de obter-se um revestimento similar aos aplicados nas rodovias.

O ensaio de WTAT foi realizado conforme a norma técnica da ABNT NBR 14746. Essa norma estabelece o método para determinação do desgaste de misturas de lama asfáltica ou microrevestimento sob condição de abrasão úmida. Avalia o desgaste do material asfáltico quando simulada a ação do tráfego. O método de ensaio de abrasão úmida é um ensaio de desempenho. O ensaio estabelece o teor ótimo de emulsão de uma dada mistura de agregado e/ou aditivos.

DUQUE NETO (2004) utilizou o ensaio de WTAT, com uma série de adaptações, com a finalidade de verificar a durabilidade da técnica do antipó.

THULLER (2005), avaliou a contribuição do tratamento superficial simples e ensaios de desgaste do tratamento antipó. MICELI Jr. (2006), SOLIZ (2007) e GONDIM (2008) utilizaram a técnica para avaliação de camadas de solo-emulsão.

O ensaio de desgaste WTAT, utilizado nesta pesquisa, teve o objetivo de avaliar o desempenho das taxas dos materiais utilizados em revestimento com tratamento superficial duplo. Os tratamentos superficiais foram submetidos à ação abrasiva de uma mangueira recoberta com borracha a uma velocidade 110 rpm. Ao método, adaptou-se o uso da manta asfáltica para a aplicação dos materiais. Nos ensaios realizados, mantiveram-se as mesmas metodologias usadas pela norma ABNT NBR 14746, para microrevestimento asfáltico e lama asfáltica.

Em cada manta foram feitas duas aplicações de emulsão, para o revestimento com escória e para o revestimento com brita. Variaram-se as aplicações das taxas das emulsões e dos agregados, procurando-se na maioria das aplicações usar taxas equivalentes às aplicadas em campo. Foi aplicado em algumas mantas um banho diluído de emulsão e água na proporção de 1:1, sendo a última aplicação feita somente após a compactação da última camada de agregado. Apresenta-se na Figura 4.27 o equipamento utilizado no ensaio WTAT.



Figura 4.27 - Equipamento utilizado no ensaio WTAT.

Apresenta-se, a seguir e de forma mais detalhada, os procedimentos usados para a aplicação do tratamento superficial duplo sobre as mantas. Os ensaios de WTAT foram realizados nos laboratórios UFC/LMP e na empresa Asfaltos Nordeste.

- 1) colocou-se sobre um bandeja de material reciclado uma manta asfáltica com um molde metálico. O conjunto foi pesado em uma balança capaz de pesar 5.000 g com sensibilidade de 0,1 g e mantido para serem pesadas todas as etapas subseqüentes;
- 2) fez-se a 1ª aplicação do ligante e pesou-se para obter-se a 1ª taxa de aplicação;
- 3) após a 1ª aplicação do ligante, iniciou-se imediatamente a 1ª aplicação do agregado;
- 4) o agregado da 1ª camada foi submetido a uma compactação com um cilindro de aço;
- 5) foi feita a 2ª aplicação do ligante;
- 6) após a 2ª aplicação do ligante, iniciou-se imediatamente a 2ª aplicação do agregado;
- 7) o agregado da 2ª camada foi submetido a uma compactação com um cilindro de aço;
- 8) removeu-se o molde e colocou-se o revestimento em uma estufa a 60° C por 24 h, com a finalidade de acelerar a cura da emulsão;
- 9) o revestimento foi removido da estufa e colocado a temperatura ambiente por 1 h;
- 10) pesou-se o revestimento para obter o peso antes de ser submetido ao desgaste (P1);
- 11) fez-se o ensaio de mancha de areia, o qual será melhor explicado no item 4.2.7, antes do revestimento ser submetido ao desgaste por abrasão;

- 12) colocou-se o revestimento submerso em água, por dez minutos;
- 13) removeu-se a amostra do banho térmico e colocou-se na bandeja para ser submetido ao ensaio WTAT;
- 14) cobriu-se completamente a amostra com água;
- 15) iniciou-se o processo de desgaste por abrasão mantendo a máquina ligada por 5 minutos, a uma velocidade de 110 rpm;
- 16) removeu-se o revestimento da bandeja após o ciclo de abrasão;
- 17) lavou-se o revestimento e colocou-se na estufa a 60 °C por duas horas e deixou-se secar até peso constante à temperatura ambiente;
- 18) pesou-se o revestimento seco para obter o peso após o desgaste (P2). O desgaste foi calculado em % pela fórmula $((P1 - P2)/P1) \times 100$);
- 19) depois do desgaste do revestimento foi feito o ensaio de mancha de areia com o objetivo de classificar a sua textura.

A emulsão asfáltica RR-2C convencional foi aplicada a uma temperatura de até 60 °C e a emulsão asfáltica RRP-2C modificada com polímero a uma temperatura de 65 °C. Considera-se essas temperaturas as que proporcionaram a melhor viscosidade para espalhamento. Na Figura 4.28 apresentam-se algumas etapas dos procedimentos usados na execução do revestimento.



Figura 4.28 - Procedimentos usados para execução do TSD.

4.2.5 - Terceiro procedimento experimental – Experimentos realizados no revestimento aplicado no trecho BR 020 – Paramoti

No terceiro procedimento experimental procurou-se analisar as taxas aplicadas na execução do trecho: BR 020 – Paramoti. No momento da execução do tratamento superficial duplo, colocou-se mantas asfálticas para serem coletados moldes do revestimento. Após quatro dias, esses moldes foram extraídos e submetidos ao ensaio de WTAT no LMP/UFC. Foram analisados e comparados os resultados dos ensaios dos revestimentos coletados em campo com os resultados dos revestimentos moldados em laboratório. A aplicação do tratamento superficial duplo, no referido trecho, seguiu os procedimentos usuais que são empregados na execução dos tratamentos superficiais.

O trecho Entrº BR 020 – Paramoti desenvolve-se totalmente dentro do município de Paramoti, atravessando uma região plana e ondulada e tem uma extensão de 12.901,20 m. Esse trecho foi implantado na década dos anos 80, no programa de rodovias de acesso municipal e de baixo custo. O revestimento existente e em

restauração (abril/09) é um TSD. O volume de tráfego corresponde a $4,0 \times 10^5$. A Figura 4.29 mostra a localização do trecho BR 020 – Paramoti e uma imagem do revestimento usado (TSD).

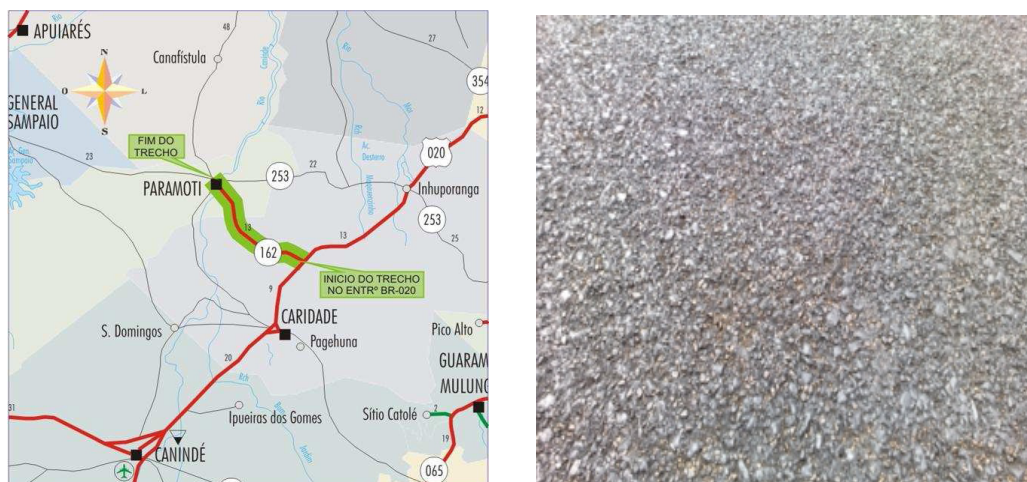


Figura 4.29 - Localização e textura do revestimento (TSD) do trecho BR 020 – Paramoti.

Moldaram-se, também, em laboratório mantas asfálticas utilizando-se os mesmos materiais empregados em campo, com as mesmas taxas e granulometria para submetê-las ao ensaio de WTAT. Objetivou-se comparar os resultados desses ensaios com os desgastes dos revestimentos moldados em laboratório e a rejeição do agregado do tratamento superficial duplo do trecho. Essa rejeição foi medida antes da aplicação do banho diluído.

A rejeição do material granular sempre se dá na camada final dos tratamentos superficiais. Tal fato é considerado por muitos como sendo um fato normal. Alguns autores apresentam índices de 15% a 20% de aceitação da rejeição nos tratamentos superficiais duplos. Nesta pesquisa procurou-se determinar a rejeição sofrida no trecho em estudo e comparar ao desgaste dos revestimentos submetidos ao ensaio de WTAT. Procurou-se discutir as taxas até então definidas e usadas na aplicação dos tratamentos superficiais duplos.

A rejeição do material granular nos tratamentos superficiais é considerada danosa ao pavimento pelo autor do presente trabalho, trazendo as seguintes

conseqüências: aumento da rugosidade; aceleração do cravamento dos agregados nos tratamentos duplos e triplo (devido ao aumento do contato do pneu com o agregado da primeira camada); risco de exsudação; facilitação da infiltração de água no pavimento e perigo de quebra de parabrisa.

O agregado utilizado nos tratamentos superficiais é de custo elevado, tanto na produção quanto no transporte. Permitir a sua rejeição incorre em um desperdício de material nobre, procedimento este incompatível com a situação econômica do País. Portanto, buscou-se nesta pesquisa analisar as taxas aplicadas em laboratório, as taxas aplicadas em campo e a rejeição do agregado em campo para sugerir taxas ideais e assim poder-se minimizar essa rejeição.

4.2.5.1 - Taxas dos materiais utilizados no trecho: BR 020 – Paramoti

As taxas de ligante e agregado, utilizadas na execução do trecho BR 020 – Paramoti, foram previamente definidas pelo projeto executivo. Procurou-se através do método do mosaico verificar as taxas do agregado e em função dessa taxa definir a taxa do ligante. O agregado utilizado foi obtido de uma pedreira estabelecida no município de Itaitinga. O ligante aplicado foi a emulsão RR-2C sem polímero. Apresenta-se na Tabela 4.2 as taxas definidas pelo projeto e as taxas aplicadas em campo.

Tabela 4.2 - Taxas definidas pelo projeto e em campo.

TAXAS DE APLICAÇÃO DA BRITA E DO LIGANTE (EMULSÃO RR-2C)			
DEFINIDAS PELO PROJETO			
MATERIAIS	1ª CAMADA	2ª CAMADA	BANHO DILUIDO
agregado	12,00 kg/m ²	10,00 kg/m ²	-
ligante	1,00 L/m ²	1,00 L/m ²	0,50 L/m ²
APLICADAS			
agregado	13,87 kg/m ²	7,55 kg/m ²	-
ligante	1,00 L/m ²	1,10 L/m ²	0,50 L/m ²

As taxas apresentadas na Tabela 4.2 sofreram variações por serem aplicadas por um processo mecanizado. Usou-se para aplicação do ligante um espargidor e para a

aplicação do agregado um distribuidor de agregado do tipo rebocável. Após cada aplicação do agregado a camada foi submetida a uma compactação com um rolo pneumático. Apresentam-se na Figura 4.30 os equipamentos utilizados na execução do TSD no trecho em estudo.



espargidor

distribuidor de agregado

rolo compactador

Figura 4.30 - Equipamento utilizado na execução do TSD em Paramoti.

4.2.5.2 - Procedimentos utilizados na aplicação do TSD nas mantas asfálticas, no trecho BR 020 – Paramoti

Na execução do TSD no trecho BR 020 – Paramoti, colocaram-se mantas asfálticas com moldes metálicos de diâmetro interno de 279 mm sobre a imprimação. O objetivo principal deste procedimento foi coletar os materiais aplicados e compactados sobre as mantas asfálticas para submetê-los ao ensaio de WTAT no LMP/UFC.

Apresentam-se, a seguir, os procedimentos usados para a aplicação do revestimento superficial duplo, no trecho em estudo, sobre as mantas e sua extração para serem submetidas ao ensaio de WTAT:

- 1) colocou-se sobre a imprimação a manta asfáltica com um molde metálico e uma bandeja para coletar o ligante e obter-se a taxa da 1ª aplicação;
- 2) o caminhão espargidor fez a 1ª aplicação do ligante;
- 3) foi retirada e pesada a bandeja do ligante para obter-se a 1ª taxa;
- 4) colocou-se a bandeja do agregado ao lado da manta;

- 5) aplicou-se o agregado com um distribuidor acoplado ao caminhão basculante;
- 6) foi retirada e pesada a bandeja do agregado para obter-se sua taxa;
- 7) a 1ª camada do agregado foi compactada com um rolo pneumático;
- 8) foi recolocada a bandeja para obter-se a 2ª taxa do ligante;
- 9) foi feita pelo espargidor a segunda aplicação do ligante;
- 10) a bandeja do ligante foi retirada e pesada para obter-se a sua 2ª taxa;
- 11) foi colocada a bandeja do agregado;
- 12) foi feita a distribuição da 2ª camada do agregado;
- 13) a bandeja do agregado foi retirada e pesada para obter-se sua 2ª taxa;
- 14) a 2ª camada do agregado foi compactada com um rolo pneumático;
- 15) deixaram-se os moldes em processo de cura submetidos ao tráfego por quatro dias. Em seguida fez-se a extração das mantas, levando-se ao LMP/UFC para execução do ensaio de WTAT.

Ilustra-se, na Figura 4.31, um resumo dos procedimentos descritos anteriormente.



Figura 4.31 - Procedimentos usados na aplicação e moldagem do revestimento.

Avaliaram-se as taxas dos revestimentos em TSD aplicados nas mantas asfálticas, em laboratório e em campo, em função do desgaste sofrido, quando submetidos ao ensaio WTAT. Na avaliação das taxas aplicadas no trecho, foram consideradas as rejeições do agregado. Foi realizada uma coleta em uma área correspondente a 1 m², próximo ao ponto onde extraiu-se o molde do revestimento, antes de aplicar-se o banho diluído.

4.2.6 - Quarto procedimento experimental – Avaliação dos revestimentos submetidos ao simulador de tráfego

Neste procedimento avaliou-se o tratamento superficial duplo aplicado em placas de solo-brita moldadas no LMP/UFC, para funcionarem como camada de base. Foi usado o agregado mineral e siderúrgico com a emulsão RR 2C e RRP-2C no revestimento aplicado nas placas. Após a moldagem e revestimento, as placas foram

submetidas a uma avaliação da textura através dos ensaios de mancha de areia.

Posteriormente foram submetidas, em pares, ao simulador de tráfego para avaliar-se o desempenho do revestimento. Cada par de placas foi colocado sob um eixo composto de dois pneumáticos que ficam permanentemente em contato com o revestimento. Essa avaliação deu-se em três operações simultâneas. A primeira avaliação após uma simulação de tráfego com 1000 ciclos, a segunda após 3000 ciclos e a terceira após 10000 ciclos.

Os parâmetros utilizados para análise do comportamento do revestimento após as simulações foram: a desagregação (o material desagregado foi retirado e pesado), o desgaste (foi feito uma avaliação visual) e a macrotextura (através do ensaio de mancha de areia).

Na Figura 4.32 apresenta-se uma sequência de procedimentos usados para a simulação e avaliação dos desgastes sofridos pelos revestimentos. Os passos mais importantes para esse procedimento foram:

- 1º passo: compactação do molde com solo brita;
- 2º passo: aplicação do revestimento em TSD;
- 3º passo: pesou-se a placa após ter sido aplicado o revestimento;
- 4º passo: avaliou-se a textura com o ensaio de mancha de areia antes da placa ser submetida ao simulador;
- 5º passo: submeteu-se as placas, em pares, ao módulo simulador;
- 6º passo: concluída a simulação, fez-se uma avaliação visual do desgaste;
- 7º passo: pesou-se a placa para uma avaliação de sua desagregação, e
- 8º passo: foi feito uma avaliação de sua textura através do ensaio de mancha de areia, após a placa ser submetida ao simulador;

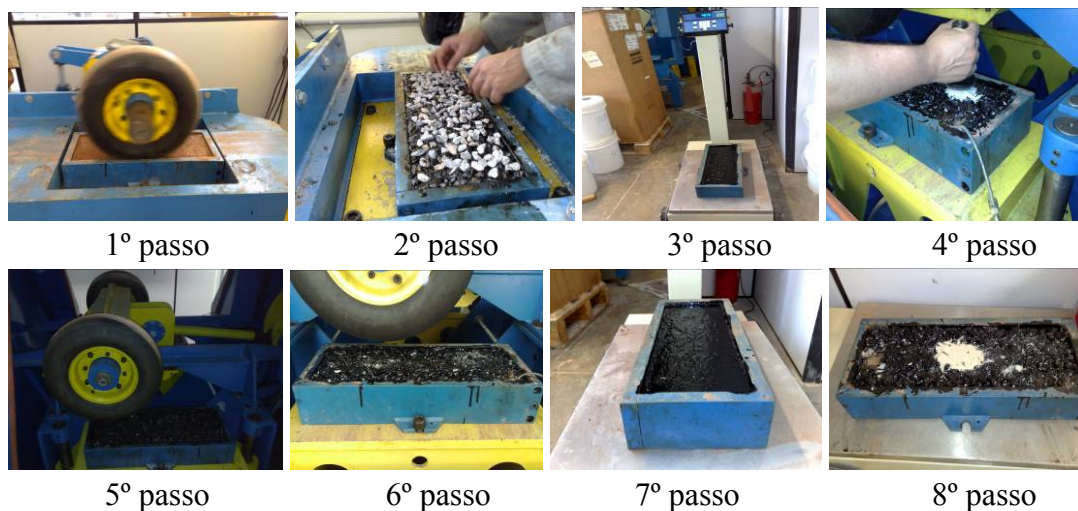


Figura 4.32 - Sequência de operações para simulação e avaliação das placas.

4.2.6.1 - Procedimentos utilizados na moldagem das placas com solo-brita

A mistura de solo brita, 80% de solo e 20% de brita, foi oriunda do trecho entroncamento leste sentido Caucaia – Icarai (localizado na Região Metropolitana de Fortaleza - RMF).

O solo foi submetido aos ensaios de compactação (DNER-ME 162/94), Índice de Suporte Califórnia (DNER-ME 049/94), Módulo de Resiliência e de densidade “*in Situ*” (DNER-ME 092/94).

A moldagem das placas seguiu o seguinte procedimento:

- iniciou-se o processo de moldagem das placas pela separação e preparo do solo brita;
- moldou-se o corpo de prova em cinco camadas. Em cada camada foi usado, aproximadamente, 3,5 kg de solo brita e cada camada foi submetida a uma pré-compactação com 30 golpes, estabelecida pelo autor desse trabalho, com uso do soquete Marshall;
- em seguida, colocou-se uma placa de aço sobre a camada de solo-brita a qual foi submetida a uma compressão de 600 kg, com uso do pneu compactador, com uma pressão de 6 bar e 15 passadas, do módulo de compactação;

- depois foi retirada a placa de aço e completou-se o molde com solo-brita, submetendo-se a camada a uma compactação com uso do pneu compactador com uma carga de 600 kg e com 15 passadas nas bordas e eixo;
- usando novamente a placa de aço sobre a camada de solo-brita, foi aplicada uma compressão de 600 kg com 15 passadas com uso do pneu compactador;
- depois retirou-se a placa de aço e usou-se mais uma vez o soquete Marshall, aplicando-se 30 golpes;
- finalmente colocou-se, mais uma vez, a placa de aço sobre a camada de solo-brita e aplicou-se uma carga de 600 kg com 15 passadas com uso do pneu compactador;
- concluído o processo de compactação, as placas foram submetidas ao ensaio de densidade “in situ” com o uso do frasco de areia.

Apresenta-se na Figura 4.33 os procedimentos utilizados para a moldagem das placas e do ensaio de densidade “in situ”.



Figura 4.33 - Procedimentos para a moldagem das placas e densidade “in situ”.

4.2.6.2 - Taxas dos materiais utilizados nos revestimentos submetidos ao simulador de tráfego

Procurou-se definir as taxas dos ligantes de acordo com as taxas estabelecidas pelo DER-CE, para um tráfego médio. Essas taxas foram definidas em função da granulometria dos agregados (DERT-ES-P 11/00), apresentada na Tabela 2.8 e Capítulo 2, para a classe II – III que são de: 0,94 L/m² para a primeira aplicação, 0,92 L/m² para a segunda aplicação e 0,50 L/m² para a terceira aplicação. Adotou-se valores arredondados de 1,00 L/m², para a primeira e segunda aplicações, e de 0,50 L/m² para a terceira, totalizando 2,50 L/m².

Procedeu-se a escolha das taxas dos agregados da seguinte forma: espalhou-se o agregado da 1^a camada de forma uniforme e sem superposição, pesou-se e obteve-se a taxa. Em seguida, espalhou-se os agregados da 2^a camada procurando-se preencher todos os vazios da 1^a camada, pesou-se e subtraiu-se o peso do agregado usado na 1^a e obteve-se as taxas dos agregados para serem usados na 2^a camada. Na Figura 4.34 ilustra-se o método usado para definição das taxas dos agregados.



Figura 4.34 - Método usado para definição das taxas dos agregados.

4.2.6.3 – Procedimentos utilizados no revestimento das placas

O primeiro procedimento utilizado para revestir a camada de base foi o de imprimação, iniciada após a adequada conformação geométrica da camada do solo brita. Em seguida, varreu-se a superfície, eliminando-se todo e qualquer material solto, aplicando-se o ligante betuminoso CM 30 na temperatura de 50 °C, por considerar-se essa temperatura a que proporciona a melhor viscosidade para espalhamento. Definiu-se uma taxa de 1,0 L/m² que foi aplicada em toda camada de forma uniforme.

Vale salientar que a taxa ideal para uma imprimação deve ser selecionada conforme o tipo e textura da base e do material asfáltico escolhido, sendo melhor aquela que após 24 horas da aplicação faz com que quase todo ligante tenha penetrado. Para RABÊLO (2006), a correta quantidade de ligante a ser aplicada para imprimação de uma base granular é um importante fator para o desempenho de um pavimento asfáltico.

Após considerar-se que a imprimação teve uma penetração satisfatória, nesta pesquisa considerou-se que a penetração satisfatória é de no mínimo 4 mm e no máximo 10 mm, iniciaram-se as aplicações da emulsão asfáltica e do agregado em duas aplicações simultâneas e sucessivas. Segundo LARSEN (1985), o ligante, após o espalhamento atinge a temperatura da superfície tratada em um tempo curto (da ordem de um a dois minutos). No caso da emulsão, a ruptura desta se dá também rapidamente, em poucos minutos, daí a necessidade de se aplicar os materiais de forma simultânea e rápida.

A primeira aplicação da emulsão, deu-se a uma temperatura de 60 °C, para emulsão RR-2C sem polímero, e a 65 °C para emulsão modificada com polímero, utilizando-se taxa de 1 L/m². Imediatamente aplicou-se a primeira camada de agregado, a qual foi submetida a uma compressão de 0,2 T. A segunda aplicação da emulsão deu-se da mesma forma que a primeira, a uma taxa de 1 L/m². Posteriormente, aplicou-se a segunda camada de agregado, submetendo-se, também, a uma compressão de 0,2 T. Por fim, concluiu-se com uma terceira aplicação de emulsão diluída em água na proporção de 1:1. Apresenta-se na Figura 4.35 os procedimentos usados na execução do revestimento do tipo TSD em um simulador de laboratório.

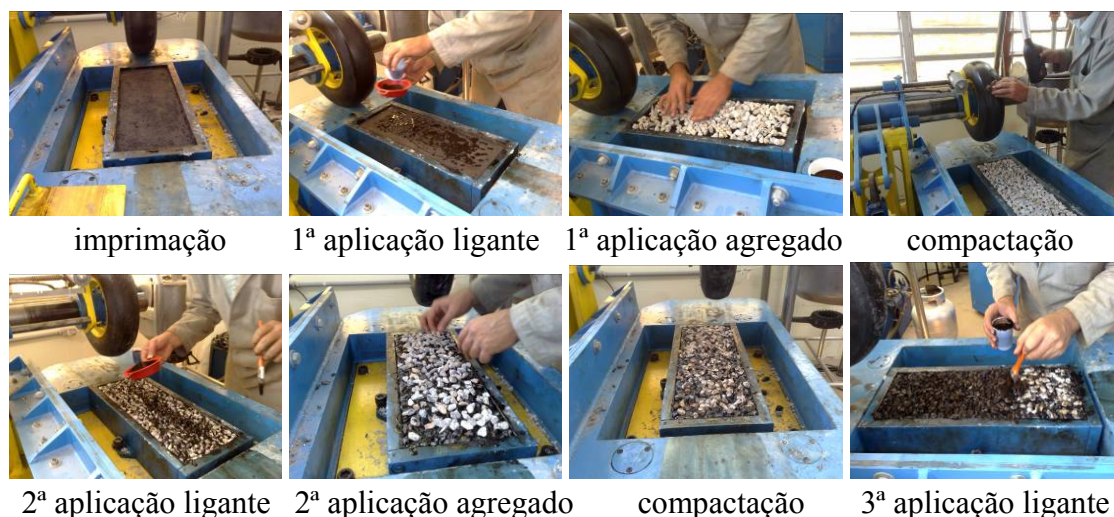


Figura 4.35 - Procedimentos usados na execução do revestimento.

4.2.7 - Quinto procedimento experimental – Avaliação da microtextura e macrotextura

O objetivo do quinto procedimento experimental foi determinar as características funcionais dos revestimentos em tratamento superficial utilizados nesta pesquisa. Mediram-se a macrotextura, através dos ensaios de mancha de areia e a microtextura, por meio do pêndulo britânico (conhecido na literatura internacional como *British Pendulum Tester*).

Iniciou-se este procedimento aplicando os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico na rodovia CE 162, trecho BR 020 – Paramoti, construída no período de fevereiro de 2009 a agosto de 2009.

O pêndulo britânico é um equipamento portátil que mede a perda de energia através do atrito entre a base emborrachada de um pêndulo e a superfície do pavimento. Esse equipamento é munido de um braço pendular cuja extremidade tem uma sapata recoberta de borracha para ser atritada contra a superfície do pavimento umedecida (Bernucci *et al.*, 2007). O ensaio é padronizado de acordo com a norma da *American Society of Testing Materials* – ASTM E-303- 93 (ASTM, 1998). O ensaio do pêndulo britânico foi executado somente no trecho BR 020 – Paramoti.

Para se realizar o ensaio do pêndulo britânico, inicialmente montou-se o aparelho em sua base composta de um pequeno pedestal, munido de um nível de bolha, de três pés ajustáveis, uma coluna e um calço de regulagem presa à base. Ajustou-se a base na horizontal com o parafuso de calagem e o auxílio do nível de bolha, mantendo-o nivelado. Fez-se a regulagem do aparelho e iniciou-se o ensaio, limpando-se a superfície com água para remover partículas soltas. A Figura 4.36 mostra o pêndulo britânico sendo operado no trecho BR 020 – Paramoti, para verificação do Valor de Resistência à Derrapagem (VRD).



Figura 4.36 - Pêndulo Britânico sendo operado no trecho.

O método de ensaio do pêndulo britânico proporciona a medição de características de aderência e microtextura de superfícies. Com este método pode-se determinar os efeitos relativos entre vários processos de polimento em materiais ou combinações de materiais, em pavimentos secos ou molhados. A classificação da microtextura é dada em função do VRD que é medido através do dinamômetro contido em uma das extremidades do pêndulo e estabelecida pelos critérios mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Classificação da microtextura com o pêndulo britânico (ABPv, 1999).

CLASSE	VRD - Valor de Resistência a Derrapagem (mm)
Perigosa	$VDR < 25$
Muito lisa	$25 \leq VRD \leq 31$
Lisa	$32 \leq VRD \leq 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq VRD \leq 46$
Medianamente rugosa	$47 \leq VRD \leq 54$
Rugosa	$55 \leq VRD \leq 75$
Muito rugosa	$VRD > 75$

Para o caso da macrotextura, a forma de sua medição é mais simples por meio do ensaio da mancha de areia. Esse ensaio é normalizado pela ASTM - E-965-96 (1998) e consiste em colocar sobre a superfície do pavimento um volume pré-determinado de areia fina e espalhá-la circularmente utilizando-se um disco com base de borracha. O ensaio caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento, quantificando-se a distância média entre os grânulos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento (Silva, 2007).

Na Figura 4.37 apresentam-se os equipamentos utilizados nos ensaios de mancha de areia



Figura 4.37 - Equipamentos utilizados no ensaio de Mancha de Areia.

O ensaio de mancha de areia foi também aplicado nos revestimentos em TSD executado nas mantas asfálticas em laboratório e em campo. Os valores de macrotextura obtidos nestes ensaios foram analisados e comparados entre si. Para realizar-se o ensaio de mancha de areia utilizou-se uma areia uniforme, arredondada, passante na peneira nº 60 (0,177 mm) e retida na peneira nº 80 (0,250 mm), com um volume de 25.000 mm³, conforme preconizado pela ASTM - E 965 -96 (1998).

A areia foi espalhada sobre a superfície do tratamento superficial duplo, em campo e em laboratório, com auxílio de uma base de um pistão circular que foi movimentada em círculos, paralelamente à superfície do revestimento, distribuída de forma homogênea, perfazendo um círculo de areia. O espalhamento cessou quando apareceram algumas pontas dos agregados. Mediu-se, na seqüência, o diâmetro do círculo de areia com auxílio de uma trena, em quatro direções distintas, e fez-se a média das quatro determinações. As imagens da Figura 4.38 mostram o procedimento

executivo para o ensaio da mancha de areia no trecho em análise, nas mantas extraídas no campo e preparadas em laboratório.

A altura média de mancha de areia foi calculada pela equação:

$$HS = \frac{4V}{D^2 \times (3,14)} \quad (4.1)$$

Onde:

HS = altura média de mancha de areia em mm;

V = volume constante de areia de 25.000 mm³;

D = diâmetro médio do círculo de areia em mm.



Figura 4.38 - Procedimentos do ensaio mancha de areia, em campo e laboratório.

A classificação da macrotextura foi dada em função da altura média de mancha de areia, segundo os critérios mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Classificação da macrotextura, mancha de areia (ABPv, 1999).

Altura média de mancha de areia (mm)	Textura superficial
$HS \leq 0,20$	Muito fina ou muito fechada
$0,20 < HS \leq 0,40$	Fina ou fechada
$0,40 < HS \leq 0,80$	Média
$0,80 < HS \leq 1,20$	Grosseira ou aberta
$HS > 1,20$	Muito grosseira ou muito aberta

O DNIT (2006) incluiu em seu Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, faixas de manchas de areia e valores mínimos do pêndulo britânico. A macrotextura verificada por meio da altura de areia (HS) deve estar no intervalo de 0,60 a 1,20 mm, como forma de permitir que a textura superficial possa ser classificada de média a grosseira, ou aberta. Por sua vez, a condição de atrito obtida por meio do pêndulo britânico, expressa em valor de resistência à derrapagem, deve estar no intervalo de 47 a 75 mm, sendo classificada entre medianamente rugosa a rugosa.

4.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo tratou-se de todos os ensaios de caracterização dos materiais usados para realização desta pesquisa, bem como dos métodos e procedimentos usados para a preparação e moldagem dos revestimentos em tratamento superficial duplo sobre mantas asfálticas, para serem submetidos ao ensaio WTAT. Foram extraídas amostras do tratamento executado no trecho: BR 020 – Paramoti, para também serem submetidas ao ensaio WTAT.

Foram realizados os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico no revestimento executado no trecho em estudo e nas mantas asfálticas preparadas em laboratório. Contemplou-se, também, os procedimentos experimentais usados para as avaliações das taxas aplicadas nos revestimentos aplicados sobre as mantas e em campo, após serem submetidas ao ensaio WTAT.

No capítulo que se segue serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos a partir da execução da metodologia aqui descrita.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios de laboratório executados nos revestimentos em TSD aplicados em mantas asfálticas, seguindo-se as metodologias descritas no capítulo anterior. Será também analisado o revestimento aplicado no trecho BR 020 – Paramoti e em placas moldadas com solo brita.

Inicialmente, serão apresentados os resultados da caracterização do agregado mineral e agregado siderúrgico tais como: granulometria, abrasão Los Angeles, absorção e densidade, índice de forma, durabilidade, adesividade, análise química, análise química MEV, difração de raio X, expansão, lixiviação e solubilização.

Em seguida serão apresentados os ensaios de caracterização das emulsões asfálticas empregadas, viscosidade saybol furol, sedimentação, carga da partícula, resíduo por evaporação, pH, desemulsibilidade, penetração, ponto de amolecimento, ductilidade e recuperação elástica.

Posteriormente, serão apresentados os resultados dos ensaios de WTAT para cada revestimento em tratamento superficial duplo aplicado nas mantas asfálticas. Serão discutidas as taxas aplicadas em cada revestimento, o desgaste sofrido após serem submetidos ao ensaio WTAT e os resultados dos ensaios do revestimento extraído do trecho BR 020 – Paramoti (suas taxas e a rejeição dos agregados).

Serão apresentados as taxas e os procedimentos usados na moldagem e revestimento das placas de solo-brita, bem como os resultados obtidos dos ensaios realizados nas placas submetidas ao simulador de tráfego. Serão discutidos, também, os resultados dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico executados no trecho BR 020 – Paramoti, bem como os resultados dos ensaios de mancha de areia dos

revestimentos aplicados nas mantas asfálticas e nas placas revestidas com os agregados e emulsões utilizadas nesta pesquisa.

5.2 - RESULTADOS DO PRIMEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.2.1 - Resultados dos ensaios realizados nos agregados

A brita utilizada no TSD aplicado no trecho BR-020 – Paramoti e nas mantas asfálticas moldadas no laboratório foi a mesma, sendo adquirida na pedreira de Itaitinga. Os resultados dos ensaios de caracterização serão apresentados nos itens seguintes.

5.2.1.1 - Ensaios de granulometria

Os ensaios de granulometria foram executados nos laboratórios da obra e no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC).

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 e Figuras 5.1 5.2 apresentam-se os resultados da granulometria da brita da 1ª camada (amostra 01 - AM 01) e 2ª camada (amostra 02 – AM 02), respectivamente, utilizadas na aplicação do TSD no trecho BR 020 – Paramoti e nas mantas asfálticas coletadas no trecho. Os resultados apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2 são médias aritméticas dos ensaios realizados. Conforme os resultados apresentados, a brita utilizada na 1ª camada se enquadra na faixa “A” e a brita utilizada na 2ª camada se enquadra na faixa “B”, recomendadas pelo DNIT (DNER-ES 309/97).

Para a aplicação da brita e escória nas mantas asfálticas e nas placas moldadas no LMP/UFC, enquadrou-se esses agregados na faixa granulométrica II – III, normalizada pelo DER para uso em TSD (DERT-ES-P 11/00), conforme mencionada no Capítulo 2, Tabela 2.8.

Tabela 5.1 - Granulometria da brita da 1ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.

PENEIRAS		BRITA			
Pol	mm	Quantidade retida (g)	% Retida	Quantidade passada (g)	% Que passa
1"	25,4	0,00	0,00	7347,40	100
3/4"	19,1	283,80	3,86	7063,60	96,14
1/2"	12,5	4275,80	58,19	2787,80	37,94
3/8"	9,5	1896,80	25,82	891,00	12,13
Nº 4	4,76	835,60	11,37	55,40	0,75
Nº 10	2	20,00	0,27	35,40	0,48
Nº 200	0,074	15,80	0,22	10,60	0,27
Fundo		19,60	0,27	-	-
Total		7347,4	100	-	-

Granulometria Brita - Faixa "A" - AM-01

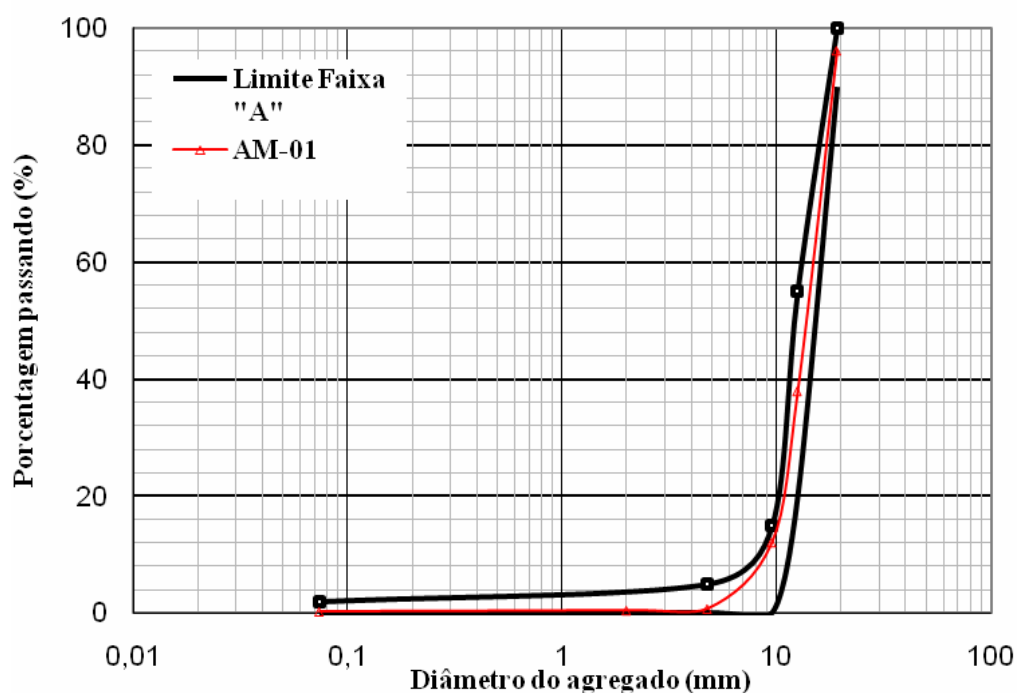


Figura 5.1 - Curva granulométrica da brita da 1ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.

Tabela 5.2 - Granulometria da brita da 2ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.

PENEIRAS		BRITA			
Pol	mm	Quantidade retida(g)	% Retida	Quantidade passada (g)	% Que passa
1/2"	12,5	0,00	0,00	4650,20	100
3/8"	9,5	38,40	0,83	4611,80	99,17
Nº 4	4,76	3236,10	69,59	1375,70	29,58
Nº 10	2	1277,80	27,48	97,90	2,11
Nº 200	0,074	74,70	1,61	23,20	0,50
Fundo		23,20	0,50	-	-
Total		4650,20	100	-	-

Granulometria Brita - Faixa "B" - AM-02

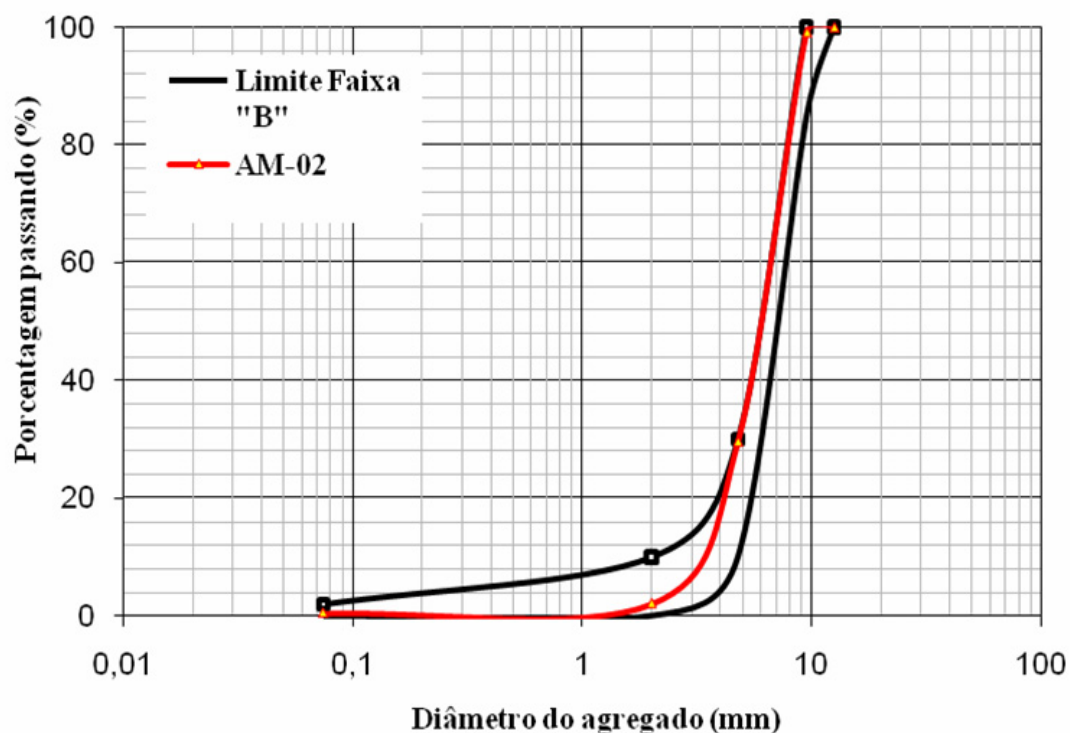


Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita da 2ª camada aplicada no trecho e nas mantas asfálticas.

5.2.1.2 - Ensaio de abrasão Los Angeles

Os agregados estão sempre sofrendo desgaste quando submetidos à ação do tráfego ou, até mesmo, pela compactação aplicada às camadas do pavimento nas quais se usa esse material, cujo desgaste é avaliado por meio do ensaio de abrasão *Los Angeles*. De acordo com a norma (DNER – ME 035/98), a abrasão deve ser expressa com aproximação de 1%.

O DNIT em sua norma para ensaio (DNER – ME 035/98) estabelece para o ensaio de abrasão *Los Angeles* as graduações A, B, C, D, E, F e G (ver Tabela 5.3). As graduações usadas para os agregados (brita e escória) da 1ª camada foi a graduação B e 2ª camada a graduação C. A massa total foi de 5.000 g para as duas graduações e foram realizadas em 500 rotações do tambor. A carga abrasiva foi de 4.584 g e 3.330 g para as graduações B e C, respectivamente. Apresentam-se na Tabela 5.3, as graduações usadas neste ensaio segundo a norma citada.

Tabela 5.3 - Graduação para ensaio *Los Angeles* (DNER – ME 035/98).

Peneiras Abertura (mm)		Amostra – massa parcial (g)						
Passando	Retido	Grad. A	Grad B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76,0	63,0	-	-	-	-	2500±50		
63,0	50,0	-	-	-	-	2500±50		
50,0	38,0	-	-	-	-	5000±50	5000±50	
38,0	25,0	1250±25	-	-	-	-	5000±25	5000±25
25,0	19,0	1250±25	-	-	-	-		5000±25
19,0	12,5	1250±10	2500±10	-	-	-		
12,5	9,5	1250±10	2500±10	-	-	-		
9,5	6,3	-	-	2500±10	-	-		
6,3	4,8	-	-	2500±10	-	-		
4,8	2,4	-	-	-	5000±10	-		
Massas totais (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50
Nº de rotações		500	500	500	500	1000	1000	1000

Os resultados do ensaio de abrasão do agregado mineral e escória de aciaria estão mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos no ensaio Los Angeles para a brita e escória.

Graduação	Nº de esferas	Massa de carga (g)	Abrasão Los Angeles (%)	
			Brita	Escória
B	11	4.582 ± 25	42,18	21,50
C	8	3.330 ± 20	22,80	20,35

O resultado encontrado para a brita no ensaio de desgaste *Los Angeles* deu um pouco superior ao limite estabelecido pelo DNIT (DNER-ME 035) que deve ser igual ou inferior a 40%. A própria norma admite valores superiores, no caso de utilização anterior terem comprovado desempenho satisfatório. A escória de aciaria apresentou um resultado do ensaio de desgaste *Los Angeles* inferior ao estabelecido pelo DNIT (DNER-EM 262/94), que é de no máximo 25%. Mediante os resultados obtidos neste ensaio, classificam-se os agregados como satisfatórios para suas aplicações em TSD.

5.2.1.3 - Ensaio de absorção e densidade

Foram realizados ensaios na brita e na escória para obterem-se os valores da absorção e densidades. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Resultados dos ensaios de absorção e densidade da brita e escória.

Ensaio						
Diâmetro do Agregado(pol)	Brita			Escória		
	Absorção (%)	Densidade		Absorção (%)	Densidade	
		Real (g/cm ³)	Aparente (g/cm ³)		Real (g/cm ³)	Aparente (g/cm ³)
3/4	0,93	2,750	2,681	1,10	3,690	3,400
3/8	1,27	2,730	2,638	0,7	3,300	2,900

O valor estabelecido pela norma DNER – ME 262/94 para absorção de água nas escórias de aciaria é de no mínimo 1% e no máximo 2%. Nota-se que o valor encontrado para a absorção d'água da escória utilizada neste estudo enquadra-se no limite estabelecido para a escória de diâmetro igual a 3/4" e apresenta valor inferior ao limite mínimo estabelecido pela norma do DNIT (DNER-ME-262/94) para a escória de diâmetro igual a 3/8". O autor deste trabalho considera os resultados satisfatórios. O agregado que mais absorve ligante é o agregado graúdo, isso é, o agregado da 1ª camada.

As normas, do DNIT (DNER-ES 309/97) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00), não determinam limites de absorção dos agregados minerais para uso em TSD. Para uso geral em pavimentação somente a norma do DNIT (DNER-ME-262/94) estabelece limites de absorção para as escórias de aciaria.

A densidade real e a densidade aparente da escória e brita de 3/4" de diâmetro foram determinadas através da norma do DNIT (DNER – ME 084/95). Os valores encontrados (média de três determinações) para a brita e escória estão mostrados na Tabela 5.5. A densidade real da escória e brita 3/8" (passando na peneira nº 4) também foi determinada (DNER – ME 084/95). Os valores encontrados (média de três determinações) estão mostrados na Tabela 5.5.

5.2.1.4 - Ensaio de índice de forma

Para realizar-se o ensaio de índice de forma a norma (DNER – ME 086/94) estabelece quatro graduações A, B, C e D. Os agregados usados nesta pesquisa enquadraram-se nas graduações C e D.

Os valores do índice de forma encontrados na graduação C para a brita e escória foram 0,66 e 0,76 (indicando que a escória é mais cúbica do que a brita), respectivamente. Para a graduação D os valores do índice de forma encontrados para brita foi de 0,65 e para a escória de 0,69 (indicando que a brita e a escória possuem formatos cúbicos quase semelhantes). Se o valor for mais próximo de 0, trata-se de um agregado lamelar. Caso seja mais próximo do 1, é um agregado cúbico. Pode-se observar que a brita e a escória apresentaram, nas duas faixas, valores superiores ao mínimo estabelecido pelas normas.

As normas do DNIT (DNER-ES 309/97) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00) estabelecem que a forma do agregado para uso em TSD deve ser tal que o índice de forma não deve ser inferior a 0,5. Para as escórias a norma DNIT (DNER-ME-262/94) não estabelece limites.

Mediante os resultados apresentados, conclui-se que os agregados apresentam forma mais próxima da cúbica. Os agregados que apresentam forma cúbica são os mais indicados para pavimentação. Os agregados lamelares são descartados para uso em pavimentação, principalmente em tratamento superficial, devido à facilidade que eles apresentam em quebrarem-se, quando submetidos ao tráfego e/ou compactações. Nos tratamentos superficiais os agregados lamelares favorecem a ocorrência do processo de exsudação.

5.2.1.5 - Ensaio de durabilidade

As amostras de escória e brita (utilizadas para moldagem das mantas e placas) foram imersas em uma solução de sulfato de sódio (NaSO_4) durante 16 horas, aproximadamente, à temperatura constante de 20°C. Depois, as amostras foram drenadas e secas em estufa (110°C). Esse processo foi repetido cinco vezes (ciclos). A perda de massa, definida como a porcentagem em peso de cada fração das amostras que após o ensaio passou na peneira na qual originalmente era retida, foi de 8,1% para a brita e 1,86 % para escória. Apresenta-se na Tabela 5.6 o resultado dos ensaios de durabilidade na brita e na Tabela 5.7 na escória.

As normas, do DNIT (DNER-ES 309/97) e do DER/CE (DERT-ES-P 11/00), para TSD, estabelecem que o limite máximo admissível para a perda de massa nos agregados é de 12%. Se houver uma perda superior a 12% com sulfato de sódio, em 5 ciclos, deve-se impedir a britagem da pedra, conseqüentemente, seu uso em pavimentação.

Tabela 5.6 - Resultado dos ensaios de durabilidade na brita.

Composição Granulométrica da Brita					
Passando mm	Retido mm	%	Peso das frações antes do ensaio (g)	% Perda	% Perda Corrigida
Material passando na peneira de 9,5 mm					
0,15	-	3,20	-	-	-
0,30	0,15	7,90	-	-	
0,60	0,30	15,7	100	3,00	
1,20	0,60	18,4	100	4,20	0,77
2,40	1,20	26,2	100	9,10	2,38
4,80	2,40	19,3	100	10,80	2,08
9,50	4,80	9,3	-	10,80	0,92
	Total	100	400	-	6,62
Material retido na peneira de 4,8 mm					
63,50	38,00	5,00	3000	3,50	0,17
38,00	19,00	30,40	1500	6,90	2,09
19,00	9,50	52,60	1000	8,70	4,57
9,50	4,80	12,00	300	10,60	1,27
	Total	100	5800	-	8,10

Tabela 5.7 - Resultado dos ensaios de durabilidade na escória.

Composição Granulométrica da escória					
Passando mm	Retido mm	%	Peso das frações antes do ensaio (g)	% Perda	% Perda Corrigida
Material passando na peneira de 9,5 mm					
0,15	-	3,20	-	-	-
0,30	0,15	7,90	-	-	
0,60	0,30	15,70	100	3,00	
1,20	0,60	18,40	100	4,20	0,77
2,40	1,20	26,20	100	9,10	2,38
4,80	2,40	19,30	100	10,80	2,08
9,50	4,80	9,30	-	10,80	0,92
	Totais	100	400	-	6,62
Material retido na peneira de 4,8 mm					
63,50	38,00	5,00	3000	3,50	0,05
38,00	19,00	30,40	1500	6,90	1,39
19,00	9,50	52,60	1000	8,70	0,45
9,50	4,80	12,00	300	10,60	0,42
	Totais	100	5800	-	1,86

5.2.1.6 - Ensaio de adesividade

Observou-se após o ensaio que a brita e a escória apresentaram uma adesividade satisfatória com o uso da emulsão RR-2C (sem polímero e com polímero), sendo que a brita obteve um envolvimento em torno de 90%, e a escória em torno de 80%.

O ensaio de adesividade é um ensaio que apresenta muita subjetividade em seus resultados, portanto bastante questionado no meio técnico, por se tratar de um resultado fornecido pelo executor de forma visual. Alguns autores preferem utilizar a metodologia AASHTO T – 283 (BERNUCCI *et al.*, 2007).

5.2.1.7 - Análise química quantitativa

Os ensaios de análise química, difração de raio X, expansibilidade e ensaios de lixiviação e solubilização foram efetuados somente nos agregados siderúrgicos.

Os resultados do ensaio de análise química quantitativa, realizado pelo departamento de Física da UFC, apresentaram uma maior concentração de Fe, Ca e Si, conforme mostra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Análise química quantitativa da amostra de escória de aciaria.

Elemento	%
Fe	42,72
Ca	31,88
Si	11,02
Mg	4,10
Al	3,34
Mn	3,16
Ti	0,70
Zn	0,70
Mo	0,65
Cr	0,53
K	0,33
P	0,22
S	0,22
Ag	0,19
Cu	0,10
Sr	0,06
Zr	0,05

5.2.1.8 - Análise química qualitativa (MEV)

Os resultados dos ensaios de análise química qualitativa (MEV) estão apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, onde é possível perceber, respectivamente, os elementos existentes nesta amostra (carbono, cálcio, oxigênio, ferro, magnésio, alumínio, silício), bem como a forma e a textura dos grãos. Percebe-se que o gráfico acusa a presença de ouro, elemento utilizado no recobrimento. Porém, esse elemento não está presente na escória de aciaria.

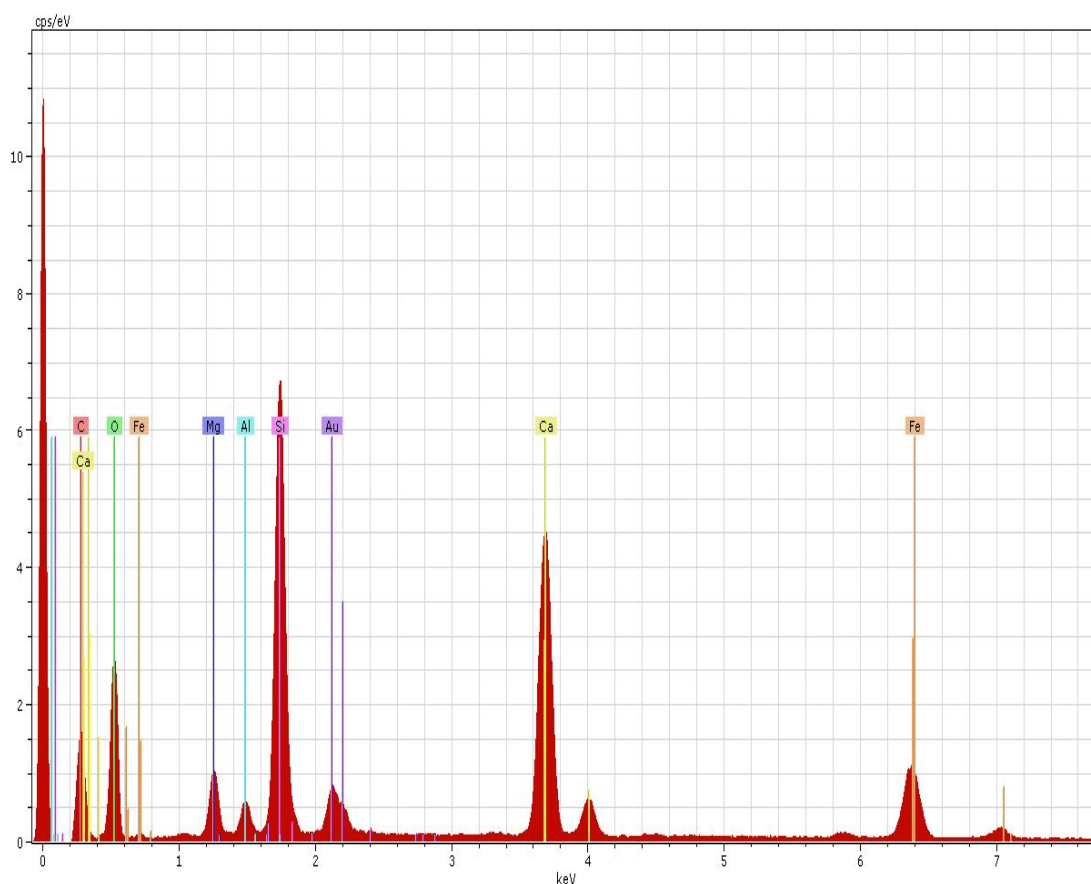


Figura 5.3 - Picos dos elementos existentes na escória de aciaria, obtidos com a utilização do MEV.

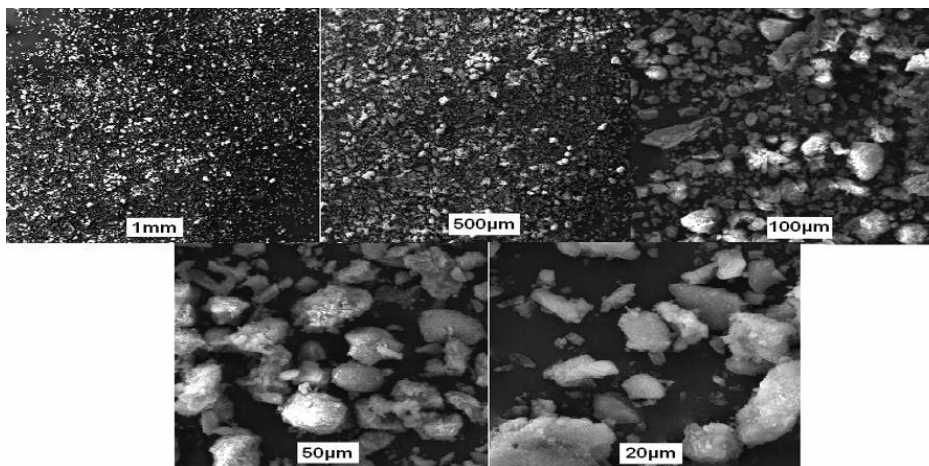


Figura 5.4 - Fotos da escória de aciaria em várias escalas.

5.2.1.9 - Difração de raio X

Como resultado, o ensaio de difração de raios-X fornece um gráfico do ângulo de espalhamento (formado entre a onda incidente e a onda espalhada) *versus* intensidade dos picos de incidência. Esse gráfico é chamado difratograma. Percebe-se que existem vários picos para um mesmo composto, com várias intensidades, porque o mesmo é formado por vários planos. Na Figura 5.5, é mostrado o difratograma para a amostra de escória de aciaria. Os resultados são encontrados a partir da comparação com padrões de difração já conhecidos.

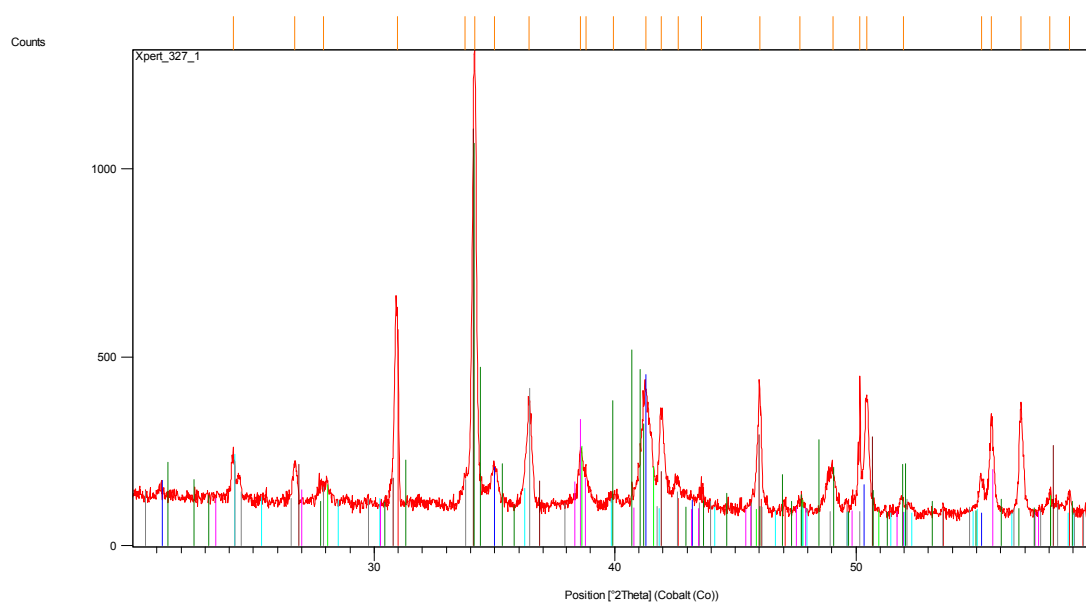


Figura 5.5 - Difratograma da escória utilizada.

Na amostra de escória de aciaria foram encontrados diversos compostos diferentes, dentre eles: quartzo (SiO_2), magnetita (Fe), sulfeto de silício (SiS_2), silicato de cálcio e manganês ($\text{Ca}_4 \text{Mn}_4 \text{Si}_8 \text{O}_{24}$), dentre outros. A não existência dos compostos responsáveis pela expansão do material é um indicativo de que a escória foi realmente curada.

5.2.1.10 - Ensaio de expansão

No dia 21/08/2008 dez toneladas de escória de aciaria foi estocada a céu aberto, sobre uma lona impermeável para evitar a perda do material fino, nas dependências do LMP/DET/UFC. No dia 28/08/08 iniciou-se a cura através do processo de pré-hidratação, realizado a céu aberto, submetendo-se o material ao contato de água e sol, conforme mostra a Figura 5.6. Depois de colocado sobre a lona, o rejeito foi misturado para garantir sua homogeneização. Esse procedimento foi repetido a cada coleta de escória realizada.



Figura 5.6 - Estocagem e início do processo de cura da escória.

Em geral, a cura das escórias apresenta variações em função da profundidade do material empilhado. Portanto, deve-se ficar sempre removendo a escória empilhada para eliminar-se a película que dificulta a penetração da água nas camadas mais profundas da pilha. Não existe um consenso acerca do período necessário para que as escórias de aciaria, expostas ao tempo, seja curada. Enquanto alguns autores determinem 6 meses, outras determinam de 1 a 2 anos para que ocorra a cura, conforme discutido no Capítulo 3.

A diferença entre as condições de cura do exterior e do interior das pilhas de escórias de aciaria é um dos principais fatores que poderão resultar em problemas na pavimentação. Com efeito, pode-se assumir, erroneamente, que o material já esteja

curado após o período de 6 meses ou 1 ano.

No dia 18/08/2009, após um ano em que estava submetida ao processo de cura a céu aberto, iniciou-se o ensaio de expansão na escória utilizada nesta pesquisa. O ensaio foi realizado no LMP/UFC em três corpos de prova, seguindo-se o método de ensaio de expansão PTM – 130/1978. Os três corpos de prova moldados foram submersos em tambores com água, com umidade próxima da ótima, sendo que um foi colocado no ramo seco, outro no ramo úmido e outro entre os dois anteriores. Os corpos de prova foram colocados na estufa, a 71°C. Iniciou-se as leituras no extensômetro, as quais foram feitas por quatorze dias consecutivos. As etapas deste processo podem ser visualizadas no Capítulo 4, Figura 4.13.

A primeira leitura foi feita após trinta minutos da imersão dos corpos de prova. As outras leituras foram realizadas durante treze dias, no mesmo horário, para avaliação do potencial expansivo da escória de aciaria. Constatou-se após às quatorzes leituras, que os três corpos de prova não apresentaram nenhuma expansão. Pode-se concluir, que o processo usado e o tempo em que a escória ficou exposta ao sol e a chuva, e os elementos reativos constituintes na escória, contribuíram para a neutralidade da expansão na escória usada nesta pesquisa.

Entretanto, todas as escórias de aciaria, tanto as produzidas em forno elétrico como as produzidas em alto forno, apresentam alto índice de expansão quando produzidas. A medida da expansão, no momento em que a escória saiu do forno, apresentou um índice superior ao estabelecido pela norma do DNIT (DNER – EM 262/94) que foi de 3,75%, índice fornecido pela empresa fabricante da escória.

5.2.1.11 - Ensaio de lixiviação e solubilização

Os resultados do ensaio de lixiviação, apresentados na Tabela 5.9, mostram que os parâmetros para classificação apresentaram concentrações inferiores às recomendadas pela norma ABNT/NBR 10004/2004. Portanto, os resultados apresentados confirmam que a escória estudada não apresenta concentração de substâncias que venham causar agressão ao meio ambiente. A escória utilizada nesta

pesquisa, para aplicação em tratamento superficial duplo, não causará problemas ambientais nas camadas de pavimentação, quando este agregado for lavado ou até mesmo por percolação.

Tabela 5.9 - Resultado dos ensaios de lixiviação.

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE RESÍDUO						
MA nº 0511/09		Amostra nº 80.810		Emissão 15/5/09		
ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO – NBR 10.005:2004(ANEXO “F”)						
Parâmetros	Unid	Cod. Identif ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultados	Interpretação	LD ⁽³⁾
INORGÂNICOS						
Arsênio (As)	mg/L	DOO05	1	<	abaixo do LD	0,1
Bário (Ba)	mg/L	D0006	70	1,7	abaixo do VPM	0.1
Cádmio (Cd)	mg/L	D0007	0,5	<	abaixo do LD	0.02
Chumbo (Pb)	mg/L	D0008	1	<	abaixo do LD	0,02
Crômo total Cr)	mg/L	D0009	5	<	abaixo do LD	0,02
Mercurio (Hg)	mg/L	D0011	0,1	<	abaixo do LD	0,001
Prata (Ag)	mg/L	D0012	5	<	abaixo do LD	0,01
Selênio (Se)	mg/L	D0013	1	<	abaixo do LD	0,1
Fluoreto (F)	mg/L	D0010	150	0,56	abaixo do VPM	0,02
Tempo de lixiviação: 18 hs.		Solução de lixiviação nº 1			pH final: 6,37	
PARÂMETROS COMPLEMENTARES PARA CLASSIFICAÇÃO						
Parâmetros	Unid	Cod. Identif ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultados	Interpretação	LD ⁽³⁾
pH 1:1	-	D002	2,00-15,50	9,16	Aceitavel	0,01
Presença de líquidos livres ⁽⁴⁾ : Não					Aspecto: Pedra	
% voláteis (105 °C): 0,40					Cor: Cinza	
% não-voláteis: 99,60						

(1) Código de identificação conforme NBR-10004
(2) V.P.M – Valor Médio Permitido
(3) L.D – Limite de Detecção
(4) “Test Paint Filter”: 100 gr. Do material em suspensão durante 5 minutos em funil de malha 60 mesh

METODOLOGIA: “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 21th ed.” And “USEPA SW-846 – Test Methods for Evaluating Solid Waste – Physical/Chemical Methods”

Os resultados dos ensaios de solubilização, apresentados na Tabela 5.10, apresentam características satisfatórias. Pelas características obtidas nas análises físico-químicas dos ensaios realizados, e por não ter ultrapassado nenhum dos limites analíticos supracitados, a escória de aciaria foi classificada como Classe II – Resíduo não-perigoso inerte. Portanto, o risco de contaminação ambiental da escória de aciaria usada neste trabalho inexistente.

Tabela 5.10 - Resultado dos ensaios de solubilização.

RELATÓRIO DE ANÁLISE DE RESÍDUO					
MA n° 511/09		Amostra n° 80.810		Emissão 15/05/09	
ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO – NBR 10.006:2004 (ANEXO “G”)					
Parâmetros	Unid.	VPM ⁽¹⁾	Resultados	Interpretação	LD ⁽²⁾
Alumínio (Al)	mg/L	0,2	<	abaixo do LD	0,1
Arsênio (As)	mg/L	0,01	<	abaixo do LD	0,01
Bário (Ba)	mg/L	0,7	<	abaixo do LD	0,1
Cádmio (Cd)	mg/L	0,005	<	abaixo do LD	0,002
Chumbo (Pb)	mg/L	0,01	0,008	abaixo do VPM	0,002
Cianeto (CN)	mg/L	0,07	<	abaixo do LD	0,01
Cloreto (Cl)	mg/L	250	<	abaixo do LD	5
Cobre (Cu)	mg/L	2	<	abaixo do LD	0,02
Crômio total (Cr)	mg/L	0,05	<	abaixo do LD	0,02
Fenóis totais	mg/L	0,01	<	abaixo do LD	0,01
Ferro (Fe)	mg/L	0,3	<	abaixo do LD	0,02
Fluoreto (F)	mg/L	1,5	0,28	abaixo do VPM	0,02
Manganês (Mn)	mg/L	0,1	0,06	abaixo do VPM	0,02
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,001	<	abaixo do LD	0,001
Nitrato (N)	mg/L	10	<	abaixo do LD	0,0
Prata (Ag)	mg/L	0,05	<	abaixo do LD	0,01
Selênio (Se)	mg/L	0,01	<	abaixo do LD	0,01
Sódio (Na)	mg/L	200	1,0	abaixo do VPM	0,1
Sulfato SO ₄ 2)	mg/L	250	<	abaixo do LD	10
Surfactantes	mg/L	0,5	<	abaixo do LD	0,01
Zinco (Zn)	mg/L	5	<	abaixo do LD	0,02
pH final da solução:			8,14		

(1) V.P.M. – Valor Máximo Permitido

(2) L.D – Limite de Detecção

METODOLOGIA: “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 21th ed.” And “USEPA SW-846 – Test Methods for Evaluating Solid Waste – Physical/Chemical Methods”

Ressalta-se que a escória de aciaria submetida aos ensaios de lixiviação e solubilização esteve em processo de cura no pátio do LMP/UFC por aproximadamente 1 ano. De acordo com os resultados obtidos, considerou-se que a escória de aciaria apresenta característica físico-química satisfatória para uso em pavimentação, especialmente no revestimento em que a mesma foi aplicada nesta pesquisa, isso é, no tratamento superficial duplo.

5.2.2 - Resultados dos ensaios realizados nas emulsões

5.2.2.1 - Ensaio de caracterização das emulsões

Os resultados da caracterização das emulsões RR-2C e RRP-2C e os limites admissíveis pelas normas são mostrados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados dos ensaios realizados nas emulsões.

Ensaio	Normas	Limites		Resultados obtidos	
		Mínimo	Máximo	RR 2C	RRP 2C (SBS)
Viscosidade Saybolt Furol 50°C,s	ABNT NBR 14491/00	100	400	304	170
Sedimentação (%)	DNER ME 006/00	-	5	0,05%	0,1
Carga da partícula	ABNT NBR 6567/00	positiva	-	positiva	positiva
Resíduo por evaporação(%)	ABNT NBR 14376/99	67	-	67	68,9
Peneiração,084mm,%em peso	ABNT NBR 14393/99	-	0,1	0,001	-
pH	ABNT NBR 6299/99	-	-	2,56	2,71
Desemulsibilidade (%)	DNER-ME 063/94	50	-	50,37	63,20
Penetração,100g,5s, 25°C,0,1mm	ABNT NBR 6567/00	45	150	-	55
Recuperação elástica 25°C,20cm	DNER – ME 382/99	75	-	-	73
Ductilidade,25°C,5cm/mim,cm	ABNT IBP P-MB-167	60	-	-	92
Ponto de amolecimento, °C	ABNT NBR 14491/00	55	-	-	65

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.11, todos os ensaios realizados nas emulsões asfálticas RR 2C e RRP 2C apresentam resultados que se enquadram dentro dos limites estabelecidos pelas normas usadas. As emulsões asfálticas RR-2C são empregadas em vários tipos de serviços, principalmente nos de penetração, como no caso dos tratamentos superficiais. As emulsões RR-2C são mais utilizadas quando se necessita de um produto mais viscoso e com maior teor de resíduo asfáltico. Classifica-se as emulsões utilizadas nesta pesquisa como satisfatórias para uso em tratamento superficial.

As emulsões sem polímeros já são bastante usadas nos tratamentos superficiais duplos, as quais apresentam resultados satisfatórios tanto na aplicação quanto na durabilidade dos tratamentos superficiais.

As emulsões modificadas por polímero apresentam propriedades diferenciadas,

ou seja, maior coesão, maior adesão aos agregados, boa resistência ao envelhecimento e susceptibilidade térmica, sendo mais adequada em toda a faixa de utilização de temperatura do pavimento. Esses valores resultam em maior resistência à fadiga e a deformação permanente.

Tendo em vista todos esses requisitos atribuídos às emulsões modificadas por polímero, classificam-se as mesmas como sendo um produto apropriado para aplicação em tratamento superficial. Considere-se, também, que essas emulsões são estáveis em temperaturas mornas e mais flexíveis em temperaturas mais frias.

Verificou-se, nesta pesquisa, que a emulsão asfáltica RRP-2C modificada por polímero SBS além de apresentar uma ruptura rápida e uma boa viscosidade, apresentou alta adesividade, flexibilidade, resistência ao envelhecimento e à exsudação frente às variações de temperatura. Considerando-se essas características e por ser o tratamento superficial um revestimento que apresenta uma textura porosa, conseqüentemente um alto índice de ruído, as emulsões asfálticas modificadas com polímero devem proporcionar uma superfície mais fechada.

5.3 - RESULTADOS DO SEGUNDO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL- CONFECÇÃO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DUPLOS EM LABORATÓRIO

Executou-se em laboratório quatro tipos de revestimentos em Tratamento Superficial Duplo (TSD). O primeiro e o segundo revestimento foram aplicados com o uso de emulsão asfáltica RRP-2C melhorada por polímero SBS. No primeiro revestimento usou-se escória de aciaria e no segundo revestimento usou-se brita. O terceiro revestimento aplicado foi com o uso de emulsão asfáltica RR-2C sem polímero e escória de aciaria. O quarto revestimento foi aplicado com o uso de emulsão asfáltica RR-2C sem polímero e brita (ver esquema apresentado no Capítulo 4, Figura 4.26).

As primeiras aplicações dos quatro tipos de revestimento em TSD foram feitas no laboratório da empresa Asfaltos Nordeste. Posteriormente, deu-se continuidade às aplicações no LMP/UFC. Foram feitas 20 aplicações com uso de emulsão asfáltica

RRP-2C, sendo 10 aplicações com escória de aciaria e 10 com brita, e 18 aplicações com o uso de emulsão asfáltica RR-2C, sendo 9 aplicações com escória de aciaria e 9 com brita, sobre mantas asfálticas.

Por ser um material impermeável e flexível, procurou-se utilizar as mantas asfálticas para receber as aplicações dos materiais usados no revestimento em TSD. Considerou-se, pelas suas características, as mantas asfálticas como sendo a camada imprimada do pavimento. Levou-se, também, em conta a facilidade de sua remoção, juntamente com o revestimento para ser submetido ao ensaio de WTAT.

Para tais aplicações usaram-se técnicas semelhantes às empregadas em campo, diferenciando-se na forma e equipamentos. As primeiras aplicações, realizadas no laboratório da empresa Asfaltos Nordeste foram feitas de forma aleatória, observando-se as quantidades dos materiais aplicados para definir-se as taxas ideais. Posteriormente, comparou-se essas taxas com as taxas sugeridas pelas normas do DER/CE. Nas demais aplicações feitas no LMP/UFC, procurou-se aplicar os materiais usando-se taxas equivalentes às especificadas nas normas do DER/CE para tratamento superficial duplo, conforme apresentado no Capítulo 2, Tabela 2.8.

5.3.1 - Resultados gerais dos ensaios de WTAT

Os resultados dos ensaios de WTAT, realizados sobre os revestimentos em tratamento TSD aplicados sobre as mantas asfálticas, são mostrados nas Tabelas 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15. Para elaboração dessas tabelas, usaram-se as seguintes designações: M (Manta), AN (ensaios realizados na empresa Asfaltos Nordeste), UFC (ensaios realizados na Universidade Federal do Ceará) e o índice numérico significa o número da manta confeccionada.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados dos ensaios de WTAT no TSD com emulsão RRP-2C e escória. Para elaborar-se a Tabela 5.13 foram moldadas 10 mantas asfálticas com escória de aciaria e emulsão asfáltica RR-2C melhorada por polímero (RRP-2C). Foram calculados a média, o coeficiente de variação (C.V.), o desvio padrão e informados os valores máximo e mínimo dos resultados apresentados.

Tabela 5.12 - Resultados dos ensaios de WTAT com emulsão RRP-2C e escória.

ENSAIOS DE WTAT					
ESCÓRIA DE ACIARIA C/ EMULSÃO RRP-2C					
MANTA	TAXAS				DESGASTE (%)
	LIGANTE (L/m ²)		AGREGADO (kg/m ²)		
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	
M1AN	0,46	1,41	17,08	6,94	15,02
M2AN	0,68	0,86	14,81	6,03	11,53
M3AN	0,65	1,90	13,90	4,25	1,79
M4AN	0,84	1,75	13,13	2,37	5,12
M5AN	0,62	2,01	13,52	2,43	7,95
M1UFC	0,93	1,23	13,01	3,95	3,99
M2UFC	0,90	1,38	12,87	4,32	6,39
M3UFC	0,91	1,42	12,98	4,01	2,45
M4UFC	0,90	1,69	9,24	4,68	8,99
M5UFC	0,89	1,26	12,40	4,38	1,92
Média	0,78	1,49	13,29	4,34	6,52
μ max.	0,93	2,01	17,08	6,94	15,02
μ min.	0,46	0,86	9,24	2,37	1,79
C. V.	0,02	0,11	3,47	1,75	17,40
D. Padrão	0,16	0,35	1,96	1,40	4,40

As razões para os resultados tão dispersos apresentados na Tabela 5.12 foram devido: a) os ensaios ainda não terem um critério pré-estabelecido para sua execução; b) as primeiras aplicações terem sido feitas sem uma pré-definição de suas taxas; c) taxas baixas de ligante e altas de agregado; e d) superposição do agregado da segunda camada com o agregado da primeira que quando submetido ao esforço da mangueira de borracha, usada no ensaio de WTAT, proporcionou uma maior desagregação.

A mangueira de borracha usada no ensaio WTAT mantém sobre os materiais movimentos circulares, proporcionando torções nos agregados maiores e pontiagudos, consequentemente causando uma maior desagregação dos agregados graúdos. Por apresentar uma boa cubicidade, a taxa da segunda camada da escória de aciaria deve ser menor, para que haja um melhor intertravamento e não ocorram superposições.

Para elaboração da Tabela 5.13, que apresenta os resultados dos ensaios de WTAT no TSD com emulsão RRP-2C e brita, foram também moldadas 10 mantas asfálticas com brita e emulsão asfáltica RR-2C melhorada por polímero (RRP-2C). Foram calculados a média, o coeficiente de variação (C.V), o desvio padrão e informados os valores máximo e mínimo dos resultados apresentados.

Tabela 5.13 - Resultados dos ensaios de WTAT com emulsão RRP-2C e brita.

ENSAIOS DE WTAT					
BRITA C/ EMULSÃO RRP-2C					
MANTA	TAXAS				DESGASTE (%)
	LIGANTE (L/m ²)		AGREGADO (kg/m ²)		
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	
M1AN	0,80	1,05	11,47	7,95	10,38
M2AN	1,14	1,17	11,02	3,49	0,64
M3AN	1,04	1,15	11,04	3,49	2,06
M4AN	1,09	1,22	11,62	1,94	0,36
M5UFC	0,95	1,13	11,38	3,80	7,40
M6UFC	0,90	0,94	8,19	3,99	5,99
M7UFC	0,87	0,64	9,24	3,16	11,47
M8UFC	0,92	1,08	8,70	3,24	14,42
M9UFC	0,90	1,01	8,91	3,76	8,23
M10UFC	0,90	1,14	9,60	3,85	4,56
Média	0,95	1,05	10,12	3,87	6,55
μ max.	1,14	1,22	11,62	7,95	14,42
μ min.	0,80	0,64	8,19	1,94	0,36
C. V.	0,01	0,03	1,56	2,16	20,20
D. Padrão	0,11	0,17	1,32	1,55	4,74

As dispersões ocorridas para elaboração da Tabela 5.13 deram-se pelos mesmos motivos apresentados nos parágrafos anteriores, bem como pelo fato da baixa taxa de agregado da segunda camada ter proporcionado uma maior desagregação do agregado na primeira camada. Observou-se que a mangueira de borracha, usada no ensaio de WTAT, manteve uma maior tração sobre o agregado da primeira camada, devido a falta de intertravamento do agregado da segunda camada com os vazios causados pelo agregado da primeira camada.

Quando as taxas de ligante são baixas, mesmo sendo baixas as taxas do agregado da segunda camada, o ensaio apresentou um desgaste maior. Isso deu-se devido haver uma maior desagregação do agregado da primeira camada.

A Tabela 5.14 mostra os resultados do ensaio de WTAT no TSD com emulsão RR-2C e escória de aciaria. Foram moldadas 9 mantas asfálticas com escória de aciaria

e emulsão asfáltica RR-2C sem polímero. Foram calculados a média, o coeficiente de variação (C.V), o desvio padrão e informados os valores máximo e mínimo dos resultados apresentados.

Tabela 5.14 - Resultado dos ensaios de WTAT com emulsão RR 2C e escória.

ENSAIOS DE WTAT					
ESCÓRIA DE ACIARIA C/ EMULSÃO RR-2C					
MANTA	TAXAS				DESGASTE (%)
	LIGANTE (L/m ²)		AGREGADO (kg/m ²)		
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	
M1AN	0,60	1,92	14,91	8,43	9,91
M2AN	0,63	1,40	14,64	7,76	11,39
M1UFC	0,87	1,22	11,41	7,08	6,80
M2UFC	0,90	1,27	12,40	6,05	4,06
M3UFC	0,90	1,14	11,74	8,39	5,38
M4UFC	0,89	1,32	11,92	6,03	5,25
M5UFC	0,91	1,44	12,79	6,13	5,26
M6UFC	0,92	1,60	11,84	5,80	2,85
M7UFC	0,90	1,51	12,84	5,99	4,39
Média	0,84	1,42	12,72	6,85	6,14
μ max.	0,92	1,92	14,91	8,43	11,39
μ min.	0,60	1,14	11,41	5,80	2,85
C. V.	0,014	0,049	1,41	1,047	6,95
D. Padrão	0,13	0,24	1,26	1,09	2,80

A Tabela 5.15 mostra os resultados dos ensaios de WTAT no TSD com emulsão RR-2C e brita convencional. Foram moldadas 9 mantas asfálticas com brita e emulsão asfáltica RR-2C sem polímero. Foram calculados a média, o coeficiente de variação (C.V), o desvio padrão e informados os valores máximo e mínimo dos resultados apresentados.

Tabela 5.15 - Resultado dos ensaios de WTAT com emulsão RR 2C brita.

ENSAIOS DE WTAT					
BRITA C/ EMULSÃO RR-2C					
MANTA	TAXAS				DESGASTE (%)
	LIGANTE (L/m ²)		AGREGADO (kg/m ²)		
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	
M1AN	0,63	1,16	11,22	7,50	8,80
M2AN	0,68	1,49	12,12	7,95	6,89
M8UFC	0,89	1,06	10,82	6,81	21,75
M9UFC	0,92	1,12	9,88	5,66	9,27
M10UFC	0,90	1,12	9,65	5,63	3,94
M11UFC	0,87	1,11	10,38	5,61	9,47
M12UFC	0,90	0,94	9,85	4,97	10,15
M13UFC	0,89	1,00	9,80	4,81	6,33
M14UFC	0,88	0,98	10,28	5,30	2,29
Média	0,84	1,11	10,44	6,03	8,77
μ max.	0,92	1,49	12,12	7,95	21,75
μ min.	0,63	0,94	9,65	4,81	2,29
C. V.	0,01	0,02	0,59	1,12	27,33
D. Padrão	0,11	0,16	0,81	1,12	5,54

A média dos resultados das taxas de ligante e agregado das Tabelas 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 foi resumida na Tabela 5.16. Para elaboração da Tabela 5.16 usou-se as seguintes designações: E+RRP-2C (Escória de aciaria com emulsão asfáltica RRP-2C melhorada por polímero SBS), E+RR-2C (Escória de aciaria com emulsão asfáltica RR-2C sem polímero), B+RRP-2C (brita com emulsão asfáltica RRP-2C melhorada por polímero SBS) e B+RR-2C (brita com emulsão asfáltica RR-2C sem polímero).

Tabela 5.16 - Média dos resultados dos ensaios realizados nas mantas asfálticas

MANTA	TAXAS						DESGASTE (%)
	LIGANTE(L/m ²)			AGREGADO (kg/m ²)			
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª + 2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	1ª + 2ª Camada	
E+RRP-2C	0,78	1,49	2,27	13,29	4,34	17,63	6,52
E+RR-2C	0,84	1,42	2,26	12,72	6,85	19,57	6,14
B+RRP-2C	0,95	1,05	2,00	10,12	3,87	13,99	6,55
B+RR-2C	0,84	1,11	1,95	10,44	6,03	16,47	8,77

Observou-se que os resultados, dos ensaios de WTAT realizados nas mantas asfálticas, ficariam melhor avaliados se fosse feita uma análise separada por propriedade medida. Assim, nos itens 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4 procurou-se analisar a influência das taxas de ligantes e agregados, bem como os desgastes sofridos pelos revestimentos moldados em laboratório. Para elaboração das figuras correspondente a cada avaliação usou-se as mesmas designações usadas para elaboração da Tabela 5.16.

5.3.2 - Avaliação das taxas de ligante

A Figura 5.7 mostra a média das taxas dos ligantes aplicados nos revestimentos em TSD moldados nas mantas asfálticas.

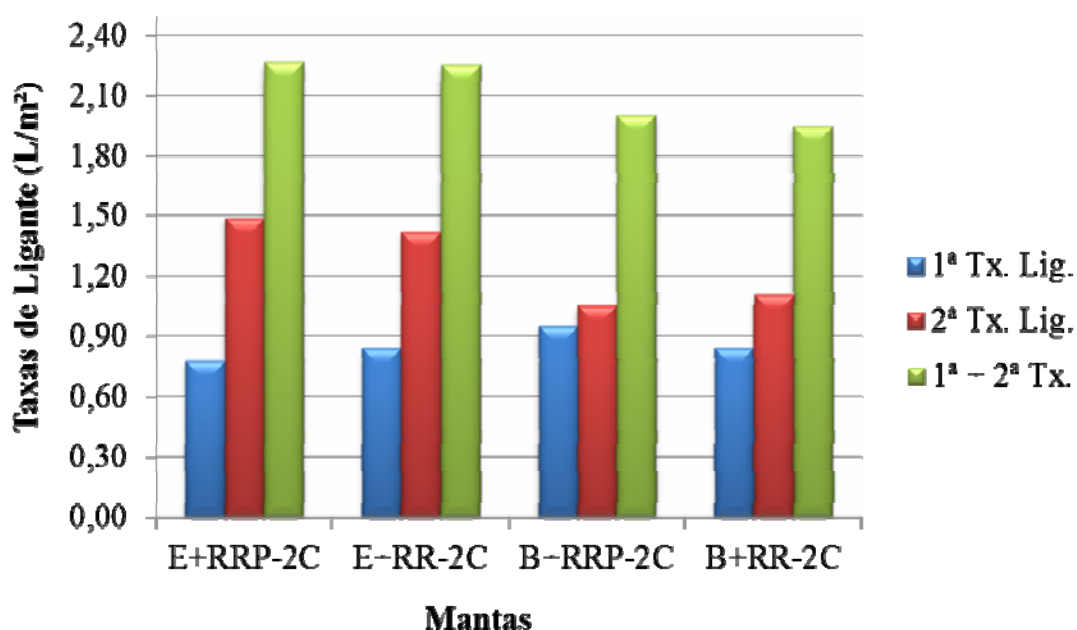


Figura 5.7 - Taxas dos ligantes aplicadas.

Pode-se observar que as taxas de emulsão da segunda aplicação feita nas escórias são superiores às taxas aplicadas nas britas. Acredita-se que isso se dá devido a escória de aciaria apresentar maior porosidade, conseqüentemente um maior poder de absorção do ligante. Sendo que a taxa da segunda aplicação é bem maior e a taxa da primeira aplicação é bem próxima daquelas aplicadas nas britas.

A segunda taxa de aplicação dos ligantes asfálticos nos tratamentos superficiais apresentam sempre valores maiores, devido a mesma ter uma penetração direta e invertida no agregado. Isso é, a segunda aplicação envolve o agregado da primeira camada e no sentido inverso envolve o agregado da segunda camada.

Considerando-se as particularidades dos agregados usados nesta pesquisa, a exemplo da forma e da absorção, as emulsões asfálticas usadas nas britas apresentaram taxas semelhantes às aplicadas nos trechos. Percebeu-se que, no geral, as taxas de RR-2C e RRP-2C apresentaram valores bem próximos.

5.3.3 - Avaliação das taxas de agregado

A Figura 5.8 mostra a média das taxas dos agregados usados nos revestimentos em TSD moldados nas mantas asfálticas.

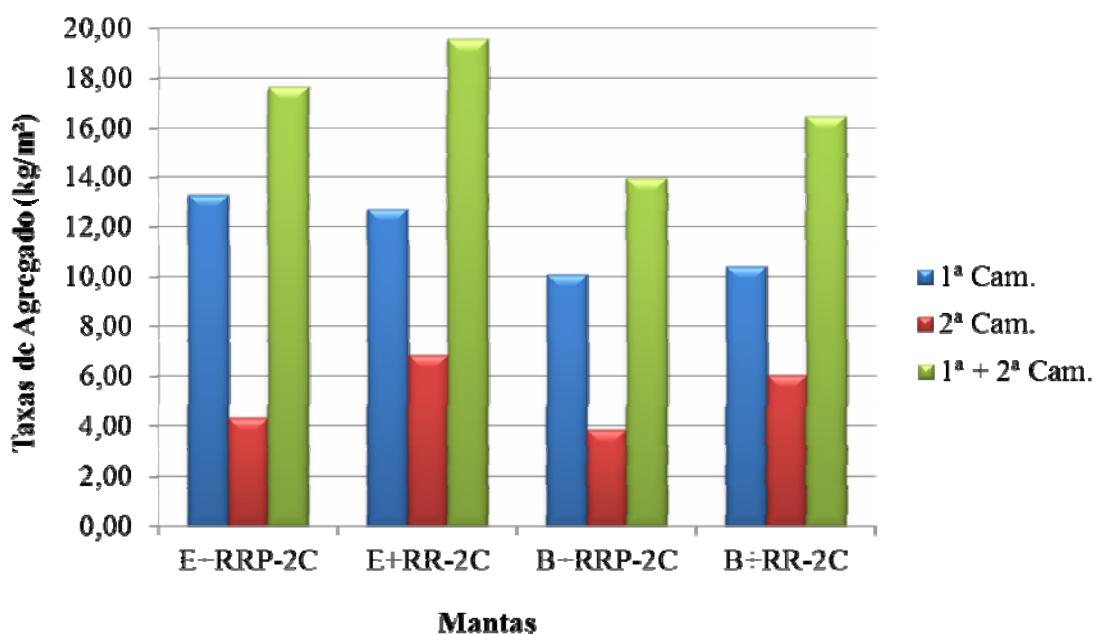


Figura 5.8 - Taxas dos agregados aplicadas.

As taxas dos agregados apresentaram maiores valores para os revestimentos moldados com escória de aciaria. Isso se dá devido ao fato das escórias de aciaria apresentarem densidade maior do que as britas. Portanto, necessita-se, em massa, de uma maior quantidade de escória para executar-se um tratamento superficial.

Observa-se, também, que o uso de emulsão com polímero reduz a taxa total de agregado em comparação com os TSDs moldados com emulsão convencional.

5.3.4 - Avaliação dos desgastes

Na Figura 5.9 apresentam-se os desgastes sofridos pelos revestimentos em TSD quando submetidos ao ensaio de WTAT. Observa-se que, de um modo geral, os desgastes fornecem valores da mesma ordem de grandeza obtendo-se valores inferiores a 10% de desgaste no ensaio WTAT.

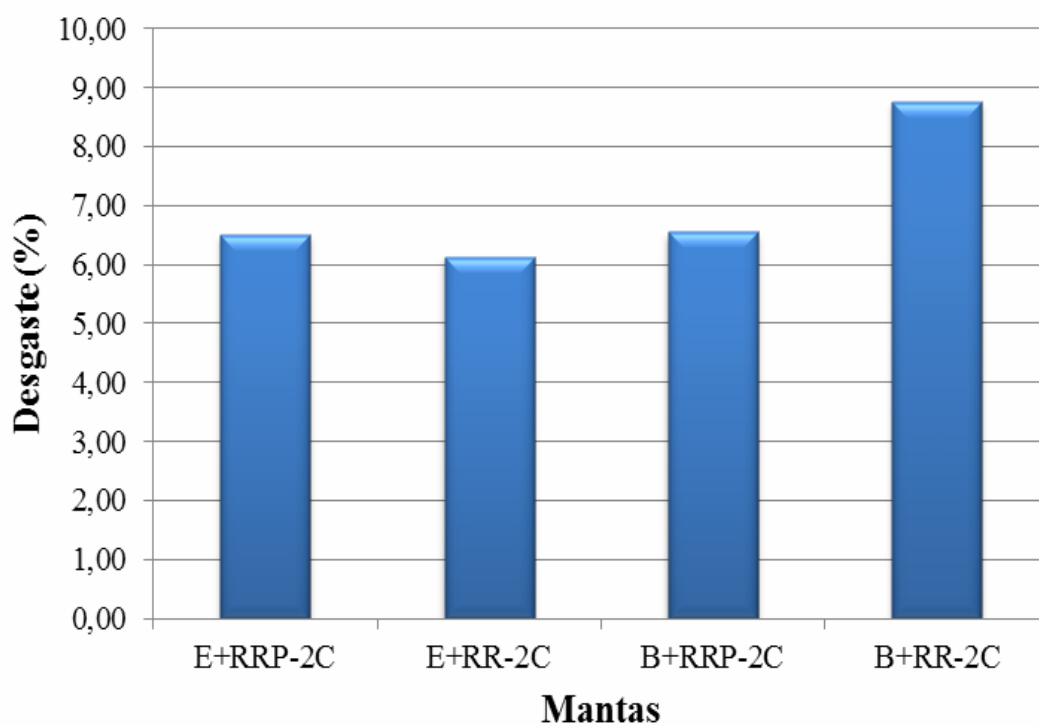


Figura 5.9 - Desgastes sofridos pelos revestimentos submetidos ao ensaio WTAT.

De acordo com a Figura 5.9, obtiveram-se menores desgaste com os revestimentos em tratamento superficial moldados com escória de aciaria do que os moldados com brita. Por apresentarem uma forma mais cúbica do que as britas, as escórias de aciaria proporcionam um maior intertravamento da segunda camada com os vazios da primeira camada. Portanto, acredita-se que as escórias de aciaria deverão apresentar uma menor rejeição quando aplicadas nos revestimento em tratamento superficial.

Mediante os resultados apresentados acima, conclui-se que as escórias de aciaria podem ser empregadas nos TS. Esta pesquisa procurou desenvolver um método que atestasse tal fato.

5.3.5 - Custo dos materiais utilizados nesta pesquisa

Neste item serão calculados os custos dos materiais testados de acordo com as taxas médias apresentadas nas Tabelas 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15. Os cálculos foram efetuados para uma plataforma de 7,0 m de largura, para uma extensão de 1,0 km de rodovia e uma espessura do TS correspondente ao diâmetro da brita de 3/4" (19 mm). As massas específicas da brita, escória, RRP-2C e RR-2C são respectivamente 1500 kg/m³, 1700 kg/m³, 1000 kg/m³ e 1000 kg/m³.

Na Tabela 5.17 apresenta-se a composição dos custos dos materiais usados nesta pesquisa. Estes custos foram compostos baseados nos preços dados pelos fabricantes desses materiais, estabelecidos na Região Metropolitana de Fortaleza. Para a brita, obteve-se um preço de R\$ 44,00/m³, para a escória R\$ 8,90/t, para a emulsão com polímero R\$ 1.240,00/t e para a emulsão sem polímero R\$ 931,00/t. Nesta composição não estão incluídas as Bonificações e Despesas Indiretas (BDI), o transporte e nem a execução, considerou-se apenas a aquisição dos materiais.

Tabela 5.17 - Composição de custos.

CUSTO POR km DE REVESTIMENTO							
Revestimento	Ligante (L/m ²)			Agregado (kg/m ²)			Total (R\$/km)
	Taxa *	Custo (R\$/t)	Total (R\$)	Taxa *	Custo (R\$/t)	Total	
E+RRP-2C	2,27	1.240,00	19.703,60	17,63	8,90	1.098,35	20.801,95
E+RR-2C	2,26	931,00	14.728,42	19,57	8,90	1.219,21	15.947,63
B+RRP-2C	2,00	1.240,00	17.360,00	13,99	66,00	6.463,38	23.823,38
B+RR-2C	1,95	931,00	12.708,15	16,47	66,00	7.609,14	20.317,29

* Somatório da 1^a e 2^a aplicações.

Em relação aos revestimentos executados com emulsão asfáltica melhorada por polímero (RRP-2C), obteve-se um custo (R\$/km) do revestimento com brita maior 14,52% do que o custo do revestimento com escória. Considerando-se os revestimentos executados

com emulsão asfáltica sem polímero RR-2C, o custo do revestimento executado com brita foi 27,40% maior do que o custo do revestimento com escória. Conclui-se que os revestimentos com escória são mais econômicos do que os revestimentos com com brita.

Na Figura 5.10 mostram-se os custos obtidos para execução de TSD moldados sobre mantas asfálticas.

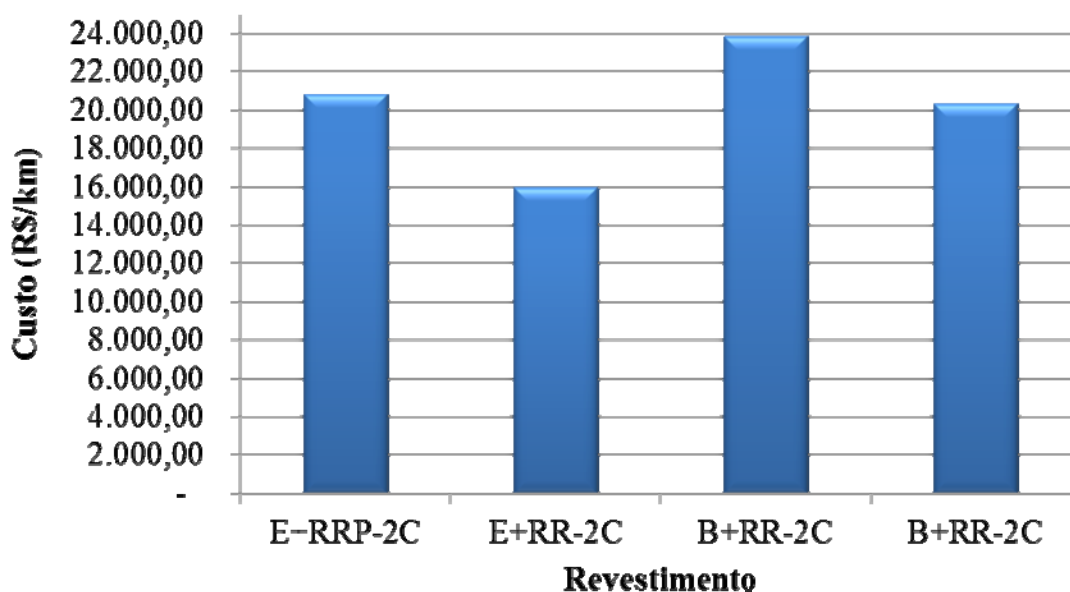


Figura 5.10 - Gráfico dos custos dos revestimentos moldados sobre as mantas.

5.4 - RESULTADOS DO TERCEIRO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – EXPERIMENTOS REALIZADOS NO TRECHO BR 020 - PARAMOTI

Colocaram-se 9 mantas asfálticas com moldes metálicos para coletar as aplicações dos materiais usados na execução do revestimento no trecho em estudo. Após 4 dias da aplicação do revestimento, as mantas foram extraídas e levadas ao LMP/UFC para serem submetidas ao ensaio de WTAT. Na Tabela 5.18 apresentam-se o resultados dos ensaios realizados nas 9 mantas.

Tabela 5.18 - Resultados dos ensaios de WTAT realizados com as amostras coletadas em campo.

ENSAIOS DE WTAT- TRECHO BR 020 - PARAMOTI					
BRITA C/ EMULSÃO RR-2C APLICADOS NO TRECHO					
MANTA	TAXAS				DESGASTE
	LIGANTE (L/m ²)		AGREGADO (kg/m ²)		(%)
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	
M1 - Est.441	1,10	1,30	12,20	10,30	13,35
M2 - Est.446	1,25	1,10	15,70	10,05	13,77
M3 - Est.451	1,10	1,80	13,00	11,45	11,79
M4 - Est.456	0,70	1,40	12,80	9,60	8,20
M6 - Est.461	1,10	1,10	12,85	8,70	14,12
M7 - Est.463	1,10	1,00	12,70	8,55	10,19
M8 - Est.465	1,10	1,20	12,95	8,95	7,68
M9 - Est.467	1,00	1,20	13,20	8,75	6,06
M10 - Est.484	1,10	1,20	15,00	8,25	7,64
Média	1,06	1,26	13,38	9,40	10,31
μ max.	1,25	1,80	15,70	11,45	14,12
μ min.	0,70	1,00	12,20	8,25	6,06
C.V.	0,02	0,05	1,20	0,96	8,28
D. PADRÃO	0,14	0,22	1,10	0,98	2,88

Aplicaram-se, também, em 9 mantas asfálticas fabricadas no LMP/UFC revestimentos em TSD com a mesma emulsão e o mesmo agregado usado na execução do trecho BR 020 – Paramoti. Essas mantas também foram submetidas ao ensaio de WTAT. O revestimento aplicado no trecho é um TSD com agregado mineral e emulsão asfáltica RR-2C. Na Tabela 5.19 apresentam-se os resultados das 9 mantas moldadas no laboratório.

Objetivou-se extrair essas amostras do trecho, assim como aplicar os mesmos materiais com as mesmas taxas sobre mantas asfálticas no LMP/UFC para poder analisar e comparar os resultados de campo e desenvolvidos no laboratório. Procuraram-se, ainda, comparar os desgastes sofridos pelo revestimento quando submetido ao ensaio de WTAT com as rejeições de campo.

Tabela 5.19 - Resultados dos ensaios dos revestimentos moldados em laboratório, com o uso dos mesmos materiais e taxas usados em campo.

ENSAIOS DE WTAT					
BRITA USADA NO TRECHO APLICADA EM LABORATÓRIO C/ RR 2C					
MANTA	TAXAS				DESGASTE
	LIGANTE (L/m ²)		AGREGADO (kg/m ²)		(%)
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	
M1	1,01	1,24	13,29	9,18	29,68
M2	1,02	1,22	13,26	9,18	22,85
M3	1,10	1,26	13,38	9,23	21,02
M4	1,18	1,27	13,25	9,19	21,45
M5	1,03	1,23	13,37	9,19	19,98
M6	1,00	1,29	13,16	9,02	21,36
M7	1,01	1,23	13,01	9,05	22,58
M8	1,01	1,29	13,10	9,14	20,59
M9	1,01	1,33	13,22	9,05	16,77
Média	1,04	1,26	13,23	9,14	21,81
μ max.	1,18	1,33	13,38	9,23	29,68
μ min.	1,00	1,22	13,01	9,02	16,77
C.V.	0,003	0,001	0,013	0,005	10,534
D.PADRÃO	0,057	0,034	0,114	0,072	3,246

Na Tabela 5.19, as taxas aplicadas em cada manta apresentaram valores com pequenas dispersões se comparados aos valores apresentados nas Tabelas 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15. Justifica-se que procurou-se aplicar essas taxas, rigorosamente, iguais à média das taxas aplicadas no trecho BR 020 – Paramoti, além do autor já estar melhor treinado para fabricação das mantas asfálticas.

Observando-se a média dos desgastes obtida nos revestimentos aplicados em campo e laboratório, apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19, pode-se observar um desgaste 2,11 vezes maior para os revestimentos aplicados em laboratório. Justifica-se essa dispersão em função dos métodos de aplicação e compactação dos materiais usados nos dois revestimentos serem diferentes. Em campo, utilizou-se equipamentos de grande porte para aplicação do ligante e compactação dos agregados. Já em laboratório, aplicaram-se métodos manuais para essas operações.

As taxas dos agregados aplicadas no trecho foram obtidas no laboratório de campo pelo método do mosaico, antes de iniciar a aplicação do revestimento. As taxas do agregado ficaram definidas entre 12 e 13 kg/m², para a primeira camada, e de 6 e 7

kg/m² para a segunda camada. O agregado usado enquadrou-se nas faixas A, para aplicação da 1ª camada, e B para aplicação da 2ª camada, da norma rodoviária do DNIT (DNER-ES 309/97).

Pode-se observar pelos resultados apresentados nas Tabelas 5.18 e Tabela 5.19 que as taxas da segunda camada apresentaram valores superiores às taxas definidas pelas especificações do DNIT.

Em função das taxas do agregado, definiram-se as taxas do ligante. A taxa do ligante foi definida como sendo de 1,0 a 1,1 L/m², para a primeira aplicação, e de 1,1 a 1,2 L/m², para a segunda aplicação. Observando-se as Tabelas 5.18 e 5.19, constatam-se que as taxas do ligante aplicadas em campo e no LMP/UFC praticamente não sofreram variações quando comparadas com as taxas definidas no laboratório da obra.

Nos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas em laboratório com o uso dos mesmos materiais aplicados no trecho, manteve-se o cuidado para aplicar as mesmas taxas usadas na execução do revestimento do trecho BR 020 – Paramoti. Nos revestimentos aplicados em laboratório, devido às taxas das primeiras e segundas aplicações terem sido praticamente as mesmas, os valores obtidos mantiveram-se com pequenas variações.

A média dos resultados das Tabelas 5.18 e 5.19 está apresentada na Tabela 5.20. Para elaboração da tabela usaram-se as seguintes designações: MMT (Mantas Moldadas no Trecho) e MML (Mantas Moldadas no Laboratório). Os valores das taxas de ligante e agregado, correspondem à média dos resultados obtidos para cada um dos ensaios.

Tabela 5.20 - Média dos resultados dos ensaios de campo e laboratório.

TAXAS							
MANTA	LIGANTE (L/m ²)			AGREGADO (kg/m ²)			DESGASTE
	1ª Aplicação	2ª Aplicação	1ª + 2ª Aplicação	1ª Camada	2ª Camada	1ª + 2ª Camada	
MMT	1,06	1,26	2,32	13,38	9,40	22,78	10,31
MML	1,04	1,26	2,30	13,23	9,14	22,37	21,81

Nos itens 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 serão avaliadas, separadamente, as taxas de ligantes e agregados, bem como os desgastes sofridos pelos revestimentos moldados em mantas asfálticas a partir dos materiais do trecho BR 020 – Paramoti.

5.4.1 - Avaliação das taxas de ligante

A Figura 5.11 mostra a média das taxas dos ligantes aplicadas nos revestimentos em tratamento superficial duplo moldados nas mantas asfálticas, no trecho BR 020 – Paramoti e no LMP/UFC.

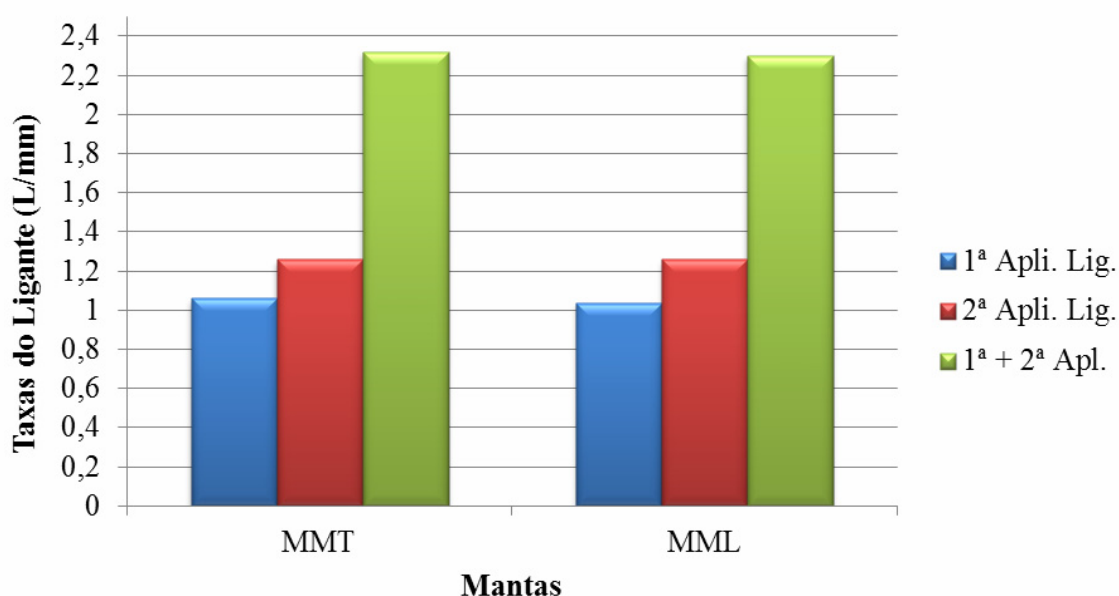


Figura 5.11 - Taxas do ligante aplicadas.

Observa-se, na Figura 5.11, que as taxas de emulsão asfáltica RR-2C, aplicada na execução do revestimento em TSD, apresentam valores próximos aos estabelecidos, de 1,0 a 1,1 L/m² para a primeira aplicação e de 1,1 a 1,2 L/m² para a segunda aplicação. Sendo que, as taxas MML apresentam valores levemente inferiores as taxas MMT.

5.4.2 - Avaliação das taxas de agregado

A Figura 5.12 mostra a média das taxas dos agregados usados nos revestimentos em TSD, moldados nas mantas asfálticas extraídas do trecho BR 020 – Paramoti e no LMP/UFC. Observa-se que as taxas MML apresentam valores um pouco inferiores do que as taxas MMT para o caso da 1ª e 2ª camadas.

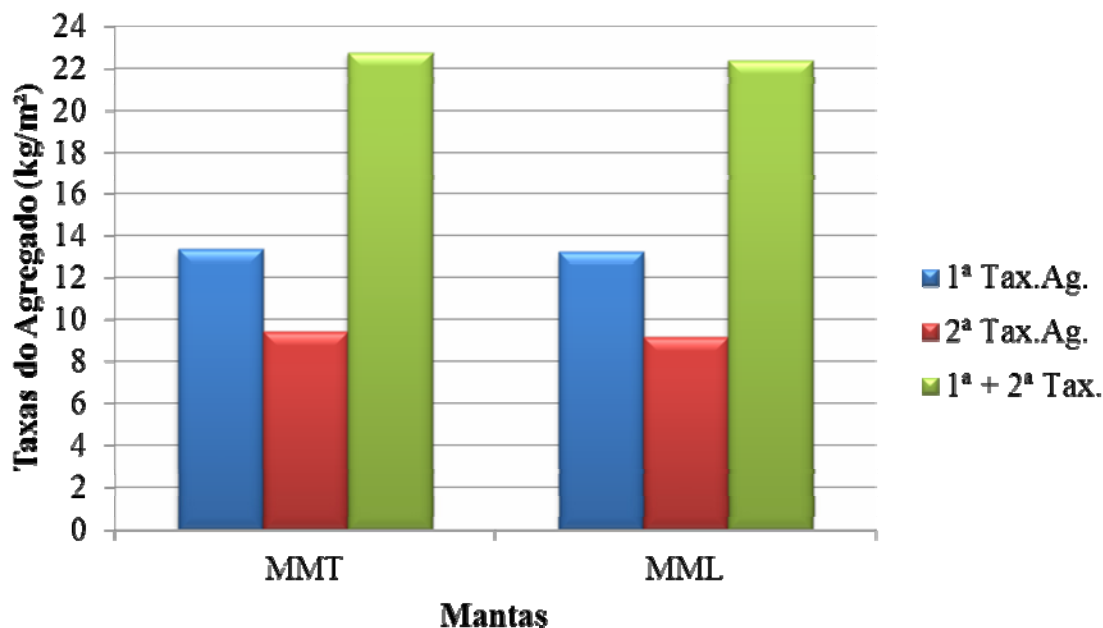


Figura 5.12 - Taxas do agregado aplicado.

As taxas definidas para a segunda camada dos revestimentos aplicados no trecho foi de 6 kg/m² a 7 kg/m², entretanto as obtidas nos ensaios apresentaram valores superiores. Já as taxas aplicadas na primeira camada apresentam valores próximos aos valores definidos para a aplicação em campo, que foi de 13,87 kg/m² (ver Tabela 4.2).

Tendo em vista os resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa, nos quais definiram-se as taxas dos materiais usados, pode-se perceber que o procedimento criado e desenvolvido pelo autor deste trabalho, simula bem os procedimentos usados em campo.

5.4.3 - Avaliação dos desgastes

Na Figura 5.13 apresentam-se os desgastes sofridos pelos revestimentos em

tratamento superficial duplo, extraído do trecho BR 020 – Paramoti e moldados no LMP/UFC, quando submetidos ao ensaio de WTAT.

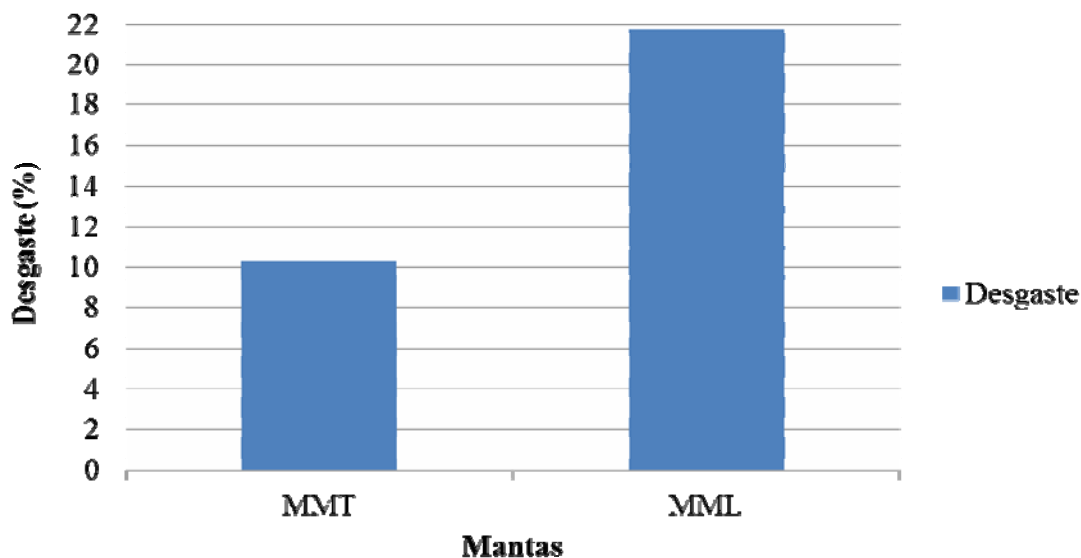


Figura 5.13 - Desgastes sofridos pelos revestimentos submetidos ao ensaio WTAT.

Os desgastes sofridos nas MML foram maiores devido ao processo de aplicação dos materiais, pois as taxas são equivalentes. Em campo, utilizou-se um processo mecanizado onde as amostras aplicadas sobre as mantas asfálticas foram submetidas a uma aplicação do ligante com uma alta pressão e compressões com um rolo pneumático de 8.000 kg, ao passo que em laboratório o processo de compactação usado foi manual.

Os materiais aplicados em laboratório, conseqüentemente, ficam mais passivos de sofrerem maiores desagregações. Para o caso desse estudo pode-se estabelecer um fator campo-laboratório de aproximadamente 2 unidades, pois as MML apresentaram um desgaste, cerca de 2 vezes maior do que o obtido para as MMT.

5.4.4 - Rejeições obtidas em campo comparadas aos desgastes obtidos em laboratório nas mantas moldadas em campo

Para medir a rejeição coletaram-se os agregados rejeitados em áreas correspondente a 1 m², vizinhas aos pontos de onde foram extraídas as mantas asfálticas com o revestimento aplicado no trecho, antes de aplicar-se o banho diluído. Esta

rejeição foi comparada, principalmente, com os desgastes das amostras coletadas em campo, quando submetidas ao ensaio de WTAT.

Na Tabela 5.21 mostram-se os resultados das rejeições obtidas em campo e dos desgastes sofridos pelos revestimentos extraídos na obra quando submetidos ao ensaio WTAT, em 9 mantas coletadas do trecho BR 020 – Paramoti.

Tabela 5.21 - Rejeições obtidas em campo e desgastes em laboratório.

REJEIÇÕES OBTIDAS EM CAMPO E DESGASTES EM LABORATORIOS											
Mantas	M1	M2	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M10	Média	
Estacas	441	446	451	456	461	463	465	467	484	-	
Taxas	1ª Ap. Lig. (L/m ²)	1,10	1,25	1,10	0,70	1,10	1,10	1,10	1,00	1,10	1,06
	1ª Ap. Ag. (kg/m ²)	12,40	15,70	13,00	12,80	12,85	12,70	12,95	13,20	15,00	13,53
	2ª Ap. Lig. (L/m ²)	1,30	1,10	1,80	1,40	1,10	1,00	1,20	1,20	1,20	1,26
	2ª Ap. Ag. (kg/m ²)	10,30	10,05	11,45	9,60	8,70	8,55	8,95	8,75	8,25	9,40
Rejeição	Trecho	1,616 (g)	4,131 (g)	3,021 (g)	2,266 (g)	2,534 (g)	2,742 (g)	2,516 (g)	0,650 (g)	2,026 (g)	2,389 (g)
	%	7,12	16,04	12,36	10,11	11,76	12,90	11,49	2,96	8,71	10,38
Desgaste (%) WTAT	13,35	13,77	11,79	8,20	14,12	10,19	7,68	6,06	7,64	10,31	

Observa-se na Tabela 5.21, que a média das rejeições obtidas em campo e os desgastes sofridos após o ensaio de WTAT apresentaram valores muito próximos. Esses resultados podem ser melhor visualizados através da Figura 5.14.

LARSEN (1985) considera para fins de cálculo das taxas de agregado para tratamento superficial, uma sobre-taxa de 10% na dosagem da última camada, para rejeição dos agregados. GUARNIERI E FERREIRA (1985) indicam uma sobre-taxa de até 20% para rejeição dos agregados da última camada.

Neste trabalho desenvolveu-se um método próprio para avaliar a rejeição dos agregados. Em campo mediu-se a rejeição através do método descrito acima. Em laboratório obteve-se a rejeição através do ensaio WTAT.

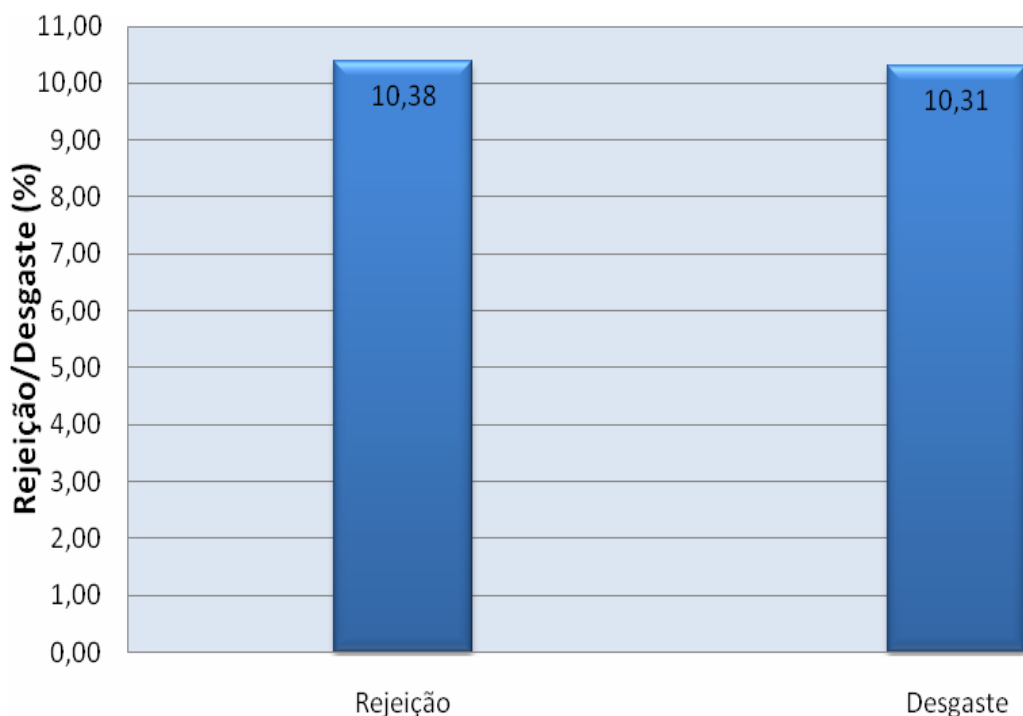


Figura 5.14 - Média das rejeições em campo e desgastes em laboratório.

5.5 - RESULTADOS DO QUARTO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - ENSAIOS EXECUTADOS NAS PLACAS SUBMETIDAS AO SIMULADOR DE TRÁFEGO

Foram moldadas placas de solo-brita, com uma composição de 80% de solo e 20% de brita, para desempenharem a função de base. Sobre a camada de base foi aplicada uma imprimação e revestimentos em TSD com uso de agregado siderúrgico, brita, emulsões asfálticas melhoradas por polímero (RRP-2C) e sem polímero (RR-2C). O solo-brita foi submetido aos ensaios mecânicos e o revestimento ao simulador de tráfego do LMP/UFC.

5.5.1 - Ensaios mecânicos executados no solo-brita

Para melhor avaliar a viabilidade do uso do solo empregado na moldagem das placas foram realizados os ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR), Módulo de Resiliência e densidade “*in situ*”.

5.5.1.1 - Ensaio de Compactação

A energia utilizada no solo-brita para moldagem das placas usadas como base foi a do Proctor Modificado (55 golpes). A massa específica aparente seca máxima obtida foi de 2,180 g/cm³ e a umidade ótima foi de 6,8%. A Figura 5.15 mostra os resultados do ensaio de compactação.

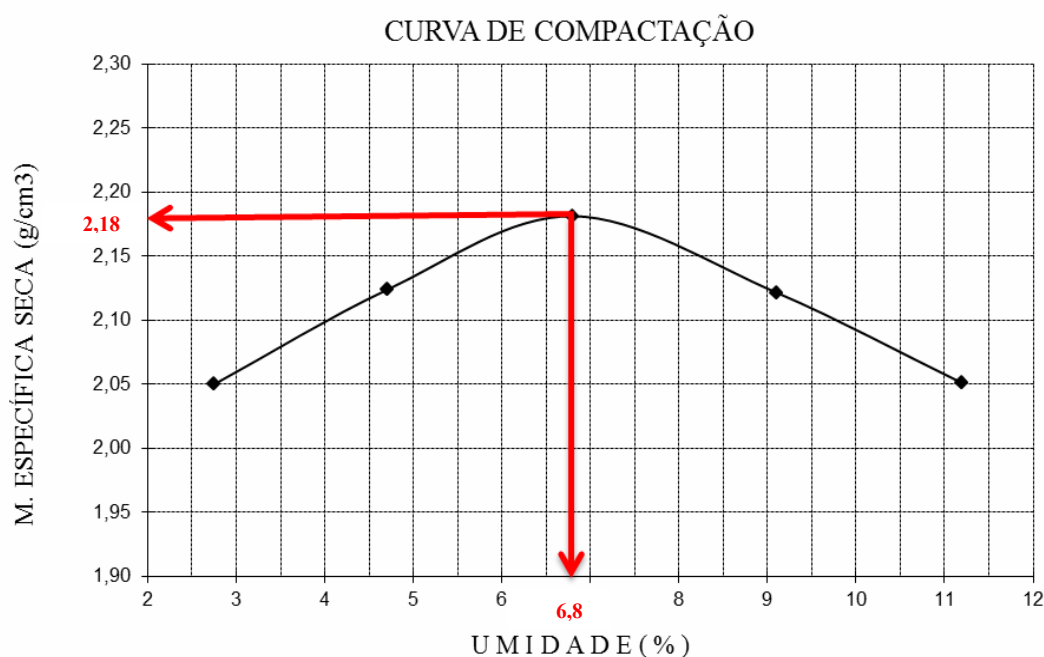


Figura 5.15 - Resultados do ensaio de compactação.

5.5.1.2 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)

A energia empregada para moldagem do CBR no solo-brita, usado para moldagem das placas, foi a do Proctor Modificado. O resultado obtido após o rompimento dos corpos de prova foi de 68 %. A Figura 5.16 mostra os corpos de prova submersos para a realização do ensaio de CBR e na Figura 5.17 o resultado do ensaio de CBR.



Figura 5.16 - Corpos de prova submersos para realização do ensaio de CBR.

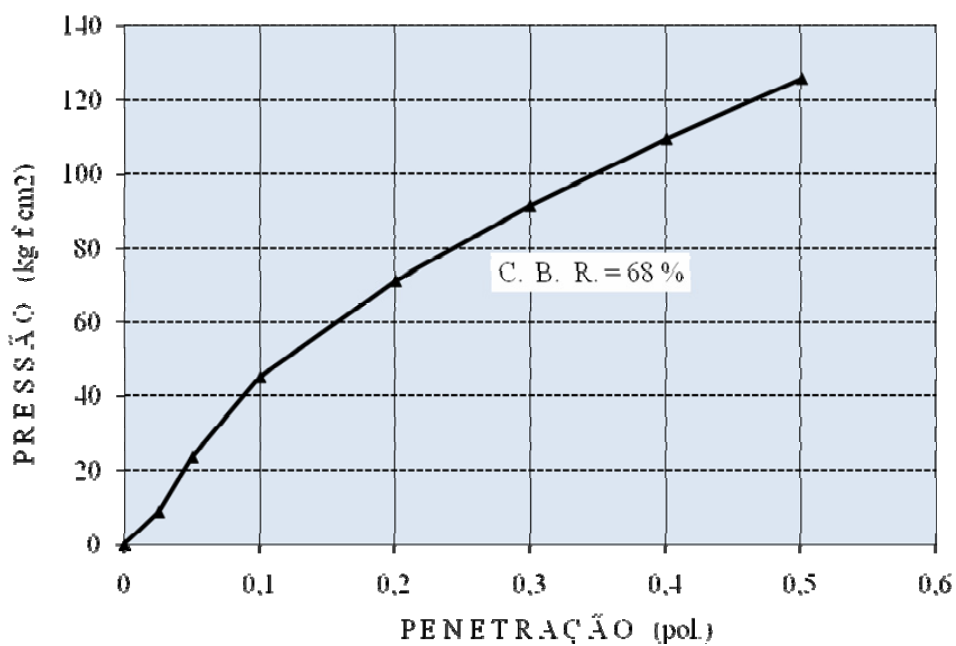


Figura 5.17 - Resultado do ensaio de CBR.

5.5.1.3 - Ensaio do Módulo de Resiliência (MR)

Os ensaios triaxiais dinâmicos, também conhecidos como ensaios de Módulo de Resiliência (MR), foram realizados nesta pesquisa com a finalidade de investigar o comportamento da deformabilidade do solo-brita usado na moldagem das placas.

Para a realização deste ensaio, moldaram-se corpos de prova em cilindros tripartidos, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. A energia de compactação usada foi a modificada e a umidade ótima de 6,8 %.

A Figura 5.20 mostra o equipamento usado para execução do ensaio de MR. Na Figura 5.19 os resultados obtidos e na Figura 5.20 encontram-se os gráficos gerados, assim como suas equações e também os valores de R^2 .

Para análise do MR foram testados dois modelos: (a) o que relaciona o MR com a tensão desvio (σ_D) e (b) o que relaciona o MR com a tensão confinante (σ_3). Pode-se observar que o comportamento do solo-brita pode ser melhor explicado pelo modelo (b) que é mais típico para solos granulares.

Sabe-se que outros modelos (universal, composto, etc) poderiam apresentar melhores correlações, mas o trabalho ficou restrito somente aos dois modelos (a) e (b).



Figura 5.18 - Prensa triaxial de carga repetida e computador do LMP/UFC.

relatorio

Tabela de Resultados

T.Confinante (MPa)	T.Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente (MPa)
	0.021	0.020669	0.000104	198
0.021	0.041	0.052656	0.000265	155
	0.062	0.092862	0.000468	132
0.034	0.034	0.024478	0.000123	278
	0.069	0.084296	0.000424	162
0.051	0.103	0.133264	0.000671	153
	0.051	0.048478	0.000244	209
0.069	0.103	0.112023	0.000564	182
	0.155	0.166008	0.000836	185
	0.069	0.060361	0.000304	226
0.103	0.137	0.128665	0.000648	212
	0.206	0.178093	0.000897	230
	0.103	0.071448	0.000360	286
0.137	0.206	0.143449	0.000723	285
	0.309	0.195407	0.000985	314
	0.137	0.083449	0.000421	326
	0.275	0.155131	0.000782	351
	0.412	0.231563	0.001168	353

Def. Cond.: 1.3370 mm Def. Total: 3.3330 mm Altura Final : 196.667 mm

OPÇÕES: TRIAXIAL, DEF. PERM., TABELA, IMPRIMIR, RETORNAR

Figura 5.19 - Resultados do ensaio de MR no solo-brita.



Figura 5.20 - Dados fornecidos pelo computador acoplado ao equipamento.

5.5.1.4 - Ensaio de densidade “In Situ”

O método de ensaio usado foi o do DNIT (DNER-ME 092/94). Este método fixa o modo pelo qual se determina, através do frasco de areia, a massa específica do solo “*in situ*”. Esse ensaio foi realizado no LMP/UFC e teve como objetivo a obtenção do grau de compactação da placa moldada com solo-brita.

Para executar-se o procedimento apresentado no Capítulo 4, sub-item 4.2.6.1, foram moldadas 12 placas. Somente nas últimas placas foi que obteve-se o grau de compactação ideal. As outras placas quando submetidas ao simulador de tráfego, para analisar-se o revestimento, apresentavam afundamento na trilha de roda, devido a compactação não ter sido satisfatória.

As normas do DNIT e DER/CE estabelecem que o grau de compactação para camadas de base deve ser 100%. O grau de compactação é a relação entre a massa específica aparente máxima do solo seco “*in situ*” e a massa específica aparente máxima do solo seco obtida em laboratório. A massa específica aparente do solo foi obtida em laboratório através do ensaio de compactação (DNER-ME 162/94).

Inicialmente, moldou-se a placa com solo-brita utilizando os procedimentos mostrados no Capítulo 4, sub-item 4.2.6.1. Em seguida, executou-se o ensaio utilizando-se o frasco de areia. Determinou-se o peso da areia correspondente ao volume do funil e do rebaixo do orifício feito na placa de solo-brita. Usou-se um frasco de areia com um funil acoplado e uma bandeja com orifício circular no centro. Na Figura 5.21 apresentam-se as operações usadas no ensaio de densidade “*in situ*”. Na Tabela 5.22 mostram-se os resultados do ensaio executado em três placas, podendo-se observar que o grau de compactação obtido foi de 100%.



Figura 5.21 - Sequência de operações usadas no ensaio de densidade “in situ”.

Tabela 5.22 - Resultados dos ensaios de densidade “in situ” em três placas.

DENSIDADE “IN SITU” – MÉTODO DO FRASCO DE AREIA					
CAMADA		N° (PLACA)	10	11	12
FURO		N°	1	2	3
PROFUNDIDADE (cm)	DE		0	0	0
	A		10	10	10
POSIÇÃO		E. X. D	X	X	X
PESO DO FRASCO COM AREIA	ANTES	A	5894	5894	5894
	DEPOIS	B	4158	4160	4150
	DIFERENÇA	A - B	1736	1734	1744
FUNIL		N°	1	1	1
PESO DA AREIA NO FUNIL (g)		C	624	624	624
PESO DA AREIA NO FURO (g)		A - B - C = P	1112	1110	1120
DENSIDADE DA AREIA (g/ cm ³)		d	1,4	1,4	1,4
VOLUME DO FURO (cm ³)		V = P/d	794	793	800
UMIDADE		h %	6,8	6,8	6,8
PESO DO SOLO ÚMIDO (g)		pH	1846	1850	1864
PESO DO SOLO SECO (g)		Ps = pH/100 + h	1728	1732	1746
DENSIDADE DO SOLO SECO (g/ cm ³)		Ds = Ps/V	2178	2184	2182
ENSAIOS DO LABORATÓRIO	REGISTRO	N°			
	DENS. MÁX (g/ cm ³)	Dm	2180	2180	2180
	UMID. ÓTIMA (%)	h %			
GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)		% = Ds/Dm	100	101	100

5.5.2 - Ensaios submetidos ao revestimento no simulador de tráfego.

Foram moldadas e revestidas 12 placas para serem submetidas ao simulador de tráfego. Devido a um problema no simulador, não foi dada continuidade ao ensaio, pois uma das rodas apresentava uma carga maior do que a outra. Mesmo assim, foram feitas algumas simulações.

Os resultados apresentados, para 1000 ciclos, mostraram um desgaste maior em uma placa do que em outra, de aproximadamente 0,21 % na placa que sofreu a menor compressão e de 1,03 % na placa que sofreu a maior compressão. Esse fato ocorreu devido o eixo entre as duas rodas estar desalinhado, causando, conseqüentemente, uma sobrecarga maior em uma das placas. Mesmo assim, pode-se observar que na placa considerada normal os resultados foram satisfatórios.

Decidiu-se manter esse item no trabalho, embora não se tenha obtido maiores resultados para análise, tendo em vista que o método desenvolvido pode ser aplicado para execução de outros trabalhos com uso do simulador de laboratório.

5.6 - RESULTADOS DO QUINTO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – AVALIAÇÃO DE MACROTEXTURA E MICROTETSTURA

O pavimento deve satisfazer, simultaneamente, às funções estruturais e funcionais. Na prática, o condutor do veículo percebe e valoriza mais as condições funcionais, pois está mais interessado na qualidade de rolamento da superfície e em questões ligadas à segurança da via. Por esse motivo, diversos trabalhos vêm sendo realizados para a avaliação de características funcionais do pavimento.

Para MATTOS *et al.*(2008), uma das principais características de um pavimento, em termos de segurança é que a superfície deve apresentar uma boa aderência com os pneus dos veículos em todas as situações. Sendo que a aderência entre o pneu e o pavimento é mais crítica nos instantes em que o pavimento encontra-se molhado, pois a lâmina d'água formada na superfície do pavimento pode ocasionar o fenômeno conhecido como hidroplanagem.

A hidroplanagem acontece quando os pneus do veículo perdem o contato com a superfície de rolamento devido à presença de água. A lâmina d'água acumulada na superfície se interpõe entre o pneu e o pavimento, agindo como um lubrificante e, por consequência, reduzindo a força de atrito. Nessa condição, é necessária uma maior distância de frenagem e o condutor têm maiores dificuldades em guiar o seu veículo. Além da espessura da lâmina d'água, outras variáveis que influenciam na ocorrência de hidroplanagem são: velocidade do veículo, textura do pavimento, sulcos da banda de rodagem do pneu, pressão de inflação dos pneus, carga aplicada, entre outras (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A aderência nas vias é um parâmetro que varia ao longo do tempo em função do tráfego e das condições climáticas. Portanto, deve-se adotar práticas de manutenção que garantam a segurança do usuário da via. A avaliação correta da textura do revestimento, identificando as seções da via que apresentam níveis baixos de serventia ou deterioração acelerada, é uma ferramenta valiosa para prevenção e redução de acidentes.

Para caracterizar a superfície de rolamento de um pavimento é necessário determinar as características da sua textura. Sendo que a textura é avaliada em duas escalas: macrotextura e microtextura.

A macrotextura depende basicamente da graduação do agregado que compõe a mistura asfáltica utilizada na camada de rolamento. A microtextura depende da aspereza dos agregados e das características da mistura betuminosa. Portanto, a característica da textura da superfície do pavimento depende da macrotextura e da microtextura. Sendo que são possíveis quatro combinações em função dos tipos de texturas: rugosa e aberta, rugosa e fechada, polida e aberta, e polida e fechada.

Nesta pesquisa os valores de macrotextura foram obtidos através do ensaio de mancha de areia, conforme preconizado pela ASTM E 965-96 (ASTM, 2001). Os valores de microtextura foram obtidos por meio de avaliações com o pêndulo britânico que é normatizado e possui todas as suas dimensões previstas na norma de método de ensaios da ASTM E-303-93 (ASTM, 1998).

O ensaio de pêndulo britânico foi realizado somente no revestimento aplicado no trecho BR 020 – Paramoti. Os ensaios de mancha de areia foram realizados nos revestimentos aplicados nas mantas asfálticas, no laboratório e no campo, assim como no revestimento aplicado no trecho BR 020 – Paramoti. Todos os ensaios de mancha de areia realizados nas mantas asfálticas foram executados em duas etapas: antes do revestimento ser submetido ao ensaio de desgaste WTAT e depois que o revestimento foi submetido ao ensaio WTAT.

5.6.1 - Ensaios de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia realizados no trecho: BR 020 – Paramoti

Com este método pode-se determinar os efeitos relativos entre vários processos de polimento em materiais ou combinações de materiais, em pavimentos secos ou molhados. A classificação da microtextura foi dada em função do VRD (Valor de Resistência a Derrapagem) que é medido através do dinamômetro contido em uma das extremidades do pêndulo.

Ressalte-se que a medida de microtextura é um importante fator nas operações a baixa velocidade. Além do potencial intrínseco de polimento dos agregados pela natureza, deve-se ressaltar que em declives os pneus de caminhões e as forças tangenciais tendem a agir como veículos de aceleração do polimento dos agregados (APS, 2006).

A Tabela 5.23 mostra os resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico e a classificação da microtextura do revestimento do trecho BR 020 – Paramoti. Já a Figura 5.22 mostra o VRD de forma gráfica para melhor analisar-se a microtextura nos intervalos sugeridos pelo DNIT.

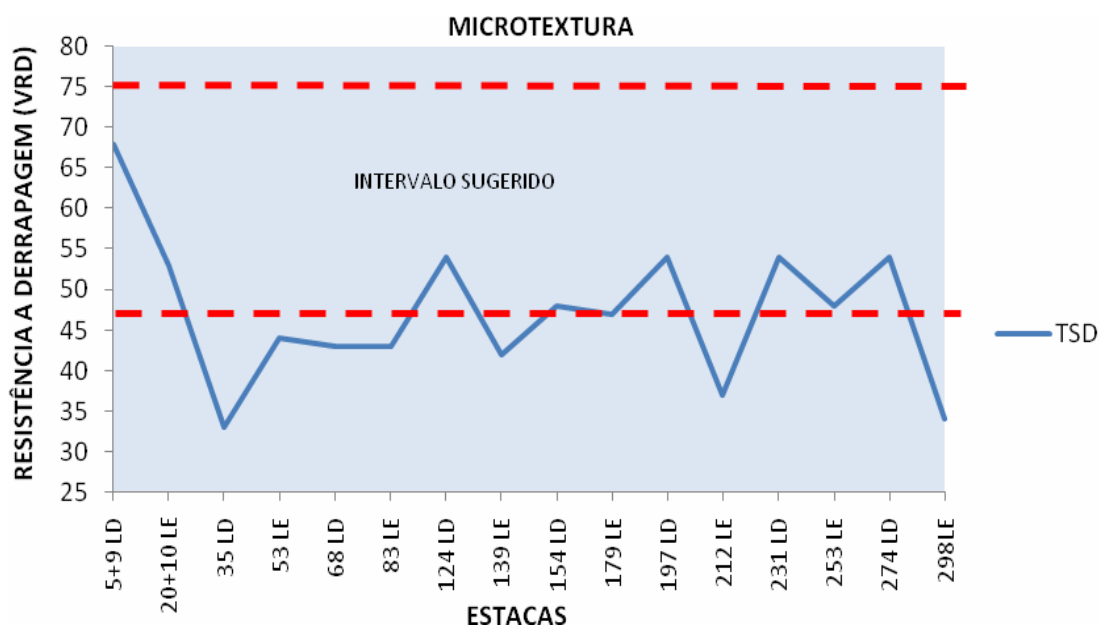


Figura 5.22 - Gráfico da textura superficial (microtextura).

Tabela 5.23 - Resultado dos ensaios do Pêndulo Britânico e a classificação da microtextura no trecho BR 020 – Paramoti.

ENSAIO DO PÊNDULO BRITÂNICO		
TRECHO: BR 020 – Paramoti		
REVEST: Tratamento Superficial Duplo (TSD)		
ESTACA	VRD	Classificação
5+9 LD	68	Rugosa
20+10 LE	53	Medianamente rugosa
35 LD	33	Lisa
53 LE	44	Insuficientemente rugosa
68 LD	43	Insuficientemente rugosa
83 LE	43	Insuficientemente rugosa
124 LD	54	Medianamente rugosa
139 LE	42	Insuficientemente rugosa
154 LD	48	Medianamente rugosa
179 LE	47	Medianamente rugosa
197 LD	54	Medianamente rugosa
212 LE	37	Lisa
231 LD	54	Medianamente rugosa
253 LE	48	Medianamente rugosa
274 LD	54	Medianamente rugosa
298LE	34	Lisa

No que diz respeito à microtextura a classificação da rodovia BR 020 – Paramoti, com aplicação de TSD, varia entre insuficientemente a medianamente rugosa, com poucos pontos classificados como lisa e apenas um ponto rugoso.

Da Figura 5.22 pode-se observar que alguns pontos enquadraram-se no intervalo sugerido pelo DNIT (2006). Esse intervalo classifica a textura do revestimento como satisfatória e segura para o tráfego de um modo geral.

Os resultados apresentados na Tabela 5.24 e Figura 5.23 são referentes aos ensaios de mancha de areia realizados no trecho BR 020 – Paramoti, após a conclusão do revestimento, e nas mantas asfálticas coletadas no trecho, após o ensaio de WTAT. Foram coletadas 9 mantas de TSD, enquanto que, sobre o revestimento aplicado em campo foram feitos 18 ensaios de mancha de Areia. Por essa razão algumas linhas da Tabela 5.24 não foram preenchidas.

Tabela 5.24 - Resultados dos ensaios da mancha de areia e classificação da textura.

ENSAIOS DE MANCHA DE AREIA					
Trecho: BR 020-Paramoti					
Revestimento em Tratamento Superficial Duplo (TSD)					
TRECHO			MANTA TRECHO		Classificação
EST.	D (mm)	HS (mm)	D(mm)	HS(mm)	
5+9LD	136,80	1,70	113,50	2,47	Muito grosseira/aberta
20+10LE	134,00	1,77	121,80	2,15	Muito grosseira/aberta
35LD	124,00	2,07	119,00	2,25	Muito grosseira/aberta
53LE	138,40	1,66	121,80	2,15	Muito grosseira/aberta
68LD	119,00	2,25	111,50	2,56	Muito grosseira/aberta
83LE	127,00	1,97	116,50	2,35	Muito grosseira/aberta
124LD	141,00	1,60	100,00	3,18	Muito grosseira/aberta
139LE	147,00	1,47	109,30	2,67	Muito grosseira/aberta
154LD	140,00	1,62	107,50	2,76	Muito grosseira/aberta
179LE	131,00	1,86			Muito grosseira/aberta
197LD	131,00	1,86			Muito grosseira/aberta
197AC	100,40	3,16			Muito grosseira/aberta
212LE	121,00	2,18			Muito grosseira/aberta
231LD	134,00	1,77			Muito grosseira/aberta
253LE	127,60	1,96			Muito grosseira/aberta
274LD	161,00	1,23			Muito grosseira/aberta
298LE	154,40	1,34			Muito grosseira/aberta
298AC	105,40	2,87			Muito grosseira/aberta
Média	130,31	1,91	113,43	2,50	-

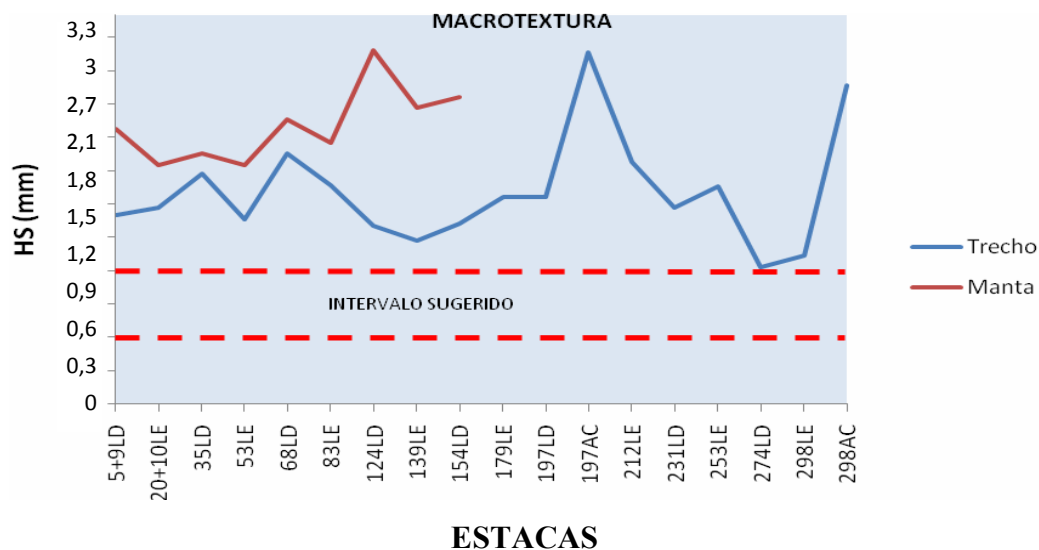


Figura 5.23 - Gráfico da textura superficial (macrotextura).

A macrotextura da rodovia BR 020 – Paramoti, assim como das mantas asfálticas com revestimento coletados no trecho, não apresentou variação na sua classificação. Tanto para o trecho como para as mantas coletadas no trecho, a macrotextura apresentou características muito grosseira ou muita aberta. Por sua vez a macrotextura das mantas asfálticas, depois de submetidas ao ensaio WTAT, apresentou valores superiores aos obtidos no trecho. Isso se deu devido o revestimento moldado em laboratório apresentar uma textura mais aberta, em razão dos equipamentos usados para aplicação dos materiais por serem de pequeno porte.

5.6.2 - Resultados dos ensaios de mancha de areia no revestimento, confeccionado em laboratório, com uso de brita e emulsão asfáltica RR – 2C usados no trecho

Os resultados apresentados nesse sub-item foram produzidos em laboratório a partir da confecção de mantas asfálticas, usando-se a mesma composição do TSD aplicado no campo.

A Tabela 5.25 mostra os resultados dos ensaios de mancha de areia e a classificação da macrotextura, dos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas, com o uso de brita e emulsão asfáltica RR – 2C. Foram usadas taxas e materiais empregados no trecho BR 020 – Paramoti. A Figura 5.24 mostra o gráfico da textura superficial (macrotextura) dessas mantas.

Tabela 5.25 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento, confeccionado em laboratório, com brita e emulsão RR-2C usados no trecho BR 020 – Paramoti.

ENSAIO DE MANCHA DE AREIA						
BRITA C/ EMULSÃO RR-2C USADA NO TRECHO MOLDADA NO LMP						
ANTES DO DESGASTE				DEPOIS DO DESGASTE		
MANTA	D (mm)	HS (mm)	Classificação	D (mm)	HS (mm)	Classificação
M1	89,30	3,99	Muito grosseira/aberta	95,00	3,53	Muito grosseira/aberta
M2	86,30	4,28	Muito grosseira/aberta	90,00	3,93	Muito grosseira/aberta
M3	91,30	3,82	Muito grosseira/aberta	94,50	3,57	Muito grosseira/aberta
M4	84,50	4,46	Muito grosseira/aberta	97,50	3,35	Muito grosseira/aberta
M5	95,30	3,51	Muito grosseira/aberta	90,80	3,86	Muito grosseira/aberta
M6	92,50	3,72	Muito grosseira/aberta	99,80	3,20	Muito grosseira/aberta
M7	86,00	4,31	Muito grosseira/aberta	85,30	4,38	Muito grosseira/aberta
M8	90,80	3,86	Muito grosseira/aberta	89,80	3,95	Muito grosseira/aberta
M9	101,80	3,07	Muito grosseira/aberta	95,50	3,49	Muito grosseira/aberta
Média	90,86	3,89	-	93,13	3,69	-
μ max.	101,80	4,46	-	99,80	4,38	-
μ min.	84,50	3,07	-	85,30	3,20	-
C.V.	25,51	0,17	-	18,02	0,12	-
D.PADRÃO	5,05	0,41	-	4,25	0,34	-

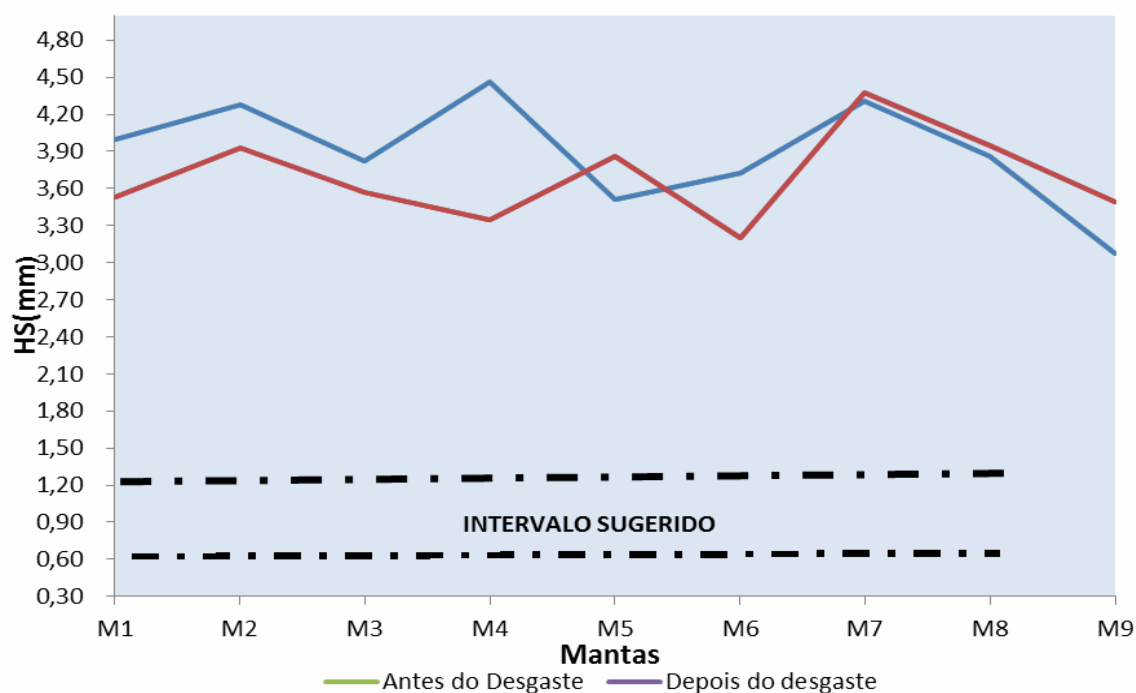


Figura 5.24 - Gráfico da textura superficial (macrotextura).

Os resultados apresentados na Figura 5.24 correspondem aos ensaios realizados em laboratório com o uso de equipamentos manuais. Devido ao ligante ter sido aplicado à baixa pressão e a compressão ter sido feita manualmente, o revestimento apresentou uma textura mais aberta e mais rugosa do que a dos revestimentos aplicados em campo sobre mantas asfálticas, conforme resultados apresentados na Tabela 5.24 (da est. 5 + 9 LD a est. 154 LD) e ilustrados na Figura 5.23.

Os resultados dos ensaios de mancha de areia realizados nos revestimentos, aplicados no trecho como nos revestimentos moldados em laboratório, apresentaram uma classificação da macrotextura muito grosseira ou muito aberta.

Os revestimentos moldados em laboratório apresentaram, em sua maioria, medidas maiores antes de serem submetidos ao ensaio WTAT do que depois de serem submetidos ao ensaio de WTAT. Acredita-se que esta diferença se deu devido à mangueira de borracha usada no ensaio de WTAT proporcionar um arrancamento do agregado em uma área mais concentrada. Conseqüentemente, a areia usada no ensaio para medir a altura média de mancha de areia espalha-se em uma área menor. Quanto menor o diâmetro do círculo em que se espalhou a areia, maior é a altura média da mancha de areia (HS). Quanto maior o HS mais grosseira e aberta é a textura do revestimento.

5.6.3 - Ensaio de mancha de areia realizados nos revestimentos aplicados em laboratório sobre mantas asfálticas e simulados em laboratório

Procurou-se nesta pesquisa analisar a macrotextura de revestimentos aplicados em campo e em laboratório. Em campo, o processo construtivo seguiu os procedimentos usuais utilizados na execução dos tratamentos superficiais. Em laboratório, procurou-se manter todos os critérios e cuidados nas aplicações dos ligantes e agregados, com a finalidade de obter um revestimento similar aos aplicados nas rodovias.

Os resultados dos ensaios de mancha de areia do revestimento aplicado em campo e do revestimento coletado sobre mantas asfálticas foram apresentados nos itens 5.6.1 e 5.6.2.

O único resultado obtido no revestimento, executado com escória de aciaria e emulsão asfáltica melhorada por polímero, aplicado em uma placa de solo-brita foi de $HS=4,20$ mm. Essa altura de mancha de areia classifica a textura do revestimento como sendo muito grosseira e aberta. Observou-se que o revestimento aplicado sobre a placa de solo-brita e os aplicados sobre mantas asfálticas, apresentaram a mesma classificação quanto ao ensaio de mancha de areia.

No laboratório da UFC mediu-se a macrotextura dos revestimentos aplicados em mantas asfálticas com o uso de agregado siderúrgico e agregado mineral, utilizando-se emulsão asfáltica RR 2C, sem polímero e melhorada por polímero. A classificação da macrotextura foi dada em função da altura média de mancha de areia segundo os critérios mostrados na Tabela 4.4, capítulo 4.

As medidas obtidas para altura de areia (HS), tanto em campo como em laboratório, foram superiores a 1,20 mm. A macrotextura verificada por meio da altura de areia (HS) deve estar no intervalo de 0,60 a 1,20 mm, como forma de permitir que a textura superficial seja classificada entre média, grosseira ou aberta, classificação considerada pelo DNIT como satisfatória.

Os revestimentos em tratamento superficiais apresentam uma capacidade de drenar a água superficial evitando o fenômeno da hidroplanagem, principalmente em texturas grosseiras ou abertas. Os tratamentos superficiais apresentam, também, um maior nível de ruídos.

5.6.3.1 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de escória de aciaria e emulsão asfáltica RRP – 2C

A Tabela 5.26 mostra os resultados dos ensaios de mancha de areia e a classificação da macrotextura, dos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas, com o uso de escória de aciaria e emulsão asfáltica RRP – 2C. Na Figura 5.25 apresenta-se o gráfico da textura superficial (macrotextura) dessas mantas.

Tabela 5.26 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com escória de aciaria e emulsão RRP-2C.

ENSAIO DE MANCHA DE AREIA						
ESCÓRIA DE ACIARIA C/ EMULSÃO RRP-2C						
ANTES DO DESGASTE				DEPOIS DO DESGASTE		
MANTA	D (mm)	HS (mm)	Classificação	D (mm)	HS (mm)	Classificação
M21AN	89,20	4,00	Muito grosseira/aberta	90,00	3,93	Muito grosseira/aberta
M22AN	82,60	4,67	Muito grosseira/aberta	95,20	3,51	Muito grosseira/aberta
M23AN	88,20	4,09	Muito grosseira/aberta	90,80	3,86	Muito grosseira/aberta
M1UFC	86,80	4,23	Muito grosseira/aberta	93,50	3,64	Muito grosseira/aberta
M2UFC	98,00	3,32	Muito grosseira/aberta	102,00	3,06	Muito grosseira/aberta
Média	88,96	4,06	-	94,30	3,60	-
μ max.	98,00	4,67	-	102,00	3,93	-
μ min.	82,60	3,32	-	90,00	3,06	-
C.V.	25,49	0,19	-	18,30	0,10	-
D.PADRÃO	5,05	0,44	-	4,28	0,31	-

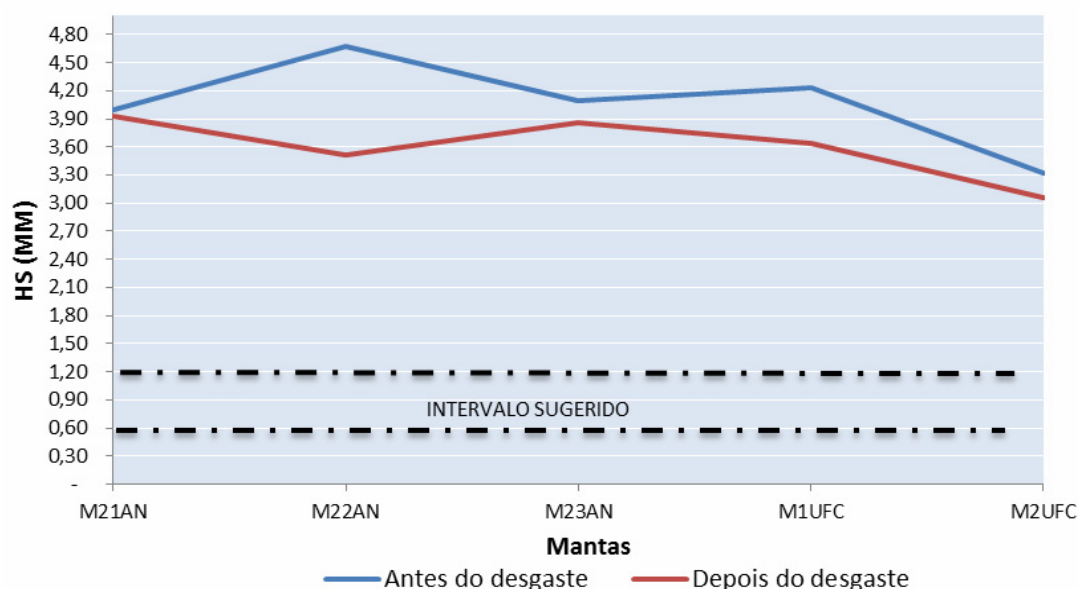


Figura 5.25 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da E+RRP-2C.

Observa-se na Figura 5.25 que o revestimento apresenta uma textura muito grosseira e aberta, antes e depois de ser submetida ao ensaio de WTAT.

5.6.3.2 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de brita e emulsão asfáltica RRP – 2C

A Tabela 5.27 mostra os resultados dos ensaios de mancha de areia e a classificação da macrotextura, dos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas, com o uso de brita e emulsão asfáltica RRP – 2C. A Figura 5.26 apresenta o gráfico da textura superficial (macrotextura) das mantas produzidas em laboratório

Tabela 5.27 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com brita e emulsão RRP-2C.

ENSAIO DE MANCHA DE AREIA						
BRITA C/ EMULSÃO RRP-2C						
ANTES DO DESGASTE				DEPOIS DO DESGASTE		
MANTA	Ds (mm)	HS (mm)	Classificação	D(mm)	HS (mm)	Classificação
M24AN	91,80	3,78	Muito grosseira/aberta	95,60	3,48	Muito grosseira/aberta
M25AN	90,00	3,93	Muito grosseira/aberta	96,80	3,40	Muito grosseira/aberta
M26AN	79,80	5,00	Muito grosseira/aberta	91,40	3,81	Muito grosseira/aberta
M7UFC	91,50	3,80	Muito grosseira/aberta	96,00	3,46	Muito grosseira/aberta
M8UFC	93,80	3,62	Muito grosseira/aberta	98,50	3,28	Muito grosseira/aberta
M9UFC	92,30	3,74	Muito grosseira/aberta	91,30	3,82	Muito grosseira/aberta
M10UFC	94,30	3,58	Muito grosseira/aberta	91,00	3,85	Muito grosseira/aberta
Média	90,50	3,92	-	94,37	3,58	-
μ max.	94,30	5,00	-	98,50	3,85	-
μ min.	79,80	3,58	-	91,00	3,28	-
C.V.	20,86	0,21	-	8,10	0,05	-
D.PADRÃO	4,57	0,45	-	2,85	0,22	-

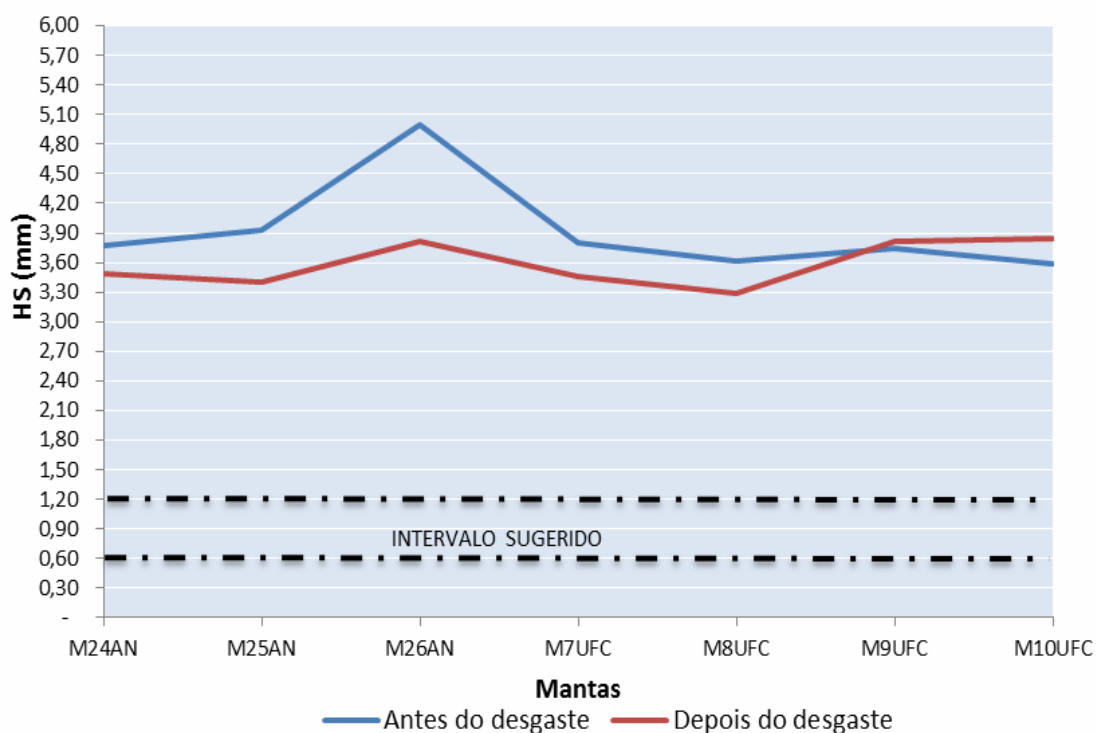


Figura 5.26 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da B+RRP-2C.

Observa-se na Figura 5.26 que o revestimento apresenta uma textura muito grosseira e aberta, antes e depois de ser submetida ao ensaio de WTAT. Nas mantas M9UFC e M10UFC valores de HS depois do ensaio são superiores aos obtidos antes. Esse fato ocorreu devido a uma maior desagregação dos agregados da 1ª camada em função da ação da mangueira.

5.6.3.3 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de escória de aciaria e emulsão asfáltica RR – 2C

A Tabela 5.28 mostra os resultados dos ensaios de mancha de areia e a classificação da macrotextura, dos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas, com o uso de escória de aciaria e emulsão asfáltica RR – 2C. É mostrado na Figura 5.27 o gráfico da textura superficial (macrotextura).

Tabela 5.28 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com escória de aciaria e emulsão RR-2C.

ENSAIO DE MANCHA DE AREIA						
ESCÓRIA DE ACIARIA C/ EMULSÃO RR-2C						
ANTES DO DESGASTE				DEPOIS DO DESGASTE		
MANTA	D (mm)	HS (mm)	Classificação	D (mm)	HS (mm)	Classificação
M1UFC	83,60	4,56	Muito grosseira/aberta	94,60	3,56	Muito grosseira/aberta
M2UFC	95,40	3,50	Muito grosseira/aberta	93,00	3,68	Muito grosseira/aberta
M3UFC	84,80	4,43	Muito grosseira/aberta	81,60	4,78	Muito grosseira/aberta
M4UFC	84,00	4,51	Muito grosseira/aberta	80,40	4,93	Muito grosseira/aberta
M5UFC	86,00	4,31	Muito grosseira/aberta	83,00	4,62	Muito grosseira/aberta
M6UFC	80,40	4,93	Muito grosseira/aberta	87,00	4,21	Muito grosseira/aberta
M7UFC	78,00	5,23	Muito grosseira/aberta	84,00	4,51	Muito grosseira/aberta
Média	84,60	4,49	-	86,22	4,32	-
μ max.	95,40	5,23	-	94,60	4,93	-
μ min.	78,00	3,50	-	80,40	3,56	-
C.V.	25,89	0,25	-	26,76	0,24	-
D.PADRÃO	5,09	0,50	-	5,17	0,49	-

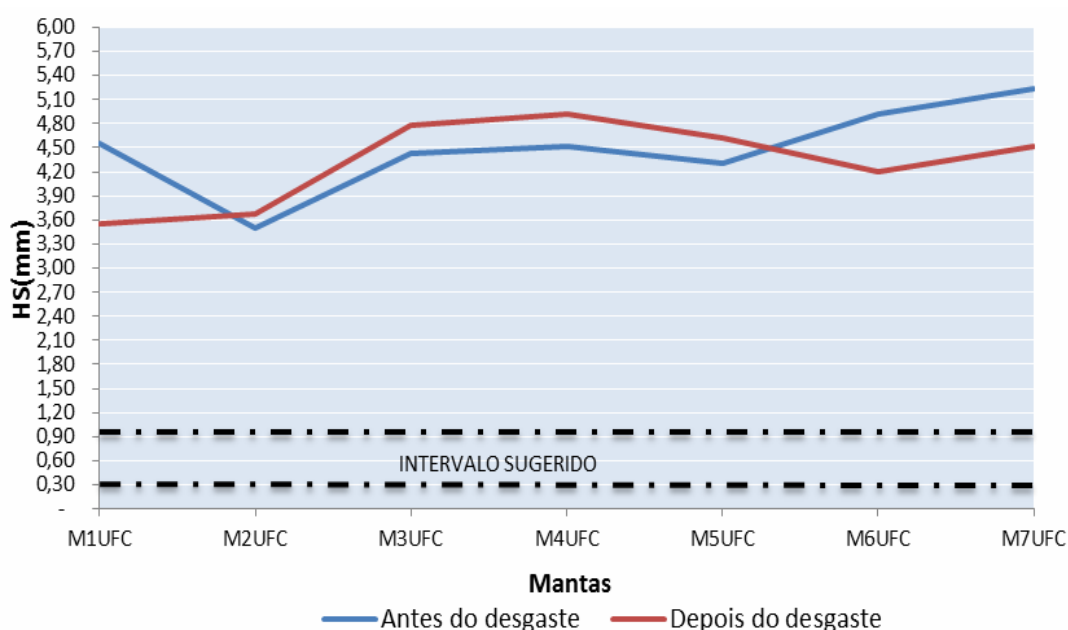


Figura 5.27 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da E+RR-2C.

Observa-se na Figura 5.27 que o revestimento apresenta uma textura muito grosseira e aberta, antes e depois de ser submetida ao ensaio de WTAT. As mantas M2UFC, M3UFC, M4UFC e M5UFC, apresentaram valores de HS superiores depois do ensaio devido maiores desagregações sofridas pelos revestimentos em função da ação da mangueira usada. Essa ação provoca uma menor área de areia espalhada e quanto menor a área maior o HS (ver no Capítulo 4, equação 4.1) e a classificação é dada em função do HS (altura média da mancha de areia).

5.6.3.4 - Resultados do ensaio de mancha de areia no revestimento com uso de brita e emulsão asfáltica RR – 2C

A Tabela 5.29 mostra os resultados dos ensaios de mancha de areia e a classificação da macrotextura, dos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas, com o uso de brita e emulsão asfáltica RR – 2C. A Figura 5.28 mostra o gráfico da textura superficial (macrotextura) obtido dos ensaios.

Tabela 5.29 - Resultado do ensaio de mancha de areia no revestimento com brita e emulsão RR-2C.

ENSAIO DE MANCHA DE AREIA						
BRITA C/ EMULSÃO RR-2C						
ANTES DO DESGASTE				DEPOIS DO DESGASTE		
MANTA	D (mm)	HS (mm)	Classificação	D (mm)	HS (mm)	Classificação
M8UFC	84,60	4,45	Muito grosseira/aberta	103,00	3,00	Muito grosseira/aberta
M9UFC	83,80	4,54	Muito grosseira/aberta	90,00	3,93	Muito grosseira/aberta
M10UFC	88,60	4,06	Muito grosseira/aberta	97,00	3,38	Muito grosseira/aberta
M11UFC	89,60	3,97	Muito grosseira/aberta	91,00	3,85	Muito grosseira/aberta
M12UFC	91,60	3,80	Muito grosseira/aberta	96,40	3,43	Muito grosseira/aberta
M13UFC	91,00	3,85	Muito grosseira/aberta	92,00	3,76	Muito grosseira/aberta
M14UFC	91,00	3,85	Muito grosseira/aberta	95,00	3,53	Muito grosseira/aberta
Média	88,60	4,07	-	94,91	3,55	-
μ max.	91,60	4,54	-	103,00	3,93	-
μ min.	83,80	3,80	-	90,00	3,00	-
C.V.	8,65	0,08	-	17,13	0,09	-
D.PADRÃO	2,94	0,28	-	4,14	0,30	-

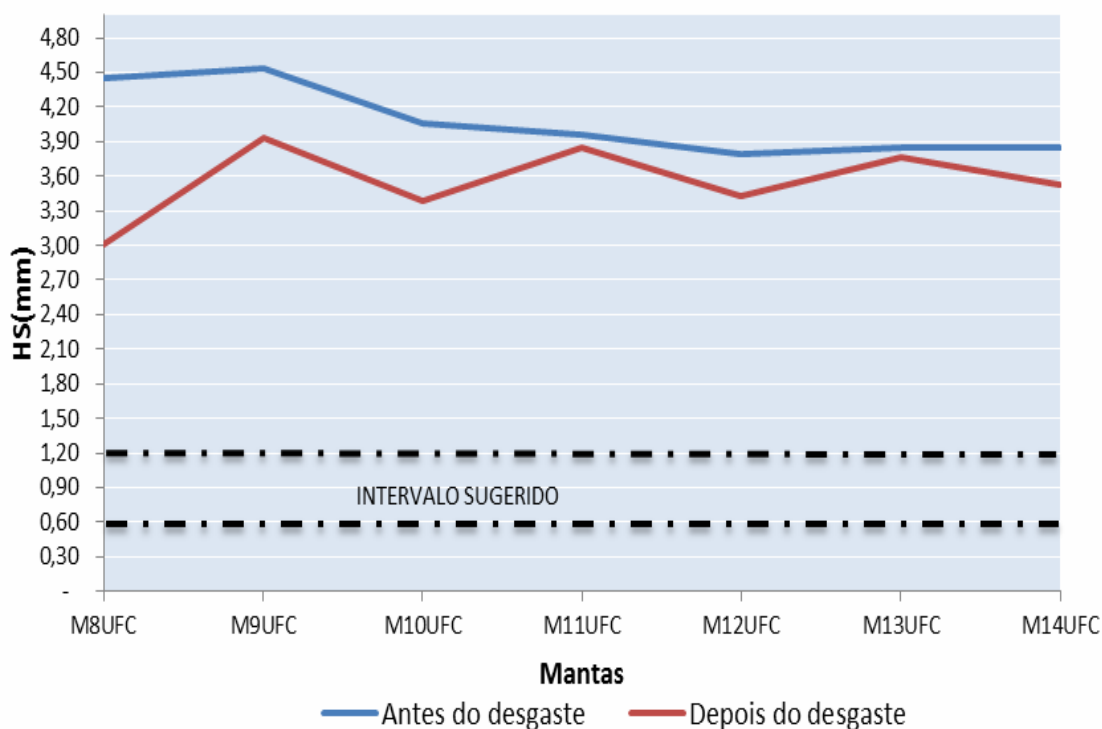


Figura 5.28 - Gráfico da textura superficial (macrotextura) da B+RR-2C.

Observa-se na Figura 5.28 que o revestimento apresenta uma textura muito grosseira e aberta, antes e depois de ser submetida ao ensaio de WTAT.

5.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados e das emulsões aplicadas nos revestimentos pesquisados. Realizaram-se ensaios de WTAT nos revestimentos aplicados em mantas asfálticas com a finalidade de melhor analisar as taxas aplicadas. Obtiveram-se resultados satisfatórios quanto às taxas aplicadas, se comparadas as taxas usualmente empregadas na execução dos tratamentos superficiais duplos no Ceará.

Foram apresentados os resultados dos ensaios mecânicos do solo brita utilizados na moldagem de placas usadas como base, para ser aplicado um revestimento em TSD e submetido ao simulador de tráfego do LMP/UFC. Os resultados obtidos, quando submeteu-se o revestimento ao simulador de tráfego, não permitiram o estabelecimento de parâmetros quantitativos devido aos problemas mecânicos do simulador. Mesmo

assim, pode-se observar que o uso do simulador é promissor para avaliação dos revestimentos em tratamentos superficiais.

Foi também analisada a macrotextura de todos os revestimentos aplicados, tanto em campo como em laboratório, através do ensaio de mancha de areia. Avaliou-se em campo a microtextura através do ensaio do pêndulo britânico do trecho ora em restauração da rodovia CE 162 que liga a BR 020 a Paramoti.

No capítulo 6 serão apresentadas as conclusões da presente pesquisa e as sugestões para futuros estudos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas da análise das amostras estudadas, bem como as sugestões para a continuidade de outros estudos e investigações.

Procurou-se comparar os revestimentos em tratamento TSD em campo e em laboratório sobre mantas asfálticas. Todas as conclusões estão baseadas nos resultados dos ensaios de caracterização e nos ensaios executados nos revestimentos aplicados sobre mantas asfálticas que foram submetidos ao ensaio de WTAT.

Objetivou-se mostrar a viabilidade do uso de rejeitos da indústria siderúrgica com emulsões asfálticas (RR-2C sem polímero e RRP-2C com polímero) nos revestimentos em TSD. Esses resíduos apresentaram qualidades satisfatórias para uso em tratamento superficial e podem desempenhar um papel importante na vida dos pavimentos rodoviários.

Ressalta-se que a experiência e o estudo da utilização da escória de aciaria com emulsão asfáltica melhorada por polímero em tratamento superficial é inédita no estado do Ceará. Assim, espera-se que esta pesquisa possa contribuir para a solidificação da aplicação desses materiais nos revestimentos em tratamento superficial, o qual representa aproximadamente 64% dos revestimentos do estado do Ceará.

6.2 – PRINCIPAIS CONCLUSÕES

6.2.1 - Quanto à caracterização dos materiais pesquisados

O ensaio de abrasão Los Angeles apresentou para as graduações obtidas na brita utilizada nesta pesquisa os valores de 42,18 % para a faixa B e de 22,80 % para a faixa

C. Para o caso das escórias o valor da abrasão foi de 21,50 % na faixa B e 20,35 % na faixa C. Dos valores obtidos para a brita, apenas o valor de 42,18 % foge do limite estabelecido pelo DNIT que é de no máximo 40%, enquanto o DER/CE estabelece um limite de até 55%. Os valores obtidos para a escória estão abaixo do permitido pelas normas que é de no máximo 25%. Conclui-se que os agregados são satisfatórios para uso em tratamento superficial.

Observou-se que para o diâmetro de 3/4", a escória de aciaria apresentou um maior valor para absorção, conseqüentemente, haverá uma maior necessidade de ligante. Já para o diâmetro de 3/8 a brita apresentou valor maior. Apesar da brita e da escória terem apresentado alguns valores abaixo dos permitidos pelas normas, nenhum desses materiais devem ser considerados inadequados para uso em tratamento superficial.

Quanto ao índice de forma o valor encontrado na graduação C para a escória foi de 76% e para a brita 66 %. Esses valores mostram uma cubicidade na forma dos agregados, sendo que a escória apresenta uma forma melhor para uso em tratamento superficial. Ressalta-se que quanto mais cúbico o agregado, melhor para ser usado em tratamento superficial por facilitar o intertravamento entre os grãos.

As normas estabelecem que a perda máxima de massa de agregado com uso de sulfato de sódio no ensaio de durabilidade é de 12 %. Para a escória obteve-se 1,86 % e para a brita 8,10 %. Portanto, observou-se que os agregados usados apresentaram valores satisfatórios, sendo que a escória apresentou uma perda de massa muito menor do que a brita.

Obteve-se nesta pesquisa uma adesividade satisfatória dos ligantes com os agregados usados.

Os ensaios químicos, difração de raio X, lixiviação e solubilização foram realizados somente nas escórias de aciaria. O ensaio da análise quantitativa mostrou uma maior concentração de Fe, Ca e Si e o ensaio de análise qualitativa uma concentração de C, Ca, O, Fe, Mg, Al e Si. Na difração de raio X foram encontrados

diversos compostos diferentes, dentre eles: quartzo (Si O_2), magnetita (Fe O_4), sulfeto de silício (Si S_2), silicato de cálcio e manganês ($\text{Ca}_4 \text{Mn}_4 \text{Si}_8 \text{O}_{24}$), entre outros. Esses elementos não interferem na aplicação das escórias de aciaria com emulsões asfálticas nos revestimento em tratamento superficial.

Quanto aos ensaios de lixiviação, a amostra apresentou concentrações inferiores às recomendadas pela norma ABNT/NBR 10004/2004. Portanto, os resultados apresentados confirmam que a escória estudada não apresenta concentração de substâncias que venham causar agressão ao meio ambiente.

As análises físico-químicas do extrato solubilizado não apresentaram valores que ultrapassaram nenhum dos limites citados na norma e a escória foi classificada como Classe II – Resíduo não-perigoso inerte. Estes resultados mostram a inexistência de risco de contaminação ambiental por parte da escória de aciaria usada neste trabalho.

Com relação à expansibilidade da escória utilizada, a mesma mostrou resultados nulos, enquanto que o limite estabelecido pelo DNIT (DNER ME 262/94) é de no máximo 3%. O processo usado e o tempo em que a escória ficou exposta ao sol e a chuva, bem como os elementos reagentes constituintes na escória possivelmente contribuíram para a neutralidade da expansão da escória usada nesta pesquisa.

As emulsões utilizadas nesta pesquisa, tanto a emulsão asfáltica RR-2C sem polímero como a emulsão asfáltica RR-2C modificada por polímero, apresentaram resultados que as enquadraram dentro dos limites estabelecidos pelas normas usadas. Sendo assim, as emulsões investigadas podem ser empregadas em revestimento do tipo TSD.

6.2.2 - Quanto aos ensaios de WTAT realizados nas mantas asfálticas

Foram executados em laboratório e coletados no trecho BR 020 – Paramoti, revestimentos sobre mantas asfálticas para serem submetidos ao ensaio de WTAT. Após a realização dos ensaios, observou-se que as amostras dos revestimentos coletadas em campo apresentaram uma camada mais densa quando comparados aos revestimentos

moldados em laboratório, isso se deu devido às amostras coletadas em campo terem sido moldadas com o uso de equipamentos de grande porte.

Para aplicação do ligante foi usado um carro espargidor que utiliza grande pressão para essa aplicação. A compactação foi feita com o uso de um rolo pneumático de 8000 kg. Ao passo que nos revestimentos moldados em laboratório, a compactação foi feita com um cilindro metálico com esforço humano e o ligante aplicado com um pincel. Estas operações fazem a diferença, quando a amostra é submetida ao ensaio WTAT para obter-se o desgaste. Revestimentos menos densos apresentaram uma maior desagregação dos agregados da primeira camada. De tal modo, o processo desenvolvido em laboratório apresenta vantagens tais como: uma melhor escolha no tipo de agregado e ligante, melhor definição das taxas do agregado e ligante e avaliação das rejeições em função das taxas definidas

As taxas dos ligantes foram definidas em função das taxas dos agregados. Nos ensaios realizados com os revestimentos executados com brita, as taxas apresentaram valores compatíveis com os valores estabelecidos pelo projeto para o trecho BR 020 – Paramoti. As taxas de ligante obtidas para os revestimentos com escória de aciaria apresentaram valores, em média, um pouco maiores do que os apresentados com o uso de brita, aproximadamente 14%. Isso se deu devido as escórias terem apresentado maiores valores de absorção e índice de forma, e, também, por ser mais porosa necessitando de mais ligante.

Pode-se concluir que os revestimentos submetidos ao ensaio de WTAT sofreram um esforço de torção causado pela mangueira revestida de borracha do equipamento. Ao passo que em campo, o tráfego proporcionou um esforço tangencial no revestimento. O esforço de torção causou, devido algum agregado apresentar forma mais cúbica e/ou por ser mais pontiagudo, maior desagregação dos agregados da primeira camada.

Os agregados da primeira camada são mais pesados que os agregados da segunda camada e o cálculo do desgaste é feito em função do peso. Conclui-se, portanto, que o esforço causado pelo contato pneu revestimento, chamado nesta

pesquisa de esforço tangencial, causa sempre um desgaste maior no agregado da segunda camada. No trecho esses desgastes recebem a denominação de “rejeição”.

As rejeições causam diversos defeitos no revestimento, conseqüentemente são danosas ao pavimento. Tendo em vista essas considerações, defende-se o uso de taxas que causem a menor rejeição, haja vista que o agregado é um material nobre e de custo elevado. Quanto maior a taxa do agregado, maior deve ser a taxa do ligante. Por ser o ligante mais caro do que o agregado, o revestimento vai apresentar custos elevados.

As rejeições apresentadas nas amostras coletadas em campo e nas amostras moldadas em laboratório com o mesmo material e taxas aplicadas em campo, mesmo considerando-se a sobretaxa considerada por LARSEN (1985), apresentaram taxas superiores aquelas definidas pelo método do mosaico.

Os resultados obtidos nos revestimentos em tratamento superficial duplo executados com escória de aciaria, brita e aplicações de emulsão asfáltica RR-2C sem polímero e emulsão asfáltica RR-2C melhorada por polímero foram satisfatórios. A escória apresentou uma boa cubicidade, que proporciona um bom intertravamento entre os agregados da primeira e segunda camada, e uma boa adesividade as emulsões asfálticas RR-2C e RRP-2C. A brita, também, apresentou uma boa adesividade e um bom intertravamento entre os agregados, sendo que a escória de aciaria intertravou melhor.

Os desgastes determinados nos revestimentos aplicados sobre as mantas asfálticas apresentaram valores inferiores às rejeições obtidas em campo. Isso se deu devido ter-se procurado aplicar as taxas ideais, sem considerar a sobretaxa sugerida por alguns autores.

Portanto, concluiu-se, com base nos ensaios de WTAT, que os materiais testados nesta pesquisa são viáveis de serem aplicados nos tratamentos superficiais. Os custos compostos mostraram que os revestimentos executados com a escória de aciaria e emulsão asfáltica melhorada por polímero foram 14,52% (R\$/km) menor do que o revestimento executado com brita. Ao passo que, os custos dos revestimentos

executados com emulsão asfáltica sem polímero e escória de aciaria foram menores 27,40 % (R\$/km) do que os executados com brita.

6.2.3 - Quanto aos ensaios mecânicos e ao uso do simulador de laboratório

Os ensaios mecânicos, tais como, Compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR), Módulo de Resiliência e densidade “*in Situ*” realizados no solo-brita (utilizado na placa moldada para ser usada como camada de base) apresentaram resultados técnicos adequados para uso em pavimentação.

Nos ensaios mecânicos, a energia aplicada ao solo brita foi a modificada. O ensaio de compactação resultou em uma massa específica aparente seca máxima de 2,180 g/cm³ e uma umidade ótima de 6,8%. O resultado obtido para o CBR após o rompimento dos corpos de prova foi de 68 %.

Para obter-se o grau de compactação de 100% na camada moldada de solo brita foram moldadas três placas. Cada placa era submetida ao ensaio de densidade “*in situ*”, até obter-se o grau de compactação ideal. Definido o procedimento ideal iniciou-se a aplicação do revestimento na camada de solo-brita. Primeiramente aplicou-se a imprimação. Depois, após a cura da imprimação, procedeu-se o revestimento em TSD. Na aplicação do revestimento procurou-se usar procedimentos similares aos aplicados em campo. Observou-se a viabilidade da técnica usada.

Apesar de não se fazer uma avaliação mais criteriosa dos revestimentos submetidos ao simulador de tráfego, devido aos problemas mecânicos no simulador, pode-se observar que o ensaio é de fundamental importância para avaliação das características funcionais dos revestimentos aplicados. Assim, acredita-se que os simuladores de laboratório podem contribuir para uma pré-avaliação dos tratamentos superficiais que serão empregados no campo.

6.2.4 - Quanto aos ensaios de macrotextura e microtextura

No trecho BR 020 – Paramoti foram feitos ensaios de mancha de areia. Assim como foram feitos ensaios de mancha de areia nas mantas asfálticas moldadas em campo e em laboratório. Os resultados dos ensaios de mancha de areia realizados no trecho, apresentaram valores menores quando comparados com os obtidos nas mantas asfálticas após o ensaio de WTAT.

Observou-se que o revestimento do trecho investigado, avaliado no período de construção, ainda não havia sofrido ação do tráfego, ao passo que os revestimentos submetidos ao ensaio de WTAT sofreram uma ação que pode ser relacionada ao tráfego. Entretanto, devido o revestimento já ter sofrido desgaste, sua textura fica mais grosseira e mais aberta, por isso seus valores são maiores. Portanto, levando-se em conta o esforço de torção aplicado às mantas asfálticas coletadas no trecho e moldadas em laboratório, pode-se comparar esses desgastes a ação do tráfego por algum período de tempo.

Do ponto de vista de segurança desses revestimentos, pode-se concluir, diante dos valores obtidos nos ensaios para obtenção da microtextura e da macrotextura desta pesquisa, que os revestimentos analisados possuem valores de macrotextura superiores aos estabelecidos por norma. Superfícies com macrotextura classificadas de média a muito aberta, proporcionam melhor escoamento da água porventura acumulada e que, por sua vez, facilitam o processo de frenagem dos veículos.

6.3 – SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Espera-se que o trabalho desenvolvido nessa pesquisa possa ser continuado. Para que o conhecimento em tratamentos superficiais seja ampliado, sugere-se:

- a) construir um trecho experimental com o uso dos materiais testados;
- b) estudar o uso de tratamento superficial em restauração de concreto asfáltico quando o defeito predominante no concreto asfáltico for o desgaste, isto é, não houver

problema de fadiga. Acredita-se que o tratamento superficial funcionará adequadamente como camada rejuvenescedora, com a vantagem de ser mais econômico que os concretos asfálticos;

- c) pesquisar a viabilidade técnica e econômica do uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e Argila Calcinada nos tratamentos superficiais com as emulsões asfálticas RR-2C sem polímero e RR-2C melhorada por polímero, como o objetivo de testar o método desenvolvido nesta pesquisa;
- d) definir, melhor, os limites aceitáveis dos materiais finos (por exemplo: o pó de pedra que costuma acompanhar o agregado) e da umidade no agregado. Os finos absorvem mais ligantes diminuindo a adesividade do ligante com o agregado;
- e) desenvolver e padronizar um ensaio dinâmico para verificação da adesividade ativa e da adesão global que são importantes para um bom desempenho dos tratamentos superficiais;
- f) desenvolver outras pesquisas usando outros materiais alternativos, tais como: asfalto- borracha aplicado com escória de aciaria e asfalto borracha aplicado com RCD, em tratamento superficial;
- g) aprimorar um método de aplicação e avaliação dos tratamentos superficiais, quando executados sobre placas de solos moldadas em laboratório e submetidos ao simulador de tráfego;
- h) desenvolver um simulador de laboratório mais específico para prever o desempenho de um tratamento superficial a ser empregado no campo;
- i) medir o índice de desgaste de pneus em revestimentos com escória de aciaria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 283 (1989) - Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage

ABEDA (2001) – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto. Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 5019: *Produtos de Ligas de Cobre – Terminologia*.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – IBP P-MB-586. *Determinação do Resíduo de Destilação de Emulsões Asfálticas* - Ensaio Sobre o Resíduo.

ABNT (1971) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – IBP P-MB-167: *Determinação da Ductilidade de Materiais Betuminosos (Revisão)*. Rio de Janeiro.

ABNT (1999) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 14376; *Emulsões Asfálticas – Determinação do Resíduo por Evaporação – Método Expedito*. Rio de Janeiro.

ABNT (1999) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6299: *Determinação do pH de Emulsões asfálticas*. Rio de Janeiro.

ABNT (1999) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 14393: *Emulsões Asfálticas – Determinação da Peneiração*. Rio de Janeiro.

ABNT (2000) - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR14594: *Emulsões Asfálticas Catiônicas: Especificação*. Rio de Janeiro.

- ABNT (2000) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6567: *Emulsões Asfálticas – Determinação da Carga de Partícula*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2000) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 14491 – *Emulsões Asfálticas – Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2001) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 14746: *Microrevestimento a Frio e Lama Asfáltica – Determinação de Perda por Abrasão Úmida*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 14896: *Emulsões Asfálticas Melhoradas por Polímero – Determinação do Resíduo Seco por Evaporação*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2003) - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 14948: *Materiais, execução e desempenho: Microrrevestimento asfálticos a frio modificados por polímero*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 15086: *Determinação da Recuperação Elástica pelo Dtilômetro*. Rio de Janeiro
- ABNT (2004) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10004/04: *Resíduos sólidos – Classificação*.
- ABNT (2004) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10005/04: *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*
- ABNT (2004) – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10006/04: *Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*.
- ABPV (1999) – Associação Brasileira de Pavimentação – *Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem Através de Aparelhagem Portátil*. Boletim Técnico nº 18.

ANP (2007) – Agência Nacional de Petróleo. Especificações Asfalto polímero SBS.

ANP (2007) – Agência Nacional de Petróleo. Especificações Brasileiras de Emulsões Modificadas por polímero SBR.

APS, M. (2006) *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI –International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica – USP, São Paulo,SP.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1994, C 1260 “Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates from potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)”.

ASTM (1980) – American Society For Testing and Materials: *methods of sampling petroleum and petroleum products*. USA.

ASTM (2001) - American Society For Testing and Materials: E 965 – 96 - *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique*.

ASTM (1998) - American Society For Testing and Materials: E 303 – 93 - *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*.

BELGO (2009) www.belgomineira.com.br. Pesquisa realizada em 06/11/2009.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. (2007) *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: PETOBRAS: ABEDA, 2006. XX f: il.

CAMARGO, E. L. P. A., NETO, G. G., COSTA, S. O., SENÇO, F. A. F. (2007); *Utilização de Escória de Aciaria como Alternativa de Baixo Custo para Pavimentação Urbana*. XIV CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO

DEL ASFALTO LA HABANA, CUBA. 18 a 23 de Novembro.

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

CNP (1988) – Conselho Nacional de Petróleo.

CROSS e SHRESTHA (2004) *Guideline for Using Prime and Tack Coat. Central Federal Lands*. Lakewood Highway Division. Report nº FHWA-CFL/TD-05-002.

DERT – ES-P 08/00 (2000) – *Imprimação. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviária. Pavimentação*.

DERT – ES-P 09/00 (2000) – *Pintura de Ligação. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias. Pavimentação*.

DERT – ES –P 10/00 (2000) – *Tratamento Superficial Simples. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias. Pavimentação*.

DERT – ES –P 11/00 (2000) – *Tratamento Superficial Duplo. Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias. Pavimentação*.

DERT (2002) *Manuais de levantamento de Campo. Sistema Integrado da Gestão de Manutenção (SIGMA)*. Dezembro de 2001.

DERT (2006) *Informativo Gerencial 2006 (Edição Comemorativa)*. Fortaleza/Ce, 2006. 236p.

DICKINSON, E. J. (1980) *The Hardening of Middle East Petroleum Asphalts in Pavement Surfacing*. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists.

DMA-1/DER-MG (1982) – Método de Ensaio de Expansão PTM – 130/1978, do Departamento de Transportes da Pennsylvania, Adaptado pelo DMA-1/DER-MG.

DNER - EM 262/94 (1994) - *Emprego de Escórias de Aciaria em Pavimentos Rodoviários*. Rio de Janeiro.

DNER – EM 396/99 (1999) – *Cimento Asfáltico Modificado por Polímero*. Rio de Janeiro.

DNER – ME 003/99 – *Materiais Betuminosos – Determinação da Penetração*. Rio de Janeiro.

DNER- ME 006/00 (2000) – *Emulsão Asfáltica – Determinação da Sedimentação*. Rio de Janeiro.

DNER – ME 035/98 (1998) – *Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles*

DNER – ME 049/94 (1994) – *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia*. Rio de Janeiro.

DNER – ME 063/94 (1994) – *Emulsões Asfálticas Catiônicas – Determinação da Desemulsibilidade*. Rio de Janeiro.

DNER-ME 078/94 (1994) – *Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso*

DNER-ME 081/98 (1998) - *Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. Rio de Janeiro.

DNER-ME 083/98 (1998) - *Agregados – análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

DNER-ME 084/95 (1995) - *Agregado miúdo – determinação de densidade real*. Rio de Janeiro.

DNER – ME 086/94 – *Agregado – Determinação do Índice de Forma.*

DNER – ME 089/94 (1994) – *Agregado – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio.*

DNER – ME 092/94 – *Solos – Determinação da Massa Específica Aparente “in Situ” com o uso do Frasco de Areia.* Rio de Janeiro.

DNER – ME 162/94 (1994) – *Solos – Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas.* Rio de Janeiro.

DNER – ME 382/99 (1999) – *Determinação da Recuperação Elástica da Materiais Asfálticos Modificados por Polímeros, pelo Método do Ductilômetro.*

DNER – ES 306/97 (1997) – *Pavimentação – Imprimação.*

DNER – ES 309/97 (1997) – *Pavimentação – Tratamento Superficial Duplo*

DNER – ES 310/97 (1997) – *Pavimentação – Tratamento Superficial Triplo*

DNIT (2006) – *Manual de Pavimentação.* Publicação IPR - 719

DOMINGUES, F. A. A. (1993) *Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos.* 96 p. USP. São Paulo.

DUQUE NETO, F.S. (2004) *Proposição de metodologia para a escolha de solo e dosagem de antipo com emulsão de xisto.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

ECOSUL, (2009) *Pesquisa Realizada no Site da ECOSUL S/A em Novembro, em www.ecosul.com.br*

- FARRAND, B. e J. EMERY, (1995) “*Recent Improvements in Quality of Steel Slag Aggregate*”. *Transportation Research Record*, 1486.
- FERNANDES, C.G. (2004) *Caracterização mecanística de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação*. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pósgraduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- FILEV, R.(2003) *Escória de aciaria, Ficha técnica*. Universidade de São Paulo, São Paulo, disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria>. Acessado em 28 de Julho 2008.
- FORTES, F. Q.(1994); *Pavimentos de Baixo Custo: Considerações sobre seus Defeitos e Propostas de Conservação e Recuperação*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos. São Paulo.
- GEYER, R.T. (2001) *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre. 170p.
- GONDIM, L. M. (2008) *Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/ Estado do Ceará* . Dissertação de Mestrado.
- GONTIJO, P. R. A. e SANTANA, H.(1985) *Tratamentos Superficiais Betuminosos*. Associação Brasileira de Pavimentação. 20ª Reunião Anual de Pavimentação. Fortaleza, Ce. Novembro.
- GUARNIERI, J. J. e FERREIRA, A. L. D. (1985) *Tratamento Superficial com Banho Final Diluído – (Um método para eliminar a rejeição do agregado)*. Associação Brasileira de Pavimentação. 20ª Reunião Anual de Pavimentação. Fortaleza, Ce. Novembro.

- HUNETR, R.N.(2000); *Asphalts in Road Contruction*. London: Thomas Telford Ed.
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo -MB-164-ASTM-D-36 – *Determinação do ponto de Amolecimento*. Materiais Betuminosos. Rio de Janeiro.
- IA (1989) -Instituto de Asfalto – *Manual de Asfalto*. Série do Manual N° 4 (MS-S). Edição 1989. Revisado em 2002. Traduzido e distribuído pela Petrobras.
- IBS (2008) - Instituto Brasileiro de Siderurgia . *Aço e Siderurgia. Fluxo Simplificado de Produção*. www.ibs.org.br. Pesquisado em 29/07/2008.
- IBP (1978) - Instituto Brasileiro de Petróleo – *Informações Básicas sobre materiais Asfálticos*. Comissão de Asfalto. 2ª edição, Novembro.
- JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS – JIS (1992); *Escória siderúrgica para construção de estradas (tradução da norma japonesa)*. JIS A 5015.
- JUVÊNCIO, E. L. (2001) *Estudo do Efeito da Adição de Polímero no Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio*. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exi-gências do Programa de Pós-Gradua-ção em Engenharia Civil, para obten-ção do título de “Magister Scientiae”. VIÇOSA MINAS GERAIS
- LARSEN, J. (1985) *Tratamento Superficial na Conservação e Construção de Rodovias*. Trabalho Técnico (TT – nº 02) Editado pela ABEDA. Rio de Janeiro.
- LEE, J. S. (2007) *Performance Based Evaluation of Asphalt Surface Treatment Using Third Scale Model Mobile Loading Simulator*. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy. Raleigh, North Carolina.
- LEITE, L.M. (1999) *Estudo do Preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero*. Tese de Doutorado, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- LEWANDOWSKI L.H. (1994) *Polymer Modification of Paving Asphalt Binders*. In: Rubber Chemistry and Technology: Polymers in Asphalt.
- LIMA, N.P.; J.F. NASCIMENTO; V.P.C. VAL FILHO E C.A.V. ALBERNAZ (2000) “Pavimentos de Alto Desempenho Estrutural Executados com Escória de Aciaria”. *10ª Reunião Anual de Pavimentação*, Uberlândia, MG.
- LMA (2009) – Laboratório de Microscopia Avançada, do Departamento de Física da Universidade de Federal do Ceará. Pesquisa Realizada pelo site www.fisica.ufc.br, em novembro de 2009.
- MACHADO, A. T (2000) *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 135p, São Paulo.
- MAIA, J. N. (2002), ISCTE, *Processo Tecnológico II, Indústria Siderúrgica*. Lisboa
- MASUERO, A.B. (2001) *Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento*. Porto Alegre, 264p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MATTOS, J. R. G. ; ROZEK, T. M. ; NÚÑEZ, W. P.(2008) *Avaliação da aderência pneu-pavimento em alguns pontos da BR-290*. In: 5º Seminário Nacional Modernas Técnicas Rodoviárias, 2008, Florianópolis. Modernas Técnicas Rodoviárias.
- MEDINA, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. Editora UFRJ. 380 p. Rio de Janeiro.
- MELO, A. L. e SANTANA, H. (1970) *Tratamentos Superficiais*. Associação Brasileira de Pavimentação. 11ª Reunião Anual. Campinas São Paulo, SP. Julho.

- MELO, A. L. (1978) *Tratamentos Superficiais*. Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Recife-Pe.
- MÉTODO DE ENSAIO DE EXPANSÃO PTM – 130/78 (1978) *Departamento de Transportes da Pennsylvania, dos Estados Unidos da América*, elaborado pela DMA-1/DER-MG.
- MICELI JR, G. (2006) *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. (1995) *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Villibor. São Paulo/SP.
- ODA, S. (2000) *Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação*, Tese de Doutorado, EESC, São Carlos, SP, Brasil.
- OKAMOTO A., FUTAMURA, E., KAWAMURA, K. (1981) Hydration behavior of LD slag at autoclave test. In: Transactions ISIJ. Vol 21. p. 16-24.
- PENA, D. C. (2004) *Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação*. Dissertação de mestrado, Programa e Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 152p, Vitória.
- PINTO, S. (2002) *Tratamento Superficial Betuminoso*. Instituto Militar de Engenharia – IME/RJ.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E.; FARAH, H. (1983) *Características elásticas de concretos asfálticos com látex*. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ASFALTO, 2., Mar Del Plata, Argentina. *Anais...*

- RABÊLO, A. N (2006) *Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará*, 204 f., il. color., enc. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- RAMOS, C.R.; GUARÇONI, D.; GUERREIRO, F. (1995) *Curso de ligantes asfálticos*. Rio de Janeiro: IBP.
- RAPOSO, C. O. L. (2005); *Estudo Experimental de Compactação e Expansão de uma Escória de Aciaria LD para Uso em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria.
- ROHDE, L.(2002) *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo Laboratorial*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 101p, Porto Alegre.
- ROHDE, L; NUÑEZ, W. P; CERATTI, J. A. P. (2003) *Escória de Aciaria Elétrica: uma Alternativa aos Materiais Granulares Tradicionais*. Revista Transportes, vol. XI, pp. 13-18, ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e ensino em Transportes.
- ROMANELLI, (2009 Pesquisa Realizada no Site da ROMANELLI em Novembro em www.romanelli.com.br
- RUBIO, A.R. , CARRETERO, J.G. (1991) *La aplicación de las escorias de aceria en carreteras*. Ingenieria Civil, v.80, p.5-8
- SANTANA, H. e GONTIJO, P. R. A. (1985) *Seleção dos Tipos de CAP Necessários à Pavimentação no Brasil*. ABEDA, Rio de Janeiro, Junho.
- SANTANA, H.(1992) *Manual de Pré-Misturados a Frio*. Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto. 1ª Edição. 297 p. Rio de Janeiro.

- SANTANA, H.(1993) *Mecânica dos pavimentos de baixo custo*. Anais da 27ª Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, vol 1, p. 489 - 521. Teresina.
- SASAKI, J. M. e BLEICHER, L. (2009) Informações Dadas pelo Profº Dr. Jose Marcos Sasaki e o Aluno de Iniciação Científica Lucas Bleicher, no Laboratório de Física da UFC.
- SBRIGHI, C. N.; BATTAGIN, I. L. S. (2002) *Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil*, CPTI, São Paulo, 40p.
- SANTOS NETO, P. F. (2007) *Estudos do Uso de Escória de Aciaria em Camadas de Pavimentos na Região Metropolitana de Fortaleza*. Universidade Federal de Fortaleza. Monografia de Graduação
- SHELL. (2003) *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. Cambridge.
- SILVA, E.A., (1994) *Uso de escória de aciaria em pavimentação viária*. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, v. 1, p. 261-283.
- SILVA, J. P. S. (2007) Aderência pneu-pavimento aeroportuário: conceitos e generalidades. In: Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, 1., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CONINFRA, ref. 01-53A.
- SILVA, E. A., COELHO, M.A.M., SILVA Jr. E. A., (2007) *O Uso de Escória de Aciaria como Base Granular e em Misturas Asfálticas a Quente (CBUQ) em Substituição aos Agregados Pétreos*.
- SILVA, E.A. e MENDONÇA, R.L. (2001) *Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento*. *Revista Engenharia Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 2, p. 7-20.
- SOLIZ, V. V. P. (2007) *Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ.

THE ASPHALT INSTITUTE (2001) *Construction of Hot Mix Asphalt* Institute, Manual Series N° 224 (MS-22). Second Edition, The Asphalt Institute, Lexington, KY.

THE SHELL BITUMEN HANDBOOK (2003) Fifth Edition.

THOMAS G. H. (2000) *Progress in the utilization of steel slags in the UK*. In: 2nd European slag conference - Euroslag. Dusseldorf.

TxDOT (2001) Texas Department of Transportation. Seal Coats and Surface Treatment Manual.

THULLER, R.B (2005) *Estudo de solos do Estado do Rio de Janeiro para aplicação em baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ.

VASCONCELOS, M. A. G. (2009) *Primeiro Estudo da Aplicação de Biodiesel como Material Alternativo para a Imprimação Betuminosa de Pavimentos Rodoviários*. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará. 67 p.

VOGT, J. C. (1975) *Novo Método de Dosagem dos Tratamentos Superficiais Betuminosos por Computação*. XVIª Reunião Anual da ABPV.

WACHSMUTH, F.; GEISELER, J.; FIX, W.; KOCH, K.; SCHWERDTFEGER, K. (1981) *Contribution to the structure of BOF slags and its influence on their volume stability*. Canadian Metallurgical Quarterly. Duisburg, Vol. 20, n° 3. p. 279 - 284.