

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

INVESTIGAÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO SOBRE  
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO

Rafael Marçal Martins de Reis

Porto Alegre - RS  
2012

Rafael Marçal Martins de Reis

**INVESTIGAÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO SOBRE  
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre - RS  
2012

MARTINS DE REIS, RAFAEL MARÇAL  
INVESTIGAÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO SOBRE  
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO / RAFAEL MARÇAL  
MARTINS DE REIS. -- 2012.

309 f.

Orientadora: JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS,  
2012.

1. PAVIMENTAÇÃO. 2. MISTURAS ASFÁLTICAS. 3.  
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO. I. PEREIRA  
CERATTI, JORGE AUGUSTO, orient. II. Título.

**RAFAEL MARÇAL MARTINS DE REIS**

**INVESTIGAÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO SOBRE  
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 24 de agosto de 2012.

---

**Prof. Jorge Augusto Ceratti**  
Dr. pela UFRJ  
Orientador

---

**Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**  
Ph.D. pela University of Leeds, UK  
Coordenador do PPGEC

**BANCA EXAMINADORA**

**Leni Figueiredo Mathias Leite (CENPES)**  
Dra. pela UFRJ

**Liédi Légi Bariani Bernucci (EPUSP)**  
Dra. pela EPUSP

**Laura Maria Goretti da Motta (UFRJ)**  
Dra. pela UFRJ

**Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pela UFRGS

Ao meu pai, Nilo Cesar Del Cueto de Reis, com muita  
saúde. .

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Drs. Jorge Augusto P. Ceratti (orientador da pesquisa) e Washington P. Núñez da UFRGS

A Dra. Liédi Légi B. Bernucci e ao Dr. Edson Moura da EPUSP.

A Dra. Luciana Rohde e ao laboratorista Vinícios da Silva Alves do LAPAV/UFRGS.

Ao Dr. Luciano P. Specht da UFSM e ao acadêmico Moacir Soares da UNIJUI.

A Dra. Márcia Apps

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná - DER-PR.

Aos colegas da Compasa do Brasil – Asfaltos e Serviços: Carlos Guilherme C. do Rego, Marcos Silka, Luiz Lima, Gilberto Dantas, Edinei R. Rizzo, Elton Negrelli, Djéssica K. Vieira e Luciana M. F. Martins.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

*Madre Teresa de Calcutá*

## RESUMO

REIS, R. M. M. **Investigação de Campo e Laboratório sobre Revestimento Asfáltico Ultra Delgado**. 2012. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Na década de 1970, foi adotado para o projeto de pavimentos na França o princípio da “dissociação de funções das camadas do revestimento”. Principalmente foram destacados os parâmetros funcionais de conforto, segurança e redução do ruído à camada de rolamento/desgaste e estabelecidos maiores requisitos estruturais para as camadas subjacentes do pavimento. Destacam-se pelo seu uso corrente na França, Inglaterra, Alemanha, Espanha e EUA, para a camada de rolamento em vias de tráfego intenso e/ou pesado, os revestimentos asfálticos delgados e ultra delgados, produzidos e aplicados a quente, envolvendo o emprego de misturas com graduação descontínua. Essas misturas são empregadas principalmente para proteger a estrutura do pavimento e proporcionar maior segurança, qualidade de rolamento e redução do ruído do tráfego, isto é, preservar/melhorar a funcionalidade da rodovia, cabendo às camadas subjacentes do pavimento desempenhar adequadamente a função estrutural para resistir às cargas de tráfego. Esta pesquisa apresenta os procedimentos executivos de laboratório e de campo, bem como os resultados do estudo de dosagem e ao monitoramento das características funcionais de um revestimento asfáltico ultra delgado, composto por uma mistura asfáltica descontínua a quente e uma membrana elástica, num trecho experimental em rodovia de alto tráfego no Sul do Brasil. O estudo demonstra que a técnica pode ser utilizada no país para melhorar as condições superficiais do revestimento asfáltico em relação à segurança da via e redução de ruídos causados pelo tráfego ao meio ambiente.

**Palavras-chave:** *Pavimentação; misturas asfálticas; revestimento asfáltico ultra delgado.*



## ABSTRACT

REIS, R. M. M. . **Investigação de Campo e Laboratório sobre Revestimento Asfáltico Ultra Delgado**. 2012. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### **Investigação de Campo e Laboratório sobre Revestimento Asfáltico Ultra Delgado**

In the 1970s, it was adopted for the design of pavements in France the concept of "separation of functions of wearing courses". Especially prominent were the functional parameters of comfort, safety and noise reduction for wearing courses and greater structural requirements established for the underlying layers of the pavement. For high-traffic highway wearing courses stand out for its current use in France, England, Germany, Spain and the U.S. thin and ultrathin gap-graded hot-mix asphalt. Such mixtures are used primarily to protect the pavement structure and provide greater safety, rolling quality and traffic noise reduction that is, to preserve / enhance the functionality of the highway, leaving the underlying layers of the pavement adequately perform the structural function to resist to traffic loads. The study presents lab and job executive procedures as well as results of mixing asphalt dosage design and monitoring related to the functional characteristics of an ultra-thin hot asphalt wearing course, consisting of a gap-graded asphalt mixture and an elastic membrane, carried out in a high-traffic highway trial. The survey shows that the technique can be used in Brazilian roads to improve the wearing course conditions regarding road safety and traffic noise reduction to the environment.

**Key-words:** *pavement; asphalt mixes; ultrathin hot-mix asphalt wearing course.*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>20</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>24</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>26</b>
1.1 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS DA PESQUISA.....	31
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	35
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>37</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	37
<b>2.2 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DELGADOS.....</b>	<b>40</b>
2.2.1 Concreto asfáltico (CA).....	42
2.2.2 Microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF).....	45
2.2.3. Camada porosa de atrito (CPA)/ Camada drenante.....	49
2.2.4 Revestimento asfáltico tipo SMA ( <i>Stone Mastic / Matrix Asphalt</i> ).....	51
2.2.5 Micro-aglomerados <i>en caliente</i> .....	56
2.2.6 Misturas tipo “ <i>gap-graded</i> ”.....	58
2.2.7 Revestimentos asfálticos tipo BBTM ( <i>Béton Bitumineux Très Minces</i> ) e BBUM ( <i>Béton Bitumineux Ultra-Minces</i> ) - concepção francesa.....	60
2.2.7.1 BBTM.....	62
2.2.7.2 BBUM.....	67
2.2.8 Revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD) - concepção norte-americana.....	75
2.2.8.1 Seleção dos materiais e da graduação da mistura.....	77
2.2.8.2 Dosagem da mistura asfáltica.....	82
2.2.8.3 Processo construtivo.....	87
2.2.8.4 Controle tecnológico.....	87
<b>2.3 CARACTERÍSTICAS DA TEXTURA SUPERFICIAL RELACIONADAS À ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO.....</b>	<b>88</b>
2.3.1 Avaliação da macrotextura - mancha de areia.....	92
2.3.2 Avaliação da microtextura – pêndulo britânico.....	94

2.3.3 Avaliação da drenabilidade .....	95
2.3.4 Avaliação do IFI.....	96
<b>2.4 AVALIAÇÃO DO RUÍDO AMBIENTAL.....</b>	<b>98</b>
<b>2.5 AGREGADOS .....</b>	<b>105</b>
2.5.1 Tamanho e graduação .....	105
2.5.2 Limpeza.....	106
2.5.3 Resistência e angularidade .....	106
2.5.4 Forma das partículas e textura superficial .....	107
2.5.5 Porosidade interna adequada.....	107
2.5.6 Sanidade.....	107
2.5.7 Propriedades hidrófobas - adesividade.....	107
<b>2.6 LIGANTES ASFÁLTICOS.....</b>	<b>109</b>
2.6.1 Cimentos asfálticos de petróleo - CAP .....	110
2.6.2 Ligantes asfálticos modificados por polímeros - AMP .....	112
2.6.3 Emulsões asfálticas .....	113
<b>2.7 ADITIVOS MELHORADORES DE ADESIVIDADE .....</b>	<b>116</b>
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO .....</b>	<b>118</b>
<b>3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA DE LABORATÓRIO.....</b>	<b>118</b>
<b>3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>119</b>
3.2.1 Seleção dos agregados minerais.....	119
3.2.2 Seleção do material de enchimento – fíler mineral .....	120
3.2.3 Seleção dos ligantes asfálticos .....	121
3.2.4 Aditivo melhorador de adesividade.....	124
3.2.5 Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial das misturas estudadas .....	125
3.2.6 Caracterização e densidade da mistura de agregados.....	126
3.2.7 Composição e graduação da mistura de agregados .....	131
<b>3.3 ESTUDO DE DOSAGEM DO RAUD.....</b>	<b>143</b>
3.3.1 Avaliação da existência do contato grão-grão da mistura asfáltica - projetos RAUD.....	157
3.3.2 Avaliação da sensibilidade ao escorrimento .....	158
3.3.3 Avaliação mecânica das misturas asfálticas.....	161
3.3.3.1 Resistência à tração por compressão diametral.....	161
3.3.3.2 Resistência ao dano por umidade induzida.....	169

3.3.3.3 Resistência ao desgaste por abrasão Cantabro .....	174
3.3.3.4 Estabilidade mecânica por simulador LPC .....	183
<b>3.4 RESULTADOS FINAIS E DISCUSSÕES DO ESTUDO DE DOSAGEM .....</b>	<b>188</b>
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CAMPO .....</b>	<b>193</b>
<b>4.1 DESCRIÇÃO E PLANEJAMENTO DO PROGRAMA DE CAMPO .....</b>	<b>193</b>
<b>4.2 CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>198</b>
<b>4.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>201</b>
4.3.1 Seleção dos agregados minerais .....	201
4.3.2 Seleção do material de enchimento – filer mineral .....	201
4.3.3 Seleção dos ligantes asfálticos .....	201
4.3.4 Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do filer industrial .....	202
4.3.5 Caracterização e densidade da mistura dos agregados .....	202
4.3.6 Composição e graduação da mistura de agregados .....	203
<b>4.4 PROJETOS DE DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>206</b>
4.4.1 Avaliação da existência do contato grão-grão da mistura .....	208
4.4.2 Avaliação da sensibilidade ao escorrimento .....	209
4.4.3 Avaliação mecânica das misturas asfálticas .....	212
4.4.3.1 Resistência à tração por compressão diametral e ao dano por umidade induzida .....	212
4.4.3.2 Resistência ao desgaste por abrasão Cantabro .....	214
4.4.3.3 Avaliação da estabilidade mecânica e da durabilidade da macrotextura superficial .....	215
4.4.4 Resultados dos estudos de dosagem das misturas asfálticas .....	222
<b>4.5 PROCESSO CONSTRUTIVO DO RAUD.....</b>	<b>225</b>
4.5.1 Equipamentos.....	225
4.5.2 Procedimentos construtivos .....	227
4.5.2.1 Camada impermeabilizante e de ligação .....	227
4.5.2.2 Produção da mistura asfáltica para o RAUD .....	229
4.5.2.3 Transporte da mistura asfáltica para o RAUD.....	229
4.5.2.4 Distribuição e compactação da massa asfáltica para o RAUD .....	230
4.5.2.5 Abertura ao tráfego do RAUD.....	233
4.5.2.6 Execução do segmento de controle.....	235
<b>4.6 CONTROLE TECNOLÓGICO DO TRECHO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>236</b>
<b>4.7 MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>246</b>

<b>4.8 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PROGRAMA DE CAMPO .....</b>	<b>248</b>
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>264</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>272</b>
<b>ANEXO A - RELATÓRIO FOTOGRÁFICO:CONSTRUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL DA PESQUISA.....</b>	<b>286</b>
<b>ANEXO B - PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO E DE CONTROLE TECNOLÓGICO PARA RAUD.....</b>	<b>302</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Investimento do setor de transportes nas últimas décadas.....	28
Figura 2.1: Estrutura de pavimento perpétuo.....	40
Figura 2.2: Comparação entre as faixas granulométricas para o concreto asfáltico delgado.....	44
Figura 2.3: Faixas granulométricas para MRAF.....	48
Figura 2.4: Determinação da peneira de quebra.....	54
Figura 2.5: Espessura da camada de BBUM.....	67
Figura 2.6: Equipamento para aplicação de BBUM.....	72
Figura 2.7: Processo de aplicação simultânea de emulsão asfáltica e da mistura asfáltica ultra delgada.....	73
Figura 2.8. Estrutura do BBUM.....	74
Figura 2.9: Exemplo Determinação do teor de ligante de projeto (Pb) com base na espessura do filme de ligante (FT) e teor de vazios (ou relação Gmb/Gmm) da mistura asfáltica.....	83
Figura 2.10: Tipo de superfície em função da classe de macrotextura e microtextura.....	89
Figura 2.11: Relação entre o nível de ruído e o tamanho nominal máximo dos agregados...106	
Figura 3.1 a: Viscosidade x temperatura para o ligante asfáltico tipo CAP 50/70.....	124
Figura 3.1 b: Viscosidade x temperatura para o ligante asfáltico tipo e AMP 55/75-E.....	124
Figura 3.2: Graduação da mistura Pedreira Basalto CALTRANS CAP 50-70.....	131
Figura 3.3: Graduação da mistura Pedreira Basalto Tennessee CAP 50-70.....	132
Figura 3.4: Graduação da mistura Pedreira Central CALTRANS CAP 50-70.....	133
Figura 3.5: Graduação da mistura Pedreira Central Tennessee CAP 50-70.....	134
Figura 3.6: Graduação da mistura Pedreira Tibagi CALTRANS CAP 50-70.....	135
Figura 3.7: Graduação da mistura Pedreira Tibagi Tennessee CAP 50-70.....	136
Figura 3.8: Graduação da mistura Pedreira Basalto CALTRANS AMP 55/75-E.....	137
Figura 3.9: Graduação da mistura Pedreira Basalto Tennessee AMP 55/75-E.....	138

Figura 3.10: Graduação da mistura Pedreira Central CALTRANS AMP 55/75-E.....	139
Figura 3.11: Graduação da mistura Pedreira Central Tennessee AMP 55/75-E.....	140
Figura 3.12: Graduação da mistura Pedreira Tibagi CALTRANS AMP 55/75-E.....	141
Figura 3.13: Graduação da mistura Pedreira Tibagi Tennessee AMP 55/75-E.....	142
Figura 3.14: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 1 - Pedreira Basalto, Faixa CALTRANS com CAP 50/70.....	144
Figura 3.15: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 2 - Pedreira Basalto, Faixa Tennessee com CAP 50/70.....	145
Figura 3.16: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 3 - Pedreira Central, Faixa CALTRANS com CAP 50/70.....	146
Figura 3.17: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 4 - Pedreira Central, Faixa Tennessee com CAP 50/70.....	147
Figura 3.18: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 5 - Pedreira Tibagi, Faixa CALTRANS com CAP 50/70.....	148
Figura 3.19: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 6 - Pedreira Tibagi, Faixa Tennessee com CAP 50/70.....	149
Figura 3.20: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 7 - Pedreira Basalto, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E.....	150
Figura 3.21: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 8 - Pedreira Basalto, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E.....	151
Figura 3.22: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 9 - Pedreira Central, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E.....	152
Figura 3.23: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 10 - Pedreira Central, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E.....	153
Figura 3.24: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 11 - Pedreira Tibagi, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E.....	154
Figura 3.25: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 12 - Pedreira Tibagi, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E.....	155
Figura 3.26: Telas metálicas de abertura 6,30 mm e 2,3 mm.....	158
Figura 3.27: Sensibilidade ao escorrimento (%) x teor de ligante (%) – Pedreira Central – Faixa CALTRANS.....	158

Figura 3.28: Sensibilidade ao escorrimento (%) x teor de ligante (%)– Pedreira Central – Faixa Tennessee.....	159
Figura 3.29: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Basalto -faixa CALTRANS.....	162
Figura 3.30: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Basalto - faixa Tennessee.....	162
Figura 3.31: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Central -faixa CALTRANS.....	163
Figura 3.32: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Central -faixa Tennessee.....	163
Figura 3.33: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Tibagi -faixa CALTRANS.....	164
Figura 3.34: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Tibagi -faixa Tennessee.....	164
Figura 3.35: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de ligante (%) -pedreira Basalto -faixa CALTRANS.....	165
Figura 3.36: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de ligante (%) -pedreira Basalto -faixa Tennessee.....	165
Figura 3.37: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de ligante(%) - pedreira Central -faixa CALTRANS.....	166
Figura 3.38: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de Ligante (%) - pedreira Central -faixa Tennessee.....	166
Figura 3.39: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de Ligante (%) -pedreira Tibagi -faixa CALTRANS.....	167
Figura 3.40: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de Ligante (%) -pedreira Tibagi -faixa Tennessee.....	167
Figura 3.41: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) pedreira Basalto -faixa CALTRANS.....	170
Figura 3.42: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - pedreira Basalto -faixa Tennessee.....	170
Figura 3.43: Dano por umidade induzida- RRT (%) em função do teor de ligante (%) - pedreira Central -faixa CALTRANS.....	171
Figura 3.44: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - pedreira Central -faixa Tennessee.....	171



Figura 3.45: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - pedreira Tibagi -faixa CALTRANS.....	172
Figura 3.46: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - pedreira Tibagi -faixa Tennessee.....	172
Figura 3.47: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Basalto – faixa 9,5mm CALTRANS.....	175
Figura 3.48: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Basalto – faixa 9,5mm CALTRANS.....	176
Figura 3.49: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Basalto – faixa 1/4” tipo “A” Tennessee.....	176
Figura 3.50: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Basalto – faixa 1/4” tipo “A” Tennessee.....	177
Figura 3.51: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Central – faixa 9,5mm CALTRANS.....	177
Figura 3.52: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Central – faixa 9,5mm CALTRANS.....	178
Figura 3.53: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Central – faixa 1/4” tipo “A” Tennessee.....	178
Figura 3.54: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Central – faixa 1/4” tipo “A” Tennessee.....	179
Figura 3.55: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Tibagi – faixa 9,5mm CALTRANS.....	179
Figura 3.56: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Tibagi - faixa 9,5mm CALTRANS.....	180
Figura 3.57: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Tibagi - faixa 1/4” tipo “A” Tennessee.....	180
Figura 3.58: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Tibagi - faixa 1/4” tipo “A” Tennessee.....	181
Figura 3.59: Mesa compactadora tipo LPC ( <i>Laboratoire Ponts Chaussées</i> ).....	183
Figura 3.60: Simulador de tráfego tipo LPC ( <i>Laboratoire Ponts Chaussées</i> ).....	184
Figura 3.61: Placa da mistura experimental tipo RAUD – Pedreira Central.....	185
Figura 3.62: Deformação permanente - n° de ciclos x afundamento (%) – Pedreira Central – AMP55/75-E – teor 5,5% temp. de ensaio = 60°C.....	186
Figura 4.1: Mapa de localização do trecho experimental.....	193

Figura 4.2 a: Detalhe das seções-tipo do trecho experimental com suas respectivas espessuras – sessão de controle.....	194
Figura 4.2 b: Detalhe das seções-tipo do trecho experimental com suas respectivas espessuras – sessão experimental.....	195
Figura 4.3: Condições climáticas – temperaturas do ar e índices pluviométricos do trecho experimental.....	198
Figura 4.4: Temperaturas máximas e mínimas do pavimento do trecho experimental.....	200
Figura 4.5: Graduação da mistura de agregados –Projeto Calógeras RAUD.....	204
Figura 4.6: Graduação da mistura de agregados – Projeto Calógeras CA.....	205
Figura 4.7: Parâmetros do estudo Marshall – Projeto Calógeras RAUD.....	208
Figura 4.8: Parâmetros do estudo Marshall – Projeto Calógeras CA.....	209
Figura 4.9: Sensibilidade ao escorrimento (%) x teor de ligante (%) – Projeto RAUD.....	210
Figura 4.10: Resistência à tração via seco, via úmida e razão de resistência à tração retida (RRT) para diversos teores de ligante .....	212
Figura 4.11: Avaliação da resistência à Tração a 25°C via seco (MPa) x teor de Ligante (%) para o projeto Calógeras RAUD e CA.....	212
Figura 4.12: Desgaste Cantabro via seco e via úmida – Projeto Calógeras RAUD.....	213
Figura 4.13 (a) Projeto RAUD – 5,5% de AMP 55/75-E.....	216
Figura 4.13 (b): Projeto RAUD – 5,0% de AMP 55/75 – E.....	216
Figura 4.14 (a): Avaliação da durabilidade da macrotextura – placa virgem.....	217
Figura 4.14 (b): Avaliação da durabilidade da macrotextura – placa após 3.000 ciclos.....	217
Figura 4.15: Deformação permanente (%) no teor de 5,5% de AMP55/75-E.....	217
Figura 4.16: Deformação permanente (%) no teor de 5,0% de AMP 55/75-E.....	218
Figura 4.17: Deformação permanente (%) do CA no teor de 4,6% de AMP 55/75-E.....	219
Figura 4.18: Usina de asfalto - MAGNUM 80.....	224
Figura 4.19: Acabadora para espalhamento da mistura asfáltica.....	224
Figura 4.20: Rolo liso duplo tandem.....	225
Figura 4.20 a: Execução da camada impermeabilizante e de ligação (membrana elástica) - aplicação da emulsão elastomérica.....	226

Figura 4.21 b: Execução da camada impermeabilizante e de ligação (membrana elástica) - aplicação do agregado de graduação 4/6 mm.....	226
Figura 4.22: Temperatura de usinagem da mistura asfáltica.....	227
Figura 4.23: Temperatura média de distribuição da mistura asfáltica .....	228
Figura 4.24 a: Detalhes da espessura e textura superficial do RAUD- espessura final da camada.....	229
Figura 4.24 b: Detalhes da espessura e textura superficial do RAUD- textura superficial da camada.....	229
Figura 4.25: Detalhe da rolagem da mistura imediatamente atrás da acabadora.....	231
Figura 4.26 a: Aspecto final da rodovia após a sinalização horizontal do RAUD– pista seca.....	232
Figura 4.26 b: Aspecto final da rodovia após a sinalização horizontal do RAUD – pista úmida.....	232
Figura 4.27 a: Extração por sonda rotativa e CPs da pista experimental- extração de CPs por sonda rotativa.....	236
Figura 4.27 b: Extração por sonda rotativa e CPs da pista experimental – detalhes dos CPs do CA (à esquerda) e do RAUD (à direita).....	236
Figura 4.28: Determinação da densidade de referência da seção-teste (RAUD) através do densímetro eletromagnético.....	237
Figura 4.29: Detalhe da textura da superfície na junta transversal.....	246
Figura 4.30: Avaliação deflectométrica comparativa da seção-teste x seção de controle.....	247
Figura 4.31: Avaliação deflectométrica de campo com a viga Benkelman.....	247
Figura 4.32: Detalhe da execução dos ensaios de macrotextura/mancha de areia, microtextura/pêndulo britânico e drenabilidade na seção-teste (RAUD) do trecho experimental.....	250
Figura 4.33: Avaliação de macrotextura/mancha de areia para o RAUD e o CA.....	251
Figura 4.34: Avaliação da drenabilidade para o RAUD e o CA.....	252
Figura 4.35: Avaliação da microtextura/pêndulo Britânico entre o RAUD e o CA.....	253
Figura 4.36: Avaliação do IFI F60 entre o RAUD e o CA.....	255
Figura 4.37: Avaliação da pressão sonora entre o RAUD e o CA.....	257
Figura 4.37: Detalhe do equipamento utilizado para a medição do ruído - metodologia ISO 11819-1 ( <i>Statistical Pass-By Index</i> ).....	258

Figura 4.98 a: Correlações entre drenabilidade e micro / macrotextura superficial - drenabilidade x microtextura.....	258
Figura 4.98 b: Correlações entre drenabilidade e micro / macrotextura superficial - drenabilidade x macrotextura.....	258
Figura 4.40: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do RAUD – trecho Norte.....	259
Figura 4.41: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do RAUD – trecho Sul.....	259
Figura 4.42: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do CA – trecho Norte.....	260
Figura 4.43: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do CA – trecho Sul.....	260

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Faixas granulométricas de agregados.....	44
Tabela 2.2: Parâmetros de dosagem - concreto asfáltico segundo DNIT.....	45
Tabela 2.3: Parâmetros de dosagem – concreto asfáltico segundo OHL.....	45
Tabela 2.4: Faixas granulométricas e consumo teórico de materiais.....	47
Tabela 2.5: Requisitos do projeto e dosagem do MRAF.....	48
Tabela 2.6: Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da CPA – DNER-ES – 386/99.....	51
Tabela 2.7: Definição da fração do agregado graúdo.....	53
Tabela 2.8: Faixas granulométricas para misturas asfálticas tipo SMA.....	55
Tabela 2.9: Requisitos para o Projeto de Misturas SMA.....	55
Tabela 2.10: Faixas granulométricas – Micro-aglomerados em quente.....	57
Tabela 2.11: Graduação descontínua “ <i>gap-graded</i> ” para mistura com asfalto-borracha.....	59
Tabela 2.12: Requisitos técnicos para a dosagem da mistura gap-graded com asfalto-borracha.....	60
Tabela 2.13: Níveis de dosagem, equipamentos de laboratório e requisitos técnicos para as misturas asfálticas francesas.....	62
Tabela 2.14: Composições típicas de BBTM.....	64
Tabela 2.15: Requisitos técnicos para o teor de vazios e características mecânicas do BBTM.....	66
Tabela 2.16: Composições típicas de BBUM.....	71
Tabela 2.17: Propriedades dos agregados.....	78
Tabela 2.18: Características dos agregados graúdos.....	78
Tabela 2.19: Características dos agregados miúdos.....	78
Tabela 2.20: Características da emulsão asfáltica.....	79
Tabela 2.21: Características da emulsão asfáltica.....	80
Tabela 2.22: Faixas granulométricas para o RAUD.....	80
Tabela 2.23: Graduação faixa CALTRANS 12,5 mm.....	81

Tabela 2.24: Graduação faixa CALTRANS 9,5 mm.....	81
Tabela 2.25: Graduação dos agregados faixa Tennessee.....	84
Tabela 2.26: Fatores de área superficial.....	85
Tabela 2.27: Características e valores limites a serem verificados no teor de ligante de projeto do RAUD.....	86
Tabela 2.28: Avaliação da macrotextura pelo método da mancha de areia.....	94
Tabela 2.29: Avaliação da microtextura pelo método do pêndulo britânico.....	95
Tabela 2.30: Avaliação do IFI.....	98
Tabela 2.31: Quantidade de veículos por categoria para a medição de ruído.....	103
Tabela 2.32: Velocidades de referência e peso dos fatores.....	103
Tabela 2.33: Cimentos asfálticos de petróleo – CAP – classificação por penetração.....	111
Tabela 2.34: Classificação para asfaltos modificados por polímeros elastoméricos (AMP-E).....	113
Tabela 2.35: Especificações brasileiras para as emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos.....	115
Tabela 3.1: Projetos de estudo do RAUD.....	119
Tabela 3.2: Caracterização do cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70.....	122
Tabela 3.3: Caracterização do asfalto modificado por polímeros elastoméricos - AMP 55/75-E.....	122
Tabela 3.4: Caracterização da emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos - RR1C-E.....	123
Tabela 3.5: Faixas de viscosidades e temperaturas para os ligantes asfálticos tipo CAP 50/70 e AMP 55/75-E.....	123
Tabela 3.6: Propriedades técnicas do Compadope AP.....	125
Tabela 3.7: Procedência, natureza e composição dos materiais das misturas estudadas .....	126
Tabela 3.8: Procedência, natureza e composição dos materiais das misturas estudadas.....	126
Tabela 3.9 Caracterização dos agregados.....	126
Tabela 3.10: Densidade da mistura de agregados.....	129
Tabela 3.11: Graduação dos Agregados Projeto 1 - Pedreira Basalto CALTRANS CAP 50-70.....	130

Tabela 3.12: Graduação dos Agregados Projeto 2 - Pedreira Basalto Tennessee CAP 50-70.....	131
Tabela 3.13: Graduação dos Agregados Projeto 3 - Pedreira Central CALTRANS CAP 50-70.....	132
Tabela 3.14: Graduação dos Agregados Projeto 4 - Pedreira Central Tennessee CAP 50-70.....	133
Tabela 3.15: Graduação dos Agregados Projeto 5 - Pedreira Tibagi CALTRANS CAP 50-70.....	134
Tabela 3.16: Graduação dos Agregados Projeto 6 - Pedreira Tibagi Tennessee CAP 50-70.....	135
Tabela 3.17: Graduação dos Agregados Projeto 7 - Pedreira Basalto CALTRANS AMP 55/75 E.....	136
Tabela 3.18: Graduação dos Agregados Projeto 8 - Pedreira Basalto Tennessee AMP 55/75 E.....	137
Tabela 3.19: Graduação dos Agregados Projeto 9 - Pedreira Central CALTRANS AMP 55/75 E.....	138
Tabela 3.20: Graduação dos Agregados Projeto 10 - Pedreira Central Tennessee AMP 55/75 E.....	139
Tabela 3.21: Graduação dos Agregados Projeto 11 - Pedreira Tibagi CALTRANS AMP 55/75 E.....	140
Tabela 3.22: Graduação dos Agregados Projeto 12 - Pedreira Tibagi Tennessee AMP 55/75 E.....	141
Tabela 3.23: Avaliação da existência do contato grão-grão das misturas asfálticas nos teores de ligante de projeto do RAUD.....	156
Tabela 3.24: Composição da mistura experimental tipo BBUM .....	182
Tabela 3.25: Valores de deformação permanente para 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos.....	186
Tabela 3.26: Resultados dos estudos de dosagem das misturas asfálticas.....	188
Tabela 4.1. Projeção do número equivalente de operações do eixo padrão.....	197
Tabela 4.2: Procedência, natureza e composição dos materiais das misturas asfálticas.....	202
Tabela 4.3: Caracterização dos agregados.....	202
Tabela 4.4: Densidade da mistura de agregados para o RAUD e CA.....	203
Tabela 4.5: Graduação da mistura de agregados – projeto RAUD.....	204

Tabela 4.6: Graduação da mistura de agregados – projeto CA.....	205
Tabela 4.7: Verificação do contato grão-grão da mistura asfáltica no teor de ligante de projeto RAUD - Pedreira Calógeras .....	209
Tabela 4.8: Composição da mistura asfáltica.....	214
Tabela 4.9: Valores de deformação permanente para 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos.....	217
Tabela 4.10: Avaliação da durabilidade da macrotextura no simulador de tráfego em placas moldadas no teor de 5,0 % de AMP 55/75-E.....	218
Tabela 4.11: Propriedades finais da mistura asfáltica – projeto RAUD.....	221
Tabela 4.12: Propriedades finais da mistura asfáltica - projeto CA.....	222
Tabela 4.13: Plano de controle para o ligante asfáltico AMP 55/75-E.....	237
Tabela 4.14: Plano de controle para a emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos - RR1C-E .....	238
Tabela 4.15: Plano de controle para o agregado.....	238
Tabela 4.16: Plano de controle para as temperaturas da massa asfáltica.....	238
Tabela 4.17: Plano de controle para a massa asfáltica – execução.....	239
Tabela 4.18: Plano de controle para a massa asfáltica – pista.....	239
Tabela 4.19: Controle tecnológico – RAUD (sentido Sul).....	240
Tabela 4.20: Controle tecnológico – RAUD (sentido Norte).....	241
Tabela 4.21: Controle tecnológico – CA (sentido Sul).....	242
Tabela 4.22: Controle tecnológico – CA (sentido Norte ).....	243
Tabela 4.23: Resultados comparativos do levantamento deflectométrico.....	248
Tabela 4.24: Determinação de Afundamentos em trilha de roda.....	249



## LISTA DE ABREVIATURAS

AIPCR: *Association Internationale Permanente des Congrès de La Route*

AMO: Aditivos Orgânicos Melhoradores de Adesividade

AMP 55/75-E: *Compaflex 55/75-E*

ANFAVEA: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BBTM: *Béton Bitumineux Très Mince*

BBUM: *Béton Bitumineux Ultra-Mince*

BPN: *British Pendulum Number*

BRIC: Brasil, Índia, Rússia e China

CA: Concreto Asfáltico

CALTRANS: Departamento de Transportes da Califórnia

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CNT: Confederação Nacional do Transporte

CPA: Camada Porosa de Atrito

DENATRAN: Departamento Nacional de Trânsito

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DPRF: Departamento de Polícia Rodoviária Federal

EME: *Enrobés à Module Elevé*

EPA: *Environmental Protection Agency*

FMI: Fundo Monetário Internacional

GG: *Gap-Graded*

HS : *Hauter au Sable* - Altura Média de Areia

IDH: Índice de Desenvolvimento Humano

IPEA: Pesquisa Econômica Aplicada

ISSA: *International Slurry Surfacing Association*

ISETH - *Institute for Highway, Railroads and Rock Engineering*

IFI: *International Friction Index*

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LWT: *Loaded Wheel Tester*

MRAF: *Microrrevestimento Asfáltico a Frio*

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*

NAPA: *National Asphalt Pavement Association*

OGFC: *Open Graded Friction Courses*

PIB: *Produto Interno Bruto*

PAC: *Programa de Aceleração do Crescimento*

PIRE: *Pacific Institute for Research and Evaluation*

PCG: *Prensa de Compactação e Cisalhamento Giratório*

SMA: *StoneMatrix Asphalt*

sp: *Speed Number*

SPB: *Statistical Pass-By Method*

SPBI: *Statistical Pass – By Index*

SUPERPAVE: *Superior Performance Asphalt Pavements*

SBR: *Látex de Estireno-Butadieno*

SBS: *Estireno-Butadieno-Estireno*

TDOT: *Departamento de Transportes do Tennessee*

TxDOT: *Departamentos de Transportes do Texas*

UNCTAD: *Conferência das Nações Unidas para o Comércio e Desenvolvimento*

VAM: *Vazios do Agregado Mineral*

VCA<sub>MIX</sub>: *Vazios da Fração Graúda do Agregado na Mistura Compactada*

VCA<sub>DRC</sub>: *Vazios da Fração Graúda do Agregado Compactado*

VRD: *Valor de Resistência à Derrapagem (Pêndulo Britânico)*

WMA: *Warm Mix Asphalt*

WTAT: *Perda por Abrasão Úmida*

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto maior do mundo em termos de área territorial (8,514 milhões de km<sup>2</sup>) e em população, com 190,73 milhões de habitantes distribuídos em um território heterogêneo, com locais muitas vezes de difícil acesso, e equivalente a quase metade do continente sul-americano (IBGE, 2010). Segundo estimativas do Fundo Monetário Internacional (FMI) (2009), o Brasil representa a maior economia da América Latina e a 64<sup>a</sup> posição em renda *per capita* no mundo (US\$ 10.456).

Os prognósticos econômicos indicam ainda que até 2020 o PIB do grupo de sete maiores emergentes, conhecido como E-7 e formado pela China, Índia, Brasil, Rússia, México, Indonésia e Turquia, será maior que o do G-7, formado pelos principais países industrializados e mais desenvolvidos economicamente do mundo: Estados Unidos, Japão, Alemanha, Reino Unido, França, Itália e o Canadá. Cinco das dez maiores economias, até 2030, serão países hoje tidos como emergentes.

Para consolidar essa posição invejável no contexto mundial o Brasil deverá adotar políticas de desenvolvimento sustentável, visto que tais valores macroeconômicos, referentes a um país tão grande, ainda mascaram as enormes disparidades sociais e econômicas entre suas regiões. Entre outras medidas socioeconômicas a serem implementadas, o governo necessita promover e/ou incentivar investimentos continuados em infraestrutura de transportes para manter e ampliar a malha rodoviária federal, estadual e municipal.

O setor de transporte no Brasil é predominantemente rodoviário, movimentando 61,2% do volume de cargas transportadas e 94% dos passageiros (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, CNT, 2005, 2010), o que somado representa 75% do PIB brasileiro. O investimento em termos de infraestrutura construída representa cerca de US\$ 300 bilhões, dos quais US\$ 150 bilhões correspondem à malha federal.

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2010), esse modal responde por mais de 70% das cargas gerais, excluindo o transporte do minério de ferro que ocorre por ferrovia. Esta situação demonstra a grande importância do transporte rodoviário para o desenvolvimento econômico do país e sua dependência excessiva em relação às rodovias.

Ainda, conforme o mesmo instituto, essa dependência das rodovias é maior no setor agrícola, no recebimento dos insumos e no escoamento da produção, para o mercado interno e para a exportação. A eficiência do setor de transportes rodoviário, também reflete diretamente na inflação do país, visto que o item alimentação corresponde, aproximadamente, a 40% desse índice.

Além de ser infraestrutura, uma rodovia é também segurança, conforto e fator para alavancagem da economia como um todo. Uma rodovia mal conservada é sinônimo de maior tempo para o transporte, maior custo com a manutenção dos veículos e desperdícios de mercadorias perecíveis, que acarretam um aumento no custo do frete. Além disso, rodovias danificadas geram um aumento na emissão de poluentes e propiciam acidentes, aumentando as despesas hospitalares.

Estudos da União Nacional da Construção (2006) indicam que o desenvolvimento da infraestrutura é essencial na determinação do nível de renda per capita de um país. Isso se deve essencialmente ao aumento da produtividade que se observa quando as empresas e trabalhadores têm à sua disposição uma malha rodoviária maior e melhor.

Segundo dados publicados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2010), dos 1,712 milhões de quilômetros de rodovias brasileiras, apenas 11,44% são pavimentados (195,7 mil quilômetros). No que tange aos municípios do Brasil, que correspondem a 78,21% de toda a malha rodoviária (1,31 milhões de quilômetros), o inexpressivo montante de aproximadamente 2,0% (26,82 mil quilômetros) encontra-se pavimentado.

Em uma nação com características continentais como as do Brasil, a necessidade de rodovias é particularmente grande, entretanto, a história das rodovias modernas no país começa apenas no final dos anos 1940, com a criação do Fundo Rodoviário Nacional obtido através da receita de impostos dos usuários. Como consequência, o transporte rodoviário e as rodovias tiveram um forte incentivo nos anos subsequentes tornando-se dois importantes ingredientes de uma estratégia de crescimento bem sucedida.

Segundo a Secretaria Nacional de Política de Transportes (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2006), com a extinção do Fundo Rodoviário Nacional em 1988 e a reforma fiscal, os investimentos anuais caíram de 1,8% do PIB em 1976, para cerca de 0,2% do PIB

no período 1990-2004 e para 0,4% do PIB no período 2005-2007 (IPEA, 2010), conforme pode ser observado na Figura 1.1.

O baixo nível de recursos para a pavimentação rodoviária nas décadas passadas levou a crescente degradação da infraestrutura, com deterioração das condições operacionais (aumento do número de acidentes e perda energética elevada), insuficiência de capacidade nas regiões desenvolvidas e extensão inadequada da malha nas regiões com potencialidade de desenvolvimento. O tráfego também se tornou mais intenso do que o previsto e as cargas por eixo, frequentemente, ultrapassam a capacidade para as quais foram projetados os pavimentos.

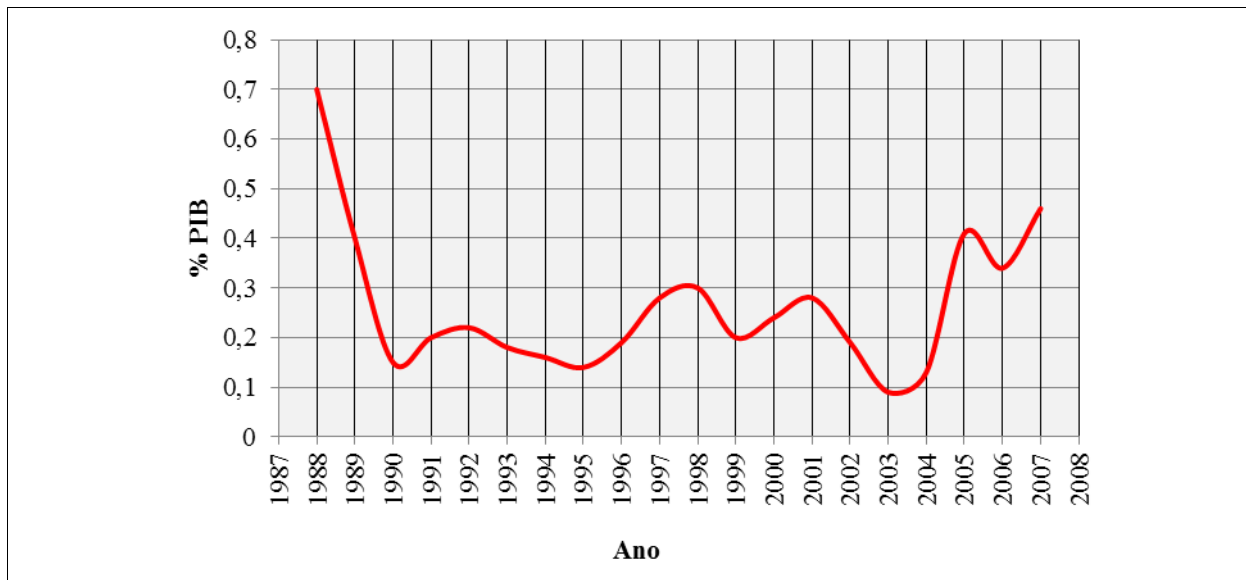


Figura 1.1: Investimento do setor de transportes nas últimas décadas. Fonte: (IPEA, 2010).

Porém, nos últimos 5 anos houve uma melhoria significativa na infraestrutura, resultado do aumento dos investimentos. De 2007 a agosto de 2010, foram aplicados R\$ 27,71 bilhões na área de transportes, enquanto entre 1999 a 2002 foram R\$ 4,15 bilhões (CNT, 2010). Embora os investimentos públicos em rodovias venham aumentando, eles ainda são insuficientes frente às necessidades de adequação e ampliação da malha rodoviária. O IPEA (2010), órgão ligado ao Ministério do Planejamento, estima que só o setor rodoviário demandaria R\$ 183,5 bilhões em investimentos para corrigir as deficiências, sendo que R\$ 144 bilhões deveriam ser aplicados em recuperação, adequação e duplicação de trechos, R\$ 38,5 bilhões em construção e pavimentação e outros R\$ 830 milhões em obras especiais.

Conforme estudo realizado pela organização *Pacific Institute for Research and Evaluation* – PIRE (2009), renomada ONG norte-americana que pesquisa há mais de 30 anos aspectos relacionados à saúde e segurança no trânsito, para o Departamento de Transportes dos Estados Unidos, mais de 50% das fatalidades (total geral de 44000 mortes por ano) e 38% dos feridos no trânsito estão relacionados às condições deficientes das rodovias norte-americanas em termos de qualidade (baixa serventia) e quantidade (congestionamentos). A condição inadequada da rodovia é mais letal que as estatísticas relacionadas aos motoristas alcoolizados, em alta velocidade ou sem cinto de segurança. Segundo o estudo, a condição da rodovia é o fator de maior contribuição para as mais de 22000 fatalidades anuais, e custos correspondentes a US\$ 217 bilhões (valor 3,5 vezes maior que o investimento anual do governo norte-americano na infraestrutura rodoviária). Os autores concluem que rodovias mais seguras são essenciais para reduzir os 5,3 milhões de acidentes que ocorrem por ano nos EUA, salvar milhares de vidas e bilhões de dólares em custos decorrentes dos acidentes rodoviários.

Em 2009 no Brasil, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT e o Departamento de Polícia Rodoviária Federal (DPRF) (CREDENDIO, 2010), 7.383 pessoas perderam a vida e 93.861 ficaram feridos em acidentes nas estradas federais. Segundo estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2006) são, em média, 300 acidentes diários nas rodovias federais brasileiras, com cerca de 1200 pessoas envolvidas, e cerca de 28 mortos por dia. No ano de 2004, somente em sete Estados do Brasil (CE, DF, ES, PR, RS, SP e SC) ocorreram cerca de 300 acidentes com 13 mortes em média, por dia, nas rodovias estaduais. Nas rodovias municipais e vias urbanas são cerca de 20 mil fatalidades por ano ou quase 55 em média, por dia. Ainda conforme o estudo, de cada 25 brasileiros que morrem, um perde a vida no trânsito. São, em média, 96 mortos por dia, 35 mil por ano.

A má conservação da rodovia, a imprudência e a impunidade dos infratores fazem das estradas palco de uma calamidade social. Além dos gastos nos sistemas de saúde, principalmente hospitais e de óbitos, os acidentes rodoviários também geram atrasos ou mesmo cancelamento na entrega de cargas e elevação dos custos operacionais das empresas.

As estatísticas de fatalidades no trânsito mostram a dimensão dessa “epidemia social” e a premente necessidade de adoção de políticas públicas que estimulem investimentos no

transporte rodoviário do país para a redução da gravidade dos acidentes, dos impactos socioeconômicos e ambientais do setor.

Segundo o GEIPOT (1982), a conservação e restauração rodoviária também se inter-relacionam com o meio ambiente, nos seguintes aspectos:

- a) quando é deficiente, ocasionam problemas para o tráfego, que gera mais ruído, vibrações indesejáveis, maiores emissões de gases e de partículas sólidas, além de maior perda de combustíveis e de energia contida nas peças, pneus, chassis e carrocerias dos próprios veículos, submetidos a condições severas de uso;
- b) quando é feita sem cuidados ambientais, ocasionam problemas com as usinas de asfalto e o consumo exagerado de materiais de construção, cada vez mais raros e caros, rompimento de sistemas de drenagem, erosões, etc.

De acordo com dados do relatório anual da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2010), o Brasil possui a oitava maior frota mundial de veículos automotivos e o quinto maior mercado mundial em vendas, atrás apenas da China, EUA, Japão e Alemanha. O PIB da indústria automotiva, incluindo o setor de autopeças, corresponde a cerca de um quarto do PIB industrial brasileiro.

Conforme registros publicados pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2010), o número total de veículos no país, entre caminhões, carros e motos, mais que dobrou nos últimos dez anos (119%) e atingiu quase 60 milhões de veículos. Ou seja, o país tem, em média, um veículo para cada 3 habitantes.

Em geral, os novos modelos de veículos lançados no mercado tendem a ser mais evoluídos tecnicamente, mais seguros, estáveis e silenciosos, induzindo os motoristas a praticar velocidades cada vez mais elevadas que, em conjunto com o número crescente de veículos em circulação, aumentam a probabilidade de ocorrência de acidentes no trânsito.

Também a indústria desenvolve caminhões com capacidade de carga cada vez maior, que trafegam muitas vezes com peso excedendo a capacidade suportada pelas rodovias, comprometendo a competitividade do setor de transportes, o desenvolvimento econômico do país e a segurança dos usuários. Conforme levantamento de registros de caminhões novos

realizado pela ANFAVEA (2010), no período 2002-2009 houve um aumento de quase 35% no licenciamento de caminhões novos pesados e semipesados, com peso produto total (PBT) superior a 15 toneladas, e um decréscimo de aproximadamente 28% de caminhões novos médios. Segundo o estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2006), aproximadamente 28% dos acidentes de trânsito nas rodovias federais envolvem veículos de carga (caminhões).

Os acidentes rodoviários resultam de uma combinação de quatro fatores, onde frequentemente dois ou mais deles estão envolvidos: o motorista, devido ao seu comportamento; o veículo, de acordo com suas características; as condições do meio ambiente e a qualidade da via. (IVEY; GALLAWAY, 1973, *apud* APS, 2006).

Para a prevenção de acidentes, a melhoria das condições de segurança viária, pode resultar em uma ação mais rápida e eficaz que a conscientização de milhões de usuários das rodovias em relação ao seu comportamento e atitudes no trânsito. Entre outras medidas de simples implementação para aumentar as condições de segurança, pode-se citar: alargamento de faixas de acostamentos, eliminação de degraus, buracos e afundamentos de trilhas de roda, sinalização horizontal e vertical mais durável, utilização de mais defensas, quando apropriadas, melhoria das condições de aderência pneu-pavimento e de drenagem da água superficial para prevenir acidentes por derrapagem (hidroplanagem).

Segundo Walmbold (1986, *apud* Aps, 2006), pesquisas realizadas pelo Comitê Nacional de Segurança de Transportes, nos EUA, demonstraram que a frequência de acidentes em pistas molhadas é quatro vezes superior àquela que ocorre em pista seca. Ainda segundo os mesmos autores, com base em 500 casos de acidentes analisados, todos em pistas molhadas, as seguintes evidências foram relacionadas: os pavimentos nos locais dos acidentes apresentaram textura superficial polida; as profundidades dos sulcos dos pneus eram pequenas (elevado desgaste); os valores dos coeficientes de atrito nos locais de acidentes eram baixos e as velocidades dos veículos imediatamente antes dos acidentes eram altas.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS DA PESQUISA

Verifica-se que os países que apresentam os melhores indicadores em relação ao desenvolvimento sustentável e de redução dos acidentes no trânsito são, também, os que priorizam ações e ostentam as melhores condições de infraestrutura de transporte.



O revestimento asfáltico é a camada mais nobre do pavimento que receberá diretamente os esforços normais e tangenciais aplicados pelas rodas dos veículos. O revestimento deve ter um bom desempenho mecânico, na compressão e nas flexões sofridas pela estrutura. Essa camada de rolamento deve reduzir os esforços atuantes sobre as camadas subjacentes; ter resistência ao desgaste (polimento) e à perda dos materiais constituintes (agregados e ligante asfáltico); ser suficientemente impermeável para proteção da infraestrutura, além de apresentar regularidade superficial (conforto ao usuário) e características antiderrapantes para minimizar os riscos de hidroplanagem em períodos chuvosos,

A interação do comportamento do motorista, veículo, meio ambiente e de estradas inadequadas, mal sinalizadas e congestionadas, criam as condições propícias para que ocorram os acidentes de trânsito. Além disso, uma estrada mal conservada representa fator certo de agravamento dos efeitos do acidente. A preservação das características de superfície, através de bons níveis de resistência à derrapagem e a hidroplanagem (textura superficial), contribuem para a segurança da via.

Iniciativas para o desenvolvimento de tecnologias de pavimentação asfáltica de melhor desempenho, que não requeiram intervenções frequentes de elevado custo e proporcionem a melhoria da qualidade, segurança, conforto e a expansão das condições da infraestrutura rodoviária são fundamentais para a redução do custo total do transporte e dos acidentes rodoviários. Adicionalmente, teremos um efeito multiplicador de dinamização das cadeias produtivas regionais e o aumento dos índices de desenvolvimento humano no país (IDH).

Nas duas últimas décadas houve por parte da administração privada de rodovias, um interesse crescente na avaliação e melhoria das características funcionais do pavimento, através do levantamento das condições de superfície e do emprego de revestimentos asfálticos antiderrapantes (microrrevestimento a frio, misturas drenantes e/ou descontínuas com ligantes modificados) para a camada de rolamento.

Entretanto, vale ressaltar que o bom desempenho de qualquer tipo de revestimento asfáltico está associado diretamente ao monitoramento sistemático das condições funcionais/estruturais do pavimento e à adoção do adequado tratamento de manutenção com relação ao seu estágio de deterioração em função do clima/tráfego atuante. Se a sua vida de serviço for ultrapassada sem que as devidas obras de restauração tenham sido realizadas, os defeitos/custos avançam e progridem de forma inexorável e as técnicas de conservação por mais sofisticadas e evoluídas

tecnologicamente, serão pouco eficazes para conferir sobrevida e/ou melhorar as condições de segurança da via.

Na prática, observam-se algumas limitações técnicas, operacionais e econômicas nos principais tipos de serviços asfálticos executados a quente e destinados à camada de rolamento em rodovias brasileiras sujeitas a tráfego intenso e pesado. Por exemplo:

- a) revestimentos de graduação densa com ligantes convencionais tendem, em algumas situações de tráfego e temperaturas elevados, a apresentar afundamentos em trilhas de roda, riscos de escorregamento sobre o suporte em pontos críticos e, em geral, apresentam textura superficial fina ou fechada que comprometem as condições de atrito e a segurança dos usuários;
- b) revestimentos drenantes do tipo Camada porosa de atrito (CPA) apresentam boas características de aderência e atrito superficial em pista molhada, mas devido a sua graduação aberta tende a colmatar seus vazios ao longo da vida de serviço e reduzir sua capacidade de percolação da lâmina de água superficial quando sujeita a tráfego intenso e canalizado. Também podem não apresentar desempenho satisfatório em áreas sujeitas a esforços cisalhantes de alta magnitude;
- c) revestimentos do tipo *Stone matrix asphalt* (SMA) conjugam alto desempenho mecânico e funcional, porém exigem agregados de alta qualidade com características e graduações distintas, que podem não ser facilmente encontrados próximos ao local da obra; também o seu emprego exige aditivos especiais (fíleres industriais e fibras), teores de ligante aproximadamente de 20 a 30% superiores em relação aos estabelecidos para o concreto asfáltico e devem ser produzidos em usinas de asfaltos com dispositivos adequados para a dosagem dos materiais do SMA. Em função do seu maior custo operacional essas misturas são, em geral, projetadas somente para trechos de rodovias sujeitas a tráfego pesado e que necessitam melhorias nas condições de atrito e segurança em pista molhada.

Portanto, o crescente aumento do volume e da carga de tráfego, bem como as restrições econômicas para investimentos em infraestrutura rodoviária desafiam os técnicos do setor à busca de novas soluções que visem a melhoria do desempenho das camadas dos pavimentos flexíveis e a redução de custos.

Dentre os aspectos de maior relevância, há a tendência internacional de se melhorar a resistência e a durabilidade dos revestimentos asfálticos frente à ação do clima e do tráfego, através do emprego de asfaltos modificados por polímeros. Esses ligantes, em geral, possibilitam a confecção de camadas asfálticas mais delgadas e que oferecem maior segurança, conforto para os usuários e redução de ruído, especialmente para a camada de rolamento em rodovias com elevado volume de tráfego e maior velocidade diretriz.

A concepção destas camadas especiais de “desgaste” tem como principal objetivo melhorar a textura superficial e a aderência no contato do pneu com a superfície, minimizando a aquaplanagem, o *spray* de água e os riscos de acidentes rodoviários em períodos de chuva intensa. Em função de suas características funcionais e construtivas, destaca-se neste cenário como alternativa técnica de boa relação de valor (desempenho/custo) o revestimento asfáltico ultra delgado.

O objetivo principal da presente pesquisa é estudar o desempenho do revestimento asfáltico ultra delgado, disponibilizando à engenharia rodoviária nacional uma nova tecnologia construtiva ou de manutenção asfáltica, durável e econômica, para a adequada proteção da estrutura do pavimento, bem como para a melhoria das suas condições funcionais de segurança, conforto ao rolamento e redução de ruído.

Para atender ao objetivo principal, busca-se maior conhecimento da qualidade dos materiais, procedimentos de dosagem, processo construtivo, equipamentos e controles tecnológicos, além da definição do campo de aplicação e limitações da técnica.

A partir da execução de um estudo comparativo de laboratório e de campo, entre o revestimento ultra delgado e o concreto asfáltico, ambos projetados com o mesmo tipo de ligante elastomérico, espera-se os seguintes objetivos específicos:

- a) comprovar a funcionalidade do revestimento asfáltico ultra delgado para correção das condições de superfície e reabilitação de pavimentos, sob tráfego rápido, intenso e pesado. Em outras palavras, objetiva-se demonstrar a resistência mecânica da mistura às cargas e aos danos por umidade induzida, características encontradas nos concretos asfálticos densos de boa qualidade, somadas à melhoria de suas características de conforto, redução de ruído e de aderência pneu-pavimento;

- b) estabelecer um método de laboratório próprio para o procedimento de dosagem do revestimento asfáltico ultra delgado, através de possíveis adaptações e/ou combinação dos procedimentos e ensaios usualmente empregados no país para as misturas asfálticas convencionais;
- c) avaliar eventuais necessidades de modificações nos procedimentos de operação das usinas de asfalto, equipamentos de espalhamento e compactação, bem como nos controles executivos desse serviço;
- d) avaliar eventuais necessidades de modificações nos métodos e/ou procedimentos usualmente utilizados para a determinação das condições de aderência, atrito e ruído ambiental do revestimento asfáltico.
- e) propor um procedimento executivo e de controle tecnológico para o revestimento asfáltico ultra delgado.

## 1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este estudo está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é abordada a importância da infraestrutura rodoviária no desenvolvimento socioeconômico do país, bem como aspectos relacionados à saúde, segurança, meio ambiente, ao crescimento da frota automotiva e dos acidentes de trânsito no Brasil. Também são apresentados as justificativas, os objetivos e a estrutura desta pesquisa.

O capítulo 2 é dedicado à revisão da literatura relatando estudos nacionais e internacionais relacionados ao projeto, utilização e experiência existente em relação às misturas asfálticas delgadas e ultra delgadas. Adicionalmente são feitas breves considerações a respeito da textura superficial dos revestimentos, em relação à redução do ruído causado pelo contato do pneu com a superfície e justificativas técnicas para a utilização de ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos.

O capítulo 3 discorre sobre o planejamento do programa de laboratório, a seleção e caracterização dos materiais, a metodologia empregada na caracterização e desenvolvimento do procedimento de dosagem, bem como os resultados e discussões da análise experimental de laboratório das misturas asfálticas estudadas para revestimento asfáltico ultra delgado.

O capítulo 4 contém a descrição e o planejamento do programa de campo, as características do trecho experimental, a seleção e caracterização dos materiais, os projetos de dosagem das misturas asfálticas, os procedimentos construtivos, os controles tecnológicos, o monitoramento dos índices funcionais da seção teste e de controle, bem como os resultados e discussões da análise experimental de campo.

O Capítulo 5 traz as conclusões e recomendações finais da pesquisa para estudos futuros e sugestões para utilização dessa tecnologia no Brasil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada superficial sobre a qual são exercidas diretamente as solicitações resultantes do tráfego e da ação do clima.

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento ou camada de rolamento misturas de agregados minerais e ligantes asfálticos com graduações e características próprias que, de forma adequadamente dosada e processada, garantam ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Além desses parâmetros técnicos, para um bom funcionamento da estrutura são necessárias as seguintes características de qualidade relativas ao contato pneu-pavimento:

- a) aderência satisfatória;
- b) boa drenabilidade;
- c) uniformidade;
- d) redução do ruído causado pelo contato do pneu com a superfície.

Os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico são atendidos a partir de um projeto de dosagem da mistura compatível com o dimensionamento estrutural das outras camadas do pavimento. Em geral no Brasil, a mistura asfáltica para o revestimento é colocada sobre uma capa de rolamento preexistente em concreto asfáltico ou sobre outra camada asfáltica, previamente executada. A finalidade dessa camada intermediária é proporcionar o suporte e o nivelamento adequados, bem como servir de ligação (*binder*) entre as outras camadas da estrutura e o revestimento.

A camada superficial do pavimento também pode estar apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos “*in natura*” e com a adição de agentes cimentantes (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As camadas de rolamento inicialmente com espessuras da ordem de 80 mm, progressivamente estão se tornando mais delgadas. Atualmente, são utilizadas em espessuras variando entre 50 a 25 mm podendo chegar a camadas menores que 20 mm (RGRA, 2005).

Muita atenção tem sido dada às características funcionais dos revestimentos asfálticos utilizados em pavimentação, isto é, busca-se projetar revestimentos que também atendam aos requisitos de ruído, textura, atrito e conforto ao rolamento. O ruído é preocupação de projetistas e usuários de rodovias. Diversos estudos têm sido desenvolvidos em todo o mundo, especialmente nos Estados Unidos e na Europa, buscando alternativas para melhorar o desempenho dos pavimentos em termos de conforto e nível de ruídos. O tipo de revestimento empregado é fundamental para as características superficiais do pavimento. Em geral, misturas asfálticas projetadas com agregados de diâmetro máximo reduzido, adequada graduação e macrotextura, formada pelos pequenos “canais” entre os agregados graúdos, geram uma superfície de rolamento que resultam em camadas delgadas de baixo nível de ruído e com eficiente drenabilidade da água em períodos de chuva.

Assim, nas últimas décadas, houve o desenvolvimento das técnicas de revestimentos delgados (espessuras inferiores a 40 mm), com o objetivo fundamental de proteger a estrutura do pavimento e garantir uma superfície de rolamento com condições adequadas de segurança e conforto. Entre os principais benefícios destas misturas é possível citar a melhor textura superficial, maior aderência, resistências à fadiga e à deformação permanente adequadas e maior durabilidade. Além disso, são recicláveis e apresentam baixo nível de ruído pneu-pavimento e maior drenabilidade. Em contrapartida, esses sistemas são mais sensíveis tanto à qualidade dos materiais quanto aos processos construtivos e não corrigem defeitos estruturais (BOLZÁN, 2001).

Os revestimentos delgados são concebidos para preservar e/ou melhorar a funcionalidade do pavimento. Esta técnica não tem o objetivo de melhorar estruturalmente o pavimento, mas proteger a estrutura garantindo uma superfície de rolamento segura, confortável e durável. Estas misturas são aplicadas fundamentalmente na manutenção preventiva dos pavimentos, isto é, em operações de manutenção em áreas em que o suporte apresenta-se íntegro e não

deformado. Considerando pavimentos com necessidade de reabilitação, uma camada de revestimento asfáltico delgada pode ser utilizada para ampliar a vida de serviço, aumentar a qualidade de rolamento, corrigir defeitos superficiais, melhorar as características de segurança e reduzir o ruído resultante do atrito pneu-pavimento (NAPA, 1996). As camadas delgadas também são aplicadas em pavimentos novos para prover as condições necessárias de segurança e conforto. São alternativas de revestimento asfáltico para estruturas projetadas segundo o conceito de “pavimento perpétuo” ou de alto desempenho, com período de projeto de 50 anos e renovação periódica somente da camada de rolamento.

O desenvolvimento tecnológico alcançado na atualidade pelos ligantes asfálticos e a possibilidade de modificação de ligantes convencionais através de aditivos químicos, principalmente polímeros, tem viabilizado o projeto e execução de estruturas de elevada durabilidade, pois garantem a produção de misturas asfálticas compatíveis com os requisitos de projeto. A proposta do “pavimento perpétuo” ou de alto desempenho prevê a execução de três camadas asfálticas assentes sobre a fundação do pavimento, como pode ser observado na Figura 2.1 (NEWCOMB; BUNCHER; HUDDLESTON, 2001).

O revestimento, constituído de mistura asfáltica resistente às deformações permanentes, tem papel funcional, garantindo conforto e segurança ao usuário, diminuindo a emissão de ruídos, aumentando a aderência pneu-pavimento e reduzindo o *spray* e a possibilidade de aquaplanagem em dias de chuva. As misturas asfálticas especiais de granulometria descontínua, tais como: *Stone matrix asphalt* (SMA), Camada porosa de atrito (CPA) ou *Béton Bitumineux Très Mince/Béton Bitumineux Ultra-Mince* (BBTM/BBUM), descritas nos tópicos posteriores, podem ser consideradas as mais adequadas para esta aplicação.

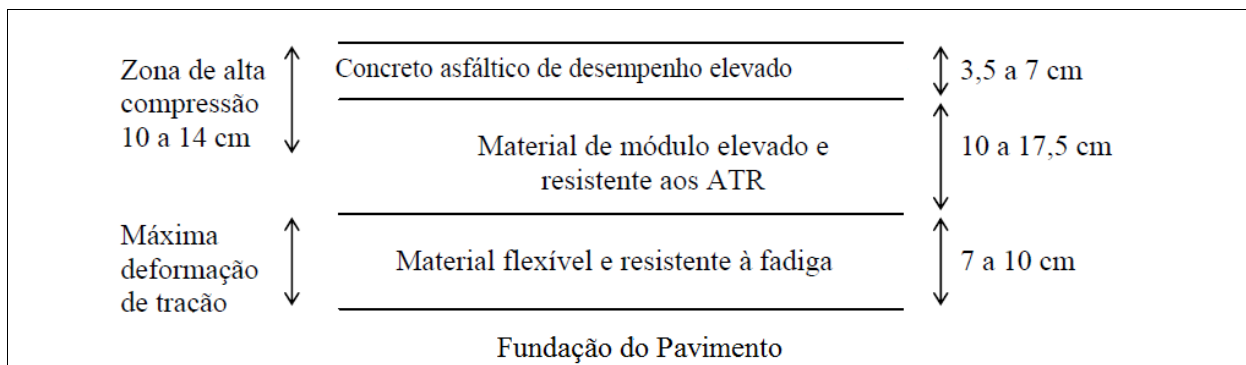


Figura 2.1: Estrutura de pavimento perpétuo. Baseado em: (NEWCOMB; BUNCHER; HUDDLESTON, 2001).



A camada intermediária do pavimento, constituída de mistura asfáltica de módulo elevado (*Enrobés à Module Elevé* - EME), de origem francesa, para bases asfálticas de alto módulo, é responsável pela resposta estrutural do pavimento, devendo proteger a camada de base para que esta resista aos esforços de fadiga; apresentar elevada resistência às deformações permanentes e possuir espessura suficiente para minimizar as deformações horizontais na sua fibra inferior assegurando estabilidade e vida de fadiga prolongada.

A camada de base do pavimento, ou camada inferior, é caracterizada por sua elevada resistência à fadiga, devendo resistir aos esforços de tração na flexão que ocorrem na fibra inferior da camada. É uma mistura de graduação densa e curva granulométrica contínua de elevada recuperação elástica, constituída por alto teor de ligante asfáltico modificado por polímeros, geralmente SBS (estireno-butadieno-estireno) e reduzido volume de vazios ( em geral, entre 2 a 3%), com boa flexibilidade e elevada durabilidade.

## 2.2 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DELGADOS

Em geral, os revestimentos delgados são constituídos por misturas asfálticas especiais produzidas sob altas temperaturas (misturas a quente), temperaturas intermediárias (misturas mornas ou semimornas tipo WMA) ou temperatura ambiente (misturas a frio). São destinadas à camada de rolamento de pavimentos sujeito a tráfego intenso e pesado, e aplicadas em espessuras inferiores a 40 mm. Destacam-se pelo seu uso corrente na França, Inglaterra, Alemanha, Espanha e EUA os revestimentos asfálticos delgados e ultra delgados, envolvendo o emprego de misturas com graduação descontínua. São exemplos típicos de misturas asfálticas delgadas produzidas e aplicadas a quente: o SMA (*Stone Matrix Asphalt*) na Alemanha; as faixas GG (*gap-graded*) e as OGFC (*Open Graded Friction Courses*) norte-americanas, também conhecida no Brasil por CPA (Camada Porosa de Atrito); os Micro Aglomerados *en Caliente* na Espanha e os revestimentos asfálticos muito delgados e ultra delgados franceses, tipo BBTM (*Béton Bitumineux Très Minces*) e BBUM (*Béton Bitumineux Ultra-Minces*). Como exemplo de revestimento asfáltico delgado, produzido e aplicado a frio, cita-se o microrrevestimento asfáltico (MRAF), em função de seu relevante emprego para a recuperação superficial imediata de rodovias e vias públicas sob administração pública e/ou privada do país.

Os revestimentos asfálticos delgados são empregados para melhorar as condições funcionais, sobre pavimentos que não requerem reabilitação estrutural. Para terem o desempenho adequado, os defeitos superficiais da estrutura devem estar limitados à camada de rolamento e necessitam ser removidos previamente através da operação de fresagem da estrutura danificada e posterior limpeza (NAPA, 2009).

As principais características que distinguem as misturas especiais em relação às convencionais são: agregados 100% britados de alta qualidade (resistência mecânica), fíleres industriais, ligantes asfálticos modificados e aditivos químicos e fibras, se previsto em projeto. Também podem ser caracterizadas quanto a sua graduação ou distribuição dos grãos (densas e abertas), forma da curva granulométrica (contínua, uniforme e descontínua), e finalidade a que se destinam.

As camadas delgadas possuem tamanho nominal máximo entre 4,75 e 12,7 mm (NAPA, 2009). O tamanho nominal máximo é definido como maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso. O tamanho máximo é a menor abertura de malha de peneira através da qual passam 100% das partículas de agregado (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O tamanho máximo do agregado e sua graduação são controlados por especificações que estabelecem a distribuição granulométrica a ser usada para uma determinada aplicação. A distribuição granulométrica assegura a estabilidade da camada de revestimento asfáltico, por estar relacionada ao entrosamento entre as partículas e o conseqüente atrito entre elas.

A espessura mínima de execução de uma camada determina diretamente o tamanho máximo do agregado usado na mistura asfáltica. As partículas maiores tendem a proporcionar maior estabilidade e resistência à derrapagem, porém são mais suscetíveis à segregação e podem reduzir a trabalhabilidade da mistura asfáltica durante sua execução. O *Asphalt Institute* (2007) recomenda que a espessura da camada compactada seja no mínimo de 2 a 2,5 vezes o tamanho máximo do agregado ou 3 a 4 vezes seu tamanho nominal máximo.

A pintura de ligação desempenha um papel de fundamental importância na adesão do revestimento asfáltico delgado ao substrato, possibilitando que a estrutura do pavimento trabalhe de forma solidária, sem riscos de fadiga prematura ou de “deslocamento” provenientes dos elevados esforços cisalhantes do tráfego e das variações de temperatura

ambiente. A pintura de ligação também contribui para a impermeabilização do suporte, principalmente em se tratando de misturas asfálticas de graduação aberta, com elevado volume de vazios (NAPA, 2009).

Para um melhor enquadramento do tema da presente pesquisa, são descritos, a seguir os principais tipos de misturas asfálticas aplicadas em camadas delgadas e suas características gerais:

- a) concreto asfáltico (CA);
- b) microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF);
- c) camada porosa de atrito (CPA) / Camada drenante;
- d) revestimento asfáltico tipo SMA (*stone mastic/matrix asphalt*) desenvolvido na Alemanha;
- e) *micro aglomerados en caliente* originários da Espanha;
- f) misturas asfálticas tipo *gap-graded* (GG) desenvolvidas na Califórnia – EUA;
- g) revestimentos asfálticos tipo BBTM (*béton bitumineux très minces*) e BBUM (*béton bitumineux ultra-minces*) de concepção francesa;
- h) revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD) - concepção norte-americana.

### 2.2.1 Concreto asfáltico (CA)

O concreto asfáltico (CA) é a mistura a quente mais empregada como revestimento asfáltico de pavimentos no país. De acordo com a sua distribuição dos grãos, apresenta graduação densa, curva granulométrica contínua e bem graduada, de forma a proporcionar uma estrutura mineral com poucos vazios em função dos agregados menores preencherem os vazios dos maiores. O concreto asfáltico (CA) pode ser classificado como convencional, se o ligante empregado na mistura for o cimento asfáltico de petróleo – CAP, ou especial, se forem utilizados ligantes modificados.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), as propriedades do concreto asfáltico (CA) são muito sensíveis à variação do teor de cimento asfáltico de petróleo – CAP. Uma variação positiva, mesmo dentro do intervalo admissível em usinas, pode gerar problemas de deformação

permanente por fluência e/ ou exsudação, com fechamento da macrotextura superficial. Por outro lado, a falta de ligante gera um enfraquecimento da mistura e de sua resistência à formação de trincas, uma vez que a resistência à tração e sua vida de fadiga ficam muito reduzidas. Uma das formas de reduzir a sensibilidade dos concretos asfálticos a pequenas variações de teor de ligante e torná-lo mais resistente e durável em vias de tráfego pesado é substituir o CAP por asfaltos modificados por polímero ou por asfalto borracha.

Em geral, o concreto asfáltico (CA), aplicado em revestimentos delgados, apresenta tamanho nominal máximo entre 4,75 e 12,7 mm, e textura fina ou medianamente fechada com valores de altura de areia (HS) entre 0,3 a 0,6 mm. As graduações com maior tamanho nominal máximo e quantidade de agregados graúdos tendem a apresentar maiores valores de macrotextura superficial.

A espessura acabada do concreto asfáltico delgado deve ser compatível com o tamanho nominal máximo (TNM) da graduação dos agregados. A NAPA (2009) recomenda que a relação espessura x TNM seja mantida entre os limites 3:1 a 5:1, respectivamente, para assegurar a compactação adequada.

A Tabela 2.1 apresenta exemplos de graduações tradicionalmente empregadas para o concreto asfáltico delgado (CA). Essas faixas granulométricas apresentam tamanho nominal máximo de 9,5 ou 12,7 mm e são aplicadas com espessura mínima acabada entre 30 a 40 mm, respectivamente. A Faixa C do DNIT é empregada, em geral, para a camada de rolamento conforme os requisitos da norma 031/2006 do DNIT (2006b). As faixas SPV 12,5 mm e SPV 9,5 mm (faixas granulométricas estabelecidas pela metodologia norte-americana SUPERPAVE® e definidas na especificação de serviço OHL) são adotadas para a camada de rolamento e constam na especificação particular de serviço para execução de concreto asfáltico (CA) de um dos principais grupos de concessionárias de rodovias do país (OHL ES 001 – Rev. 03/2009). A Figura 2.2 mostra a comparação entre as faixas granulométricas SPV 9,5 mm, SPV 12,5 mm e a Faixa C do DNIT para a execução do concreto asfáltico delgado.

As Tabelas 2.2 e 2.3 apresentam os parâmetros de dosagem preconizados na norma DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006b), e na especificação particular de serviço OHL ES 001 – Rev. 03/2009 (OHL, 2009) para o concreto asfáltico (CA), respectivamente.

Tabela 2.1: Faixas granulométricas de agregados. Fonte: (DNIT, 2006b; OHL, 2009)

Peneiras		Faixas					
		Faixa SPV 9,5 mm		Faixa SPV 12,5 mm		Faixa C – DNIT	
pol	mm	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
¾"	19,100			100	100	100	100
½"	12,700	100	100	90	100	80	100
3/8"	9,500	90	100	75	90	70	90
Nº4	4,760	56	90	45	65	44	72
Nº 8	2,380	---	---	---	---	---	---
Nº10	2,000	28	43	25	35	22	50
Nº30	0,590	---	---	---	---	---	---
Nº40	0,420	10	22	8	17	8	26
Nº 50	0,297	---	---	---	---	---	---
Nº80	0,180	5	15	5	13	4	16
Nº100	0,149	---	---	---	---	---	---
Nº200	0,075	2	10	2	10	2	10

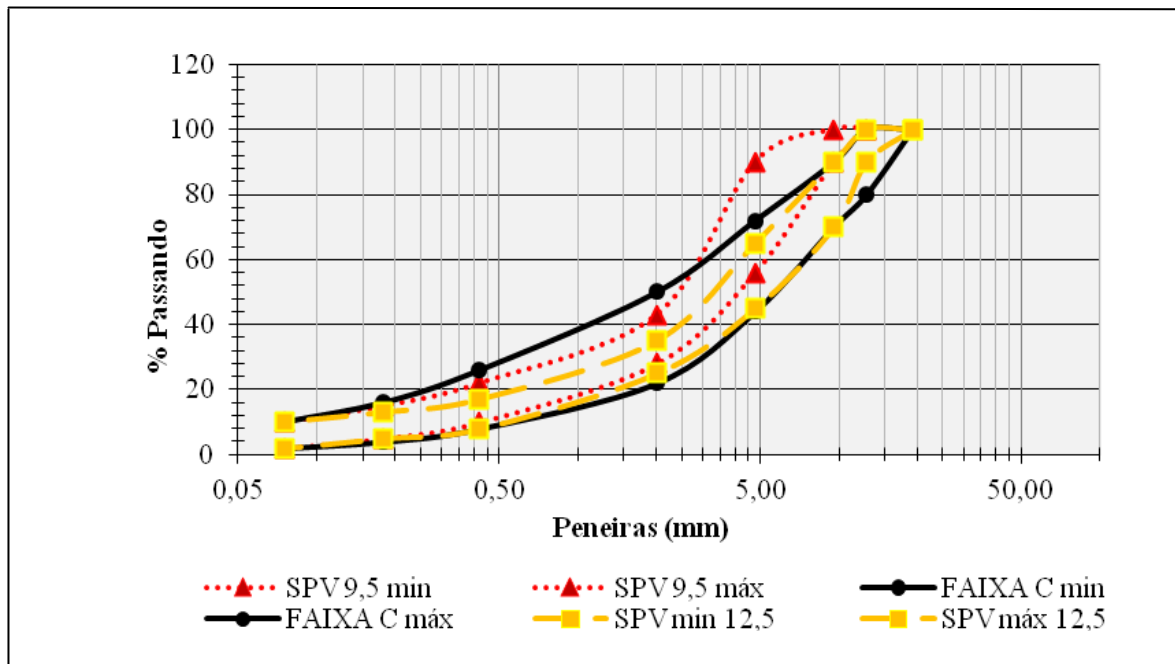


Figura 2.2: Comparação entre as faixas granulométricas para o concreto asfáltico delgado. Baseado em: (DNIT, 2006b; OHL, 2009)

Tabela 2.2: Parâmetros de dosagem - concreto asfáltico segundo DNIT. Fonte: (DNIT, 2006)

<i>Características</i>	<i>Método de Ensaio</i>	<i>Camada de rolamento</i>	<i>Camada de ligação</i>
Vv, %	DNER – ME 043	3 – 5	4 – 6
RBV, %	DNER – ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mín., kgf (75 golpes)	DNER – ME 043	500	500
RT a 25°C, mín., MPa	DNER – ME 138	0,65	0,65

Tabela 2.3: Parâmetros de dosagem – concreto asfáltico segundo OHL. Fonte: (OHL, 2009)

<i>Tipo de Camada</i>		<i>Rolamento</i>			
<i>Faixa especificada</i>		<i>Faixa 1 - SPV 9,5 mm</i>		<i>Faixa 2 - SPV 12,5mm</i>	
<i>Espessura da camada (cm)</i>		<i>Mínima 2</i>	<i>Máxima 4</i>	<i>Mínima 3</i>	<i>Máxima 6</i>
<i>Parâmetros para a mistura</i>					
<i>Parâmetro</i>	<i>Unidade</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Estabilidade Marshall	kgf	700	-	700	-
Fluência Marshall	Mm	2,0	4,5	2,0	4,5
Vazios cheios de asfalto	%	65	75	65	75
Relação fíler/ligante	-	0,6	1,6	0,6	1,6
Danos por umidade induzida	%	80	-	80	-
Resistência à tração	kgf/cm <sup>2</sup>	10	-	10	-
Variação no teor de ligante	%	-0,2%	0,2%	-0,2%	0,2%

### 2.2.2 Microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF)

A primeira experiência de MRAF no país em rodovia de intenso volume de tráfego, devidamente monitorada pelo DNIT, data de 1997, quando foi executado o trecho experimental na rodovia Presidente Dutra (BR-116-SP). Nos anos seguintes, houve crescente interesse dos órgãos e das concessionárias de rodovias, com utilização em larga escala em função dos bons resultados em pista e de sua efetividade econômica no incremento da vida do pavimento.

O MRAF é uma mistura asfáltica a frio, composta por emulsão catiônica elastomérica e de ruptura controlada (RC1C-E), agregados britados de alta qualidade, fíler mineral, água e, se necessário, aditivo químico para controle de ruptura da emulsão. A mistura é aplicada com consistência fluida e uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada (ISSA, 2010). Se previsto em projeto, fibras podem ser incorporadas à mistura como agente de reforço mecânico. No Brasil, o MRAF possui graduação densa e curva granulométrica contínua.

A técnica contribui para a redução dos gastos energéticos e preservação da segurança, meio ambiente e saúde (SMS) nos serviços de pavimentação por ser empregada à temperatura ambiente, visto que as emulsões “rompem” e “curam” por processo físico-químico de atração-adsorção dos glóbulos de asfalto aos agregados e evaporação da água.

O MRAF é comumente empregado para a impermeabilização e selagem de trincas, restabelecer as condições adequadas de atrito superficial (textura antiderrapante), preencher trilhas de roda oriundas da deformação plástica da camada de rolamento de pavimentos flexíveis antigos e na correção do desgaste superficial, como camada de nivelamento ou camada intermediária, no retardamento do processo de reflexão de trincas, e no preenchimento de painéis pequenas e superficiais (FHWA, 1994).

Suas características funcionais e construtivas possibilitam intervenções de menor “porte” e custo, fazendo com que a técnica seja amplamente utilizada em sistemas de gerência para a preservação do pavimento e/ou em estratégias com ênfase na conservação preventiva/corretiva para retardar a evolução dos defeitos e postergar as obras de restauração mais onerosas.

De acordo com as especificações de serviço brasileiras para o MRAF (DNIT 035/2005 – ES e ABNT – NBR 14948), três diferentes tipos de faixas granulométricas são utilizadas, dependendo da espessura do revestimento e da textura requerida. As duas primeiras graduações são idênticas às da *International Slurry Surfacing Association* - ISSA, entretanto uma terceira faixa de graduação mais grossa foi incluída nas especificações brasileiras.

A graduação mais fina, faixa I do DNIT, é utilizada sobre pavimentos envelhecidos e trincados para restabelecer suas características impermeabilizantes. A faixa II do DNIT, de graduação média, é a faixa mais utilizada sobre pavimentos desgastados e polidos para fornecer características antiderrapantes à camada de rolamento de rodovias de alto tráfego. A faixa III do DNIT de graduação mais grossa é utilizada como camada de regularização e para preenchimento de trilhas de roda.

A Tabela 2.4 apresenta as faixas granulométricas e o consumo teórico de materiais segundo as especificações de serviço 035/2005 do DNIT (2005) e a Figura 2.3 ilustra graficamente as faixas granulométricas segundo as especificações de serviço DNIT 035/2005 (DNIT, 2005) e NBR 14948 (ABNT, 2003a).

Tabela 2.4: Faixas granulométricas e consumo teórico de materiais para MRAF.  
Fonte: (DNIT, 2005)

<i>Composição Granulométrica da Mistura de Agregados</i>					
<i>Peneira de malha quadrada</i>		<i>Porcentagem passando em peso</i>			<i>Tolerância da curva de projeto (%)</i>
<i>Peneiras</i>		<i>Faixa I</i>	<i>Faixa II</i>	<i>Faixa III</i>	
<i>Nome</i>	<i>Abertura (mm)</i>				
½	12,5	-	-	100	-
3/8	9,5	100	100	85-100	± 5
4	4,75	90-100	70-90	60-87	± 5
8	2,36	65-90	45-70	40-60	± 5
16	1,18	45-70	28-50	28-45	± 5
30	0,600	30-90	19-34	19-34	± 5
50	0,330	18-30	12-25	14-25	± 5
100	0,150	10-21	7-18	8-17	± 3
200	0,075	5-15	5-15	4-8	± 2
Asfalto residual	% em peso do agregado	7,5-13,5	6,5-12,0	5,5-7,5	± 0,3
Fíler	% em peso do agregado	0-3	0-3	0-3	-
Polímero	% em peso do asfalto residual	3 mín.	3 mín.	3 mín.	-
Taxa de aplicação	kg/m <sup>2</sup>	5-11	8-16	15-30	-
Espessura	mm	4-15	6-20	12-37	-
Utilização		Áreas urbanas e aeroportos	Rodovias de tráfego pesado e trilhas de roda	Regularização e rodovias de tráfego pesado	-

A dosagem do MRAF é realizada com base nos ensaios de compatibilidade dos materiais na mistura e de seus respectivos valores limites. Esse procedimento utiliza os métodos de ensaios da ABNT para atender as especificações de serviço DNIT 035/2005 ES e ABNT – NBR 14948 e seguem a recomendação da ISSA A-143 (ISSA, 2010), conforme ilustrado na Tabela 2.5.



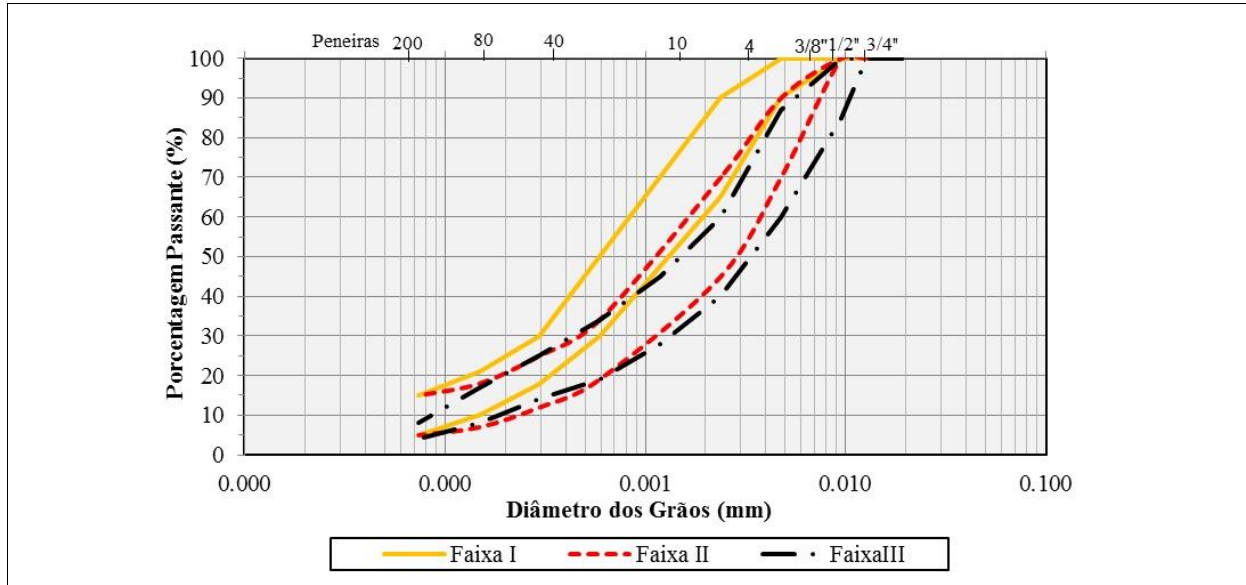


Figura 2.3: Faixas granulométricas para MRAF. Baseado em: (ABNT, 2003a; DNIT, 2005).

Tabela 2.5: Requisitos do projeto e dosagem do MRAF. Fonte: (ABNT, 2003a)

Métodos	Ensaio	Unidade	Valores Especificados	
			Mínimo	Máximo
NBR 14798	Coesão Úmida, 30min	kg.cm	12,0	-
NBR 14798	Coesão Úmida, 60min	kg.cm	20,0	-
NBR 14841	Excesso de Asfalto pelo LWT	g/m <sup>2</sup>	-	538,0
NBR 14757	Adesividade	%	90	-
NBR 14746	Perda por Abrasão Úmida WTAT	g/m <sup>2</sup>	-	538,0
NBR 14758	Tempo de Mistura, 25±1°C	s	120,0	-

O teor de ligante residual de projeto é determinado graficamente, combinando as curvas contendo os resultados correspondentes de perda por abrasão úmida (WTAT) – NBR 14746 (ABNT, 2001c), e do excesso de asfalto e adesão de areia (LWT) – NBR 14841 (ABNT, 2002b).

A mistura asfáltica é realizada numa usina móvel própria e apoiada sobre um chassi de caminhão para espalhamento contínuo do MRAF. Deve ser provida de silos de agregados, fíler mineral, fibras (se necessário), tanques individuais de emulsão asfáltica, água e aditivo, dispositivo misturador e caixa de distribuição e nivelamento. A taxa de aplicação do MRAF varia de acordo com a graduação da mistura de agregados, em função da espessura média adotada no projeto executivo e do estado da superfície (textura e irregularidades longitudinais e transversais). Em geral, situa-se entre 10 e 30 kg/m<sup>2</sup> (ABEDA, 2010). O MRAF apresenta

espessura delgada, geralmente entre 6 a 15 mm, com tamanho nominal máximo entre 4,75 e 9,5 mm, dependendo da faixa adotada, conforme apresentado na Tabela 2.4.

A pintura de ligação, em geral, não é requerida para o MRAF. Porém recomenda-se sua execução sobre pavimentos desgastados e com textura aberta (porosos) ou heterogênea, envelhecidos/oxidados, com fissuras que necessitam de selagem ou em concreto de cimento Portland para melhor aderência e impermeabilização do substrato (ABEDA, 2010).

O MRAF, uma vez curado, apresenta-se uniforme e com textura superficial de média a grossa. Em geral, as medidas de altura de areia - HS para os MRAF variam entre 0,8 a 1,2 mm. O aumento da rugosidade da camada de rolamento é responsável pela melhoria da aderência pneu-pavimento, da drenagem superficial e da diminuição do spray que se forma pela movimentação dos veículos, reduzindo as condições de visibilidade e, conseqüentemente, de segurança dos usuários em pista molhada.

### 2.2.3 Camada porosa de atrito (CPA) / Camada drenante

Inicialmente desenvolvida na Europa e posteriormente na América do Norte (Open Graded Friction Courses - OGFC), a camada porosa de atrito (CPA) com ligantes modificados por polímeros elastoméricos, também conhecida como camada drenante, foi introduzida no Brasil a partir de meados de 1990.

A CPA é uma mistura a quente de graduação aberta e curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um único tamanho e pouquíssima proporção de material fino (menor que 0,075 mm). A estrutura mineral da CPA possui muitos vazios com ar e interconectados, geralmente entre 18 a 25%, que possibilita em dias de chuva a percolação da lâmina de água da superfície do pavimento através da camada asfáltica, direcionando a água para os drenos laterais da pista.

Esse revestimento apresenta tamanho nominal máximo entre 9,5 e 12,7 mm e textura superficial de média a grossa com valores de altura de areia (HS) entre 0,8 a 1,2 mm, que confere boas condições de aderência pneu-pavimento (segurança). As graduações com maior tamanho nominal máximo e quantidade de agregados graúdos tendem a apresentar maiores valores de macrotextura superficial.

Em geral, a CPA é aplicada na camada de rolamento em espessuras entre 30 a 40 mm para proteger a estrutura e preservar a qualidade/funcionalidade do pavimento, cabendo às camadas subjacentes desempenhar adequadamente a função estrutural para resistir às solicitações de carga. Suas principais características funcionais reduzem os riscos de hidroplanagem, as distâncias de frenagem, o *spray* causado pela movimentação dos veículos em dias de chuva, a reflexão da luz dos faróis noturnos e o ruído ao rolamento (cerca de 50 a 70% menor em relação ao concreto asfáltico convencional).

São utilizados teores de projeto de ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos, geralmente entre 4,0 a 6,0% em peso, para aumentar a durabilidade e a resistência a desagregação da CPA. Eventualmente fibras de celulose são adicionadas com o objetivo de incrementar a quantidade de ligante modificado e, conseqüentemente, a flexibilidade/durabilidade da mistura asfáltica, sem escorrimento e segregação dos materiais (BOLZÁN, 2009).

A camada inferior à CPA deve ser impermeável para evitar a entrada da água na estrutura do pavimento. A pintura de ligação, que também tem a função de selar o substrato, geralmente é aplicada a taxa de 400 a 600 g/m<sup>2</sup> de ligante asfáltico residual modificado proveniente de emulsões asfálticas catiônicas elastoméricas de ruptura rápida (RR1C-E).

A especificação de serviço 386/99 (DNER, 1999) estabelece 05 faixas granulométricas, bem como os requisitos para o projeto de dosagem da CPA baseados na avaliação dos parâmetros volumétricos pelo método Marshall (50 golpes/face), da resistência ao desgaste por abrasão através do ensaio Cantabro NBR 15140 (ABNT, 2004d), e à tração por compressão diametral NBR 15087 (ABNT, 2004c), conforme apresentado na Tabela 2.6. Adicionalmente, é recomendado verificar a sensibilidade da CPA à água através da relação de resistência à tração indireta (RRT) em corpos de prova condicionados e não condicionados em água. O teor máximo admissível de ligante asfáltico e o efeito da adição de fibras na mistura podem ser verificados através do ensaio de escorrimento apropriado (método Schellenberg ou AASHTO T 305-97). Recomenda-se a utilização da CPA somente em vias expressas e rodovias de tráfego rápido, a fim de minimizar os problemas de redução de permeabilidade por contaminação com pó e detritos sobre a superfície de rolamento.

Tabela 2.6: Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da CPA – DNER-ES – 386/99. Fonte: (BERNUCCI *et al.*, 2008)

<i>Peneira de malha quadrada</i>		<i>Faixas</i>					
		<i>Porcentagem em massa passando</i>					
<i>ABNT</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>Tolerância</i>
¾"	19,0	-	-	-	-	100	-
½"	12,5	100	100	100	100	70-100	±7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	±7
Nº4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	±5
Nº10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	±5
Nº40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	±5
Nº80	0,18	-	2-8	-	-	-	±3
Nº200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	±2
Ligante Modificado por polímero, %		4,0-6,0					±0,3
Espessura da Camada Acabada, cm		3,0		≤4,0			
Volume de Vazios, %		18-25					
Ensaio Cantabro, % máx.		25					
Resistência à tração por Compressão Diametral, a 25°C, MPa, mín.		0,55					

#### 2.2.4 Revestimento asfáltico tipo SMA (*Stone Mastic/Matrix Asphalt*)

O *Stone mastic/matrix asphalt* (SMA), desenvolvido na Alemanha em 1968, foi concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão. A mistura a quente se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos (70-80% retido na peneira nº 10). Devido a esta particular graduação forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos; esses vazios, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia de brita, fíler, ligante asfáltico e fibras de celulose. A fração areia é constituída essencialmente de material britado (REIS; BERNUCCI; ZANON, 2001).

São misturas de graduação densa, com curvas granulométricas descontínuas e praticamente impermeáveis, com volume de vazios da mesma ordem de grandeza (4 a 6% em pista) dos concretos asfálticos convencionais (CA). A descontinuidade na curva é obtida incrementando a proporção de agregados graúdos (em geral, maiores que 4,75 mm) e miúdos (em geral, menores do que 2,0 mm), bem como do fíler calcário e reduzindo a fração intermediária de

agregados com tamanhos entre 2,0 e 4,75 mm. Esse procedimento possibilita estabelecer o contato entre os grãos dos agregados graúdos responsáveis pelo intertravamento da estrutura mineral e resistência à deformação permanente.

O SMA apresenta um elevado teor de cimento asfáltico, em geral modificado por polímeros elastoméricos, entre 6,3 a 7,0% em peso e, portanto, necessita de um agente estabilizador da mistura (fibras) que absorvem o ligante e evitam o seu escorrimento e a segregação do material asfáltico durante o transporte e a aplicação. As fibras usualmente são de origem orgânica (celulose) ou mineral e dosadas na proporção entre 0,3 a 0,5% em peso de mistura asfáltica. A argamassa ou mástique asfáltico do SMA responde pela resistência à fadiga e alta durabilidade da mistura. Em geral, o SMA para a camada de rolamento possui espessura delgada, da ordem de 25 a 40 mm, com tamanho nominal máximo entre 4,75 a 12,7mm, respectivamente. A principal diferença do SMA em relação às misturas asfálticas convencionais reside na sua concepção. No concreto asfáltico (CA) de estrutura densa, o volume ocupado pela argamassa areia de brita-fíler-ligante é maior que os vazios do agregado graúdo da mistura compactada. No SMA o volume de argamassa asfáltica é menor, permanecendo os agregados graúdos em contato direto. O contato grão-grão entre os agregados graúdos é garantido pela seguinte relação (NAPA, 1999, *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008):

$$VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC} \quad (2.1)$$

Esses parâmetros são obtidos pelas expressões 2.2 e 2.3 (DER/SP, 2007):

$$VCA_{DRC} = \left( \frac{G_{CA} \cdot \gamma_w - \gamma_s}{G_{CA} \cdot \gamma_w} \right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$VCA_{mix} = 100 - \left( \frac{G_{MB}}{G_{CA}} \cdot P_{CA} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

$VCA_{DRC}$ : vazios da fração graúda do agregado compactado, %;

$\gamma_s$ : massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado,  $g/cm^3$  e obtida conforme o método DNER – ME 153/97 (DNER, 1997b);

$\gamma_w$ : massa específica da água: 0,998  $g/cm^3$ ;

$G_{CA}$ : massa específica aparente da fração graúda do agregado,  $g/cm^3$  e obtida conforme método DNER – ME 81/98 (DNER, 1998b);

$VCA_{mix}$ : vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %;

$G_{MB}$ : massa específica aparente da mistura compactada,  $g/cm^3$  e obtida conforme método DNER – ME 117/94 (DNER, 1994d);

$P_{CA}$ : % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura;

A fração do agregado graúdo ( $P_{CA}$ ) é definida como sendo a porção relativa à mistura total de agregados, retida numa determinada peneira que varia de acordo com o diâmetro nominal máximo dos agregados, como apresentado na Tabela 2.7:

Tabela 2.7: Definição da fração do agregado graúdo. Fonte: (DER/SP, 2007)

Diâmetro nominal máximo do agregado <sup>1</sup>		Porção de agregado retida na peneira	
<i>mm</i>	<i>ASTM</i>	<i>Mm</i>	<i>ASTM</i>
25,0	1”	4,75	N°4
19,0	¾”	4,75	N°4
12,5	½”	4,75	N°4
9,5	3/8”	2,36	N°8
4,75	N°4	1,18	N°16

<sup>1</sup>diâmetro nominal máximo do agregado é definido como o diâmetro da peneira imediatamente superior àquela que retém mais que 10% dos agregados

Para os projetos de dosagem de misturas tipo *gap-graded*, SMA e drenantes (CPA), a National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 2011) também estabelece a verificação da existência de contato grão-grão, isto é  $VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC}$ . Entretanto, a fração do agregado graúdo não é definida por uma abertura de peneira em particular, mas pela porção relativa à mistura total de agregados retidos na “peneira de quebra”. A “peneira de

quebra” é definida como a menor abertura de peneira que retém pelo menos 10% da mistura total dos agregados, conforme exemplificado na Figura 2.4.

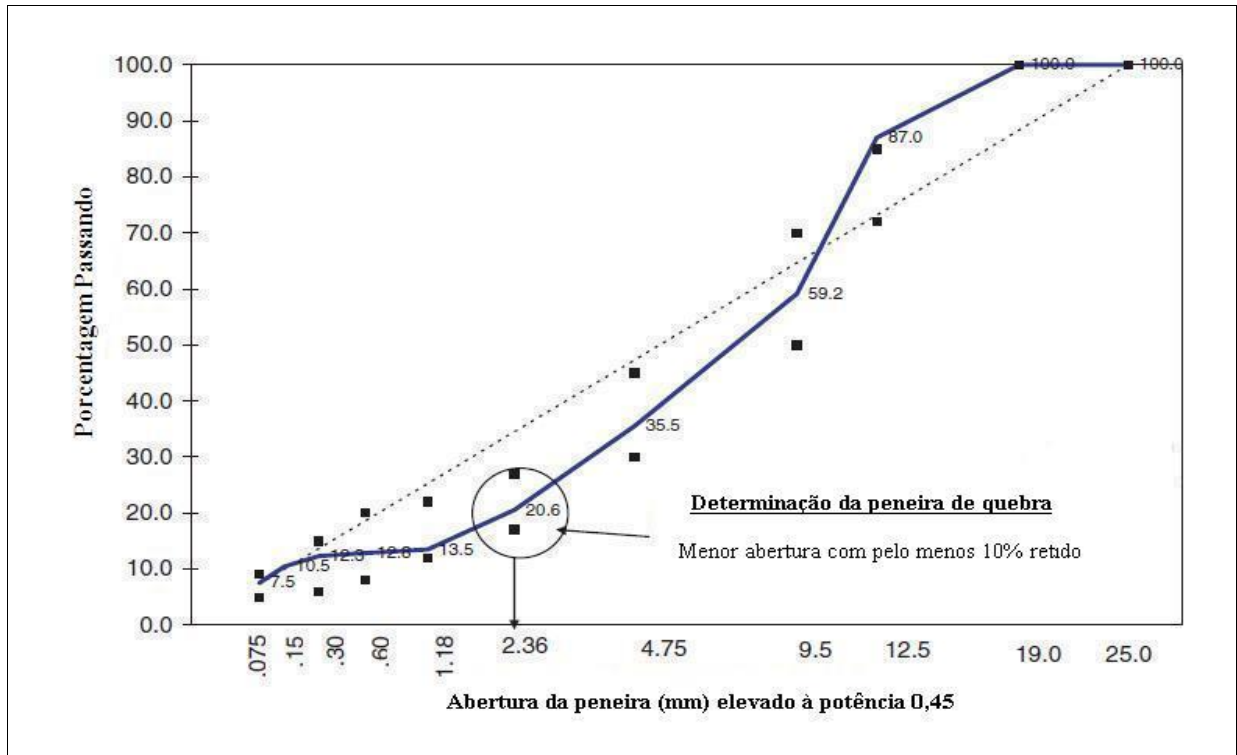


Figura 2.4: Determinação da peneira de quebra. Baseado em: (NCHRP, 2011)

No Brasil em 2001 foi introduzido o SMA em rodovia de alto tráfego, com ligante asfáltico elastomérico. Um trecho experimental foi construído na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, entre as cidades de São Paulo e Santos. Os resultados, após 5 anos de operação, mostraram a superioridade de desempenho estrutural e funcional da solução adotada, tendo em vista que os sucessivos recapeamentos executados em concreto asfáltico convencional (CA) apresentavam durabilidade de apenas 1 ano. Os índices de acidentes no local foram reduzidos em 60% (REIS, 2010b).

Segundo Bolzán (2009), na Europa, a vida de serviço esperada para o SMA tem sido reportada entre 10 a 12 anos, com resistência à derrapagem, aos afundamentos, trincamentos, e à abrasão superiores às misturas convencionais. O nível de ruído é aproximadamente similar ao concreto asfáltico (CA).

Em 2007, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP, 2007) publicou a primeira especificação técnica brasileira da mistura asfáltica tipo SMA. A Tabela 2.8 apresenta as faixas granulométricas e espessuras estabelecidas segundo a norma ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007). A Tabela 2.9 complementa os requisitos técnicos para a dosagem da mistura asfáltica, cujos parâmetros volumétricos são obtidos através de corpos de prova Marshall compactados com 50 golpes por face.

Tabela 2.8: Faixas granulométricas para misturas asfálticas tipo SMA. Fonte: (DER/SP, 2007)

<i>Peneira de Malha Quadrada</i>		<i>Designação</i>				<i>Tolerâncias</i>
		<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	
<i>ASTM</i>	<i>mm</i>	<i>% em massa passando</i>				
¾"	19,0	100				
½"	12,5	90-100				± 7%
3/8"	9,5	-	100	100		± 7%
5/16"	7,93	45-60	90-100	90-100	100	± 5%
Nº 4	4,75	30-40	30-45	30-52	90-100	± 5%
Nº 10	2,0	20-27	20-27	20-30	30-40	± 5%
Nº 200	0,075	9-13	9-13	7-12	7-12	± 2%
Espessura (cm)		3,5-5,0	3,0-4,0	2,5-3,5	1,5-2,5	---

Tabela 2.9: Requisitos para o Projeto de Misturas SMA. Fonte: (DER/SP, 2007)

<i>Características</i>	<i>Método de Ensaio</i>	<i>Parâmetros</i>
% de Vazios Totais	ASTM D 3203	4
Vazios do Agregado Mineral – VAM (%)		≥ 17
VCA <sub>MIX</sub> - vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada	-	VCA <sub>MIX</sub> ≤ VCA <sub>DRC</sub> <sup>1</sup>
Porcentagem de fibras de celulose	-	0,3 a 1,5
Escorrimento na temperatura de usinagem, máximo, %	ASTM D 6390 ou AASHTO T 305 ou “ensaio de Schellenberg”	0,3
Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25°C, mínima, Mpa	NBR 15087	0,60

<sup>1</sup> vazios da fração graúda do agregado compactado

O revestimento asfáltico tipo SMA apresenta características de atrito superficial similares a CPA, que se traduz em uma textura superficial de média a rugosa de boa aderência pneu-pavimento e de drenabilidade superficial, proporcionando melhores condições de segurança aos usuários.



A pintura de ligação geralmente é aplicada na taxa de 400 g/m<sup>2</sup> de ligante asfáltico residual modificado proveniente de emulsões asfálticas catiônicas elastoméricas de ruptura rápida (RR1C-E).

### 2.2.5 Micro-aglomerados *en caliente*

Na Espanha e na Argentina (COMISION PERMANENTE DEL ASFALTO, 2010) são normalizados dois tipos de misturas delgadas a quente conhecidas como micro aglomerados *en caliente*:

- a) misturas tipo F (capas finas), de graduação densa (volume de vazios entre 4 a 7%) e curva granulométrica descontínua, aplicadas com espessuras entre 20 a 35 mm;
- b) e misturas drenantes tipo M (monogranulares), de graduação aberta (volume de vazios superior a 12%) e curva granulométrica uniforme, aplicadas em espessuras entre 15 e 25 mm.

A descontinuidade granulométrica é essencial na obtenção de valores adequados de macrotextura superficial. A condição estabelecida é que a fração de agregado que passa na peneira de abertura 4,75 mm e é retida na peneira de abertura 2,36 mm seja inferior a 8% do peso total de agregados que integram a composição granulométrica. Quanto menor essa diferença, maior são os valores de altura de areia - HS obtidos.

Em geral, os valores de altura de areia – HS dessas misturas situam-se entre 0,9 a 1,1 mm, o que se traduz em uma textura superficial de média a rugosa com condições adequadas de aderência pneu-pavimento e de drenabilidade da água em períodos de chuva.

Os diâmetros nominais máximos utilizados para estas misturas estão compreendidos entre 8 e 10 mm e teor de agregados graúdos varia entre 75 a 88%. Também é adicionado à mistura filler industrial calcário ou cal hidratada para atender a graduação estabelecida e/ou melhorar a resistência à água da mistura asfáltica.

Emprega-se em sua formulação agregados de alta qualidade mecânica, 100% britados e ligantes asfálticos elastoméricos para aumentar a resistência ao trincamento e a ação abrasiva do tráfego, bem como a durabilidade da textura superficial. Os teores mínimos de ligante

modificado estabelecido para as misturas do tipo M e F são 4,8 e 5,2% em peso, respectivamente.

Eventualmente, fibras de celulose são adicionadas com o objetivo de incrementar a quantidade de ligante e, conseqüentemente, a flexibilidade/durabilidade da mistura asfáltica, sem escorrimento e segregação dos materiais (BOLZÁN, 2009).

Para a pintura de ligação, geralmente é aplicada a taxa de 400 a 600 g/m<sup>2</sup> de ligante asfáltico residual modificado, proveniente de emulsões asfálticas catiônicas elastoméricas de ruptura rápida (RR1C-E).

Os procedimentos de dosagem dessas misturas, em geral são baseados no estabelecimento dos parâmetros volumétricos pelo método Marshall (50 golpes/face), bem como na avaliação da resistência ao desgaste por abrasão (ensaio Cantabro) e de sensibilidade à água (ensaio de compressão Duriez ou de danos por umidade induzida) em corpos de prova condicionados e não condicionados em água. O teor máximo admissível de ligante asfáltico e o efeito da adição de fibras na mistura podem ser verificados através do ensaio de escorrimento apropriado (método Schellenberg ou AASHTO T 305-97).

Diversas medições indicaram a redução de ruído de 1,5 a 2 dB (A) com pavimento seco e de 2 a 4 dB (A) com pavimento molhado em relação ao concreto asfáltico convencional (VARGAS, 2000).

A Tabela 2.10 apresenta as faixas granulométricas típicas utilizadas na Espanha no projeto de misturas asfálticas delgadas.

Tabela 2.10: Faixas granulométricas – Micro aglomerados *en caliente*. Fonte: (VARGAS, 2000)

Tamanho do grão (mm)	Faixas (% passante)				Tolerância (%)
	M8	M10	F8	F10	
12,5		100		100	±4
9,5	100	75-97	100	75-97	±4
8,0	75-97	---	75-97	---	±4
4,75	15-28	15-28	25-40	25-40	±4
2,36	15-25	12-25	20-35	20-35	±3
0,63	9-18	9-18	12-25	12-25	±3
0,075	5-8	5-8	7-10	7-10	±1

Na Argentina, a partir de 1996, quando os ligantes modificados por polímeros passaram a ser comercializados, a utilização de revestimentos asfálticos delgados aumentou significativamente. Observa-se um maior nível de utilização de misturas descontínuas segundo a faixa F10 espanhola e do tipo SMA (JAIR, 2003). Na América do Sul, além da Argentina, o Chile também tem empregado a tecnologia de revestimentos ultra delgados a quente na construção, reabilitação e manutenção de suas rodovias (VARGAS, 2000).

### 2.2.6 Misturas tipo “*gap-graded*”

Estudos envolvendo asfalto modificado por borracha de pneus inservíveis, pelo processo via úmida, levaram à proposição de misturas asfálticas especiais empregando essa tecnologia. Segundo a especificação de material DNIT 111/2009 – EM (DNIT, 2009a), asfalto-borracha é o cimento asfáltico de petróleo modificado pela adição de borracha moída de pneus inservíveis, que representam de 15 a 20% da massa do ligante. O processo pelo qual se obtém o asfalto-borracha é denominado “via-úmida”, no qual os componentes são misturados em um terminal especial, a altas temperaturas, por agitação com alto cisalhamento, resultando em um ligante estável, homogêneo e estocável.

O Departamento de Transportes da Califórnia – CALTRANS, foi o primeiro órgão norte-americano a especificar misturas asfálticas especiais de graduação densa e faixas granulométricas descontínuas, conhecidas por “*gap-graded*”, com a utilização de asfalto-borracha (AB). A graduação “*gap-graded*” apresenta grande quantidade de agregados graúdos e finos, porém baixa proporção de partículas com tamanho intermediário. A distribuição resultante dos agregados em “*gap*” ou intervalo confere uma macrotextura superficial aberta ou rugosa para o revestimento. O objetivo do “*gap*” é tornar mais resistente o esqueleto mineral à deformação permanente com maior número de contatos entre os agregados graúdos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo o CALTRANS (2003b), o asfalto-borracha (AB) não é adequado para uso em misturas asfálticas com faixas granulométricas contínuas. A graduação densa do agregado não permite o aumento necessário no conteúdo de ligante para melhorar o desempenho da mistura o suficiente para justificar o custo adicional do produto asfáltico. Isto é, embora seja possível projetar uma mistura “*gap-graded*” com volume de vazios do agregado mineral (VAM) e com ar (Vv) similares ao do concreto asfáltico denso (4 a 6%), sua distribuição é bem diferente. O *gap-graded* possui um pequeno número de espaços vazios intergranulares de

grande volume enquanto que o CA apresenta um grande número de pequenos espaços vazios que não são suficientes para serem preenchidos pelo ligante asfalto-borracha de alta consistência (viscosidade).

No Brasil, a faixa granulométrica especial “*gap-graded*” com asfalto-borracha (AB), foi introduzida em 2002 e utilizada como camada de rolamento em rodovias concessionadas no Estado de São Paulo. A graduação possui agregados com tamanho nominal máximo entre 9,5 e 12,7 mm e textura superficial de média a grossa com valores de altura de areia (HS) entre 0,8 a 1,1 mm, que proporciona boas condições de aderência pneu-pavimento e drenabilidade da água em períodos de chuva.

Segundo o CALTRANS (2003b), a mistura é principalmente empregada em revestimentos asfálticos delgados (com espessura mínima entre 30 a 40 mm) para a proteção da estrutura do pavimento, melhoria da qualidade ao rolamento, resistência à derrapagem, e redução de ruído do tráfego.

Para a pintura de ligação, geralmente é aplicada a taxa de 400 a 600 g/m<sup>2</sup> de ligante asfáltico residual modificado proveniente de emulsões asfálticas catiônicas elastoméricas de ruptura rápida (RR1C-E).

As Tabelas 2.11 e 2.12 apresentam, respectivamente, a graduação *gap-graded* destinada à camada de rolamento e os principais requisitos técnicos estabelecidos pela Norma 112/2009 – ES (DNIT, 2009b) para a dosagem da mistura descontínua com ligante asfalto-borracha, produzida pelo processo via úmida em terminal.

Tabela 2.11: Graduação descontínua “*gap-graded*” para mistura com asfalto-borracha. Fonte: (DNIT, 2009b)

<i>Peneira de malha quadrada</i>		<i>% em massa passando</i>	
<i>ABNT</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>Faixa Descontínua gap-graded</i>	<i>Tolerância Máx</i>
¾”	19,0	100	±7%
½”	12,5	90-100	±7%
3/8”	9,5	78-92	±7%
Nº4	4,8	28-42	±5%
Nº10	2,0	14-24	±5%
Nº40	0,42	8-17	±5%
Nº80	0,18	5-11	±3%
Nº200	0,075	2-7	±2%
Asfalto Solúvel no CS <sub>2</sub> (%)		5,0-8,0	±0,03%

Tabela 2.12: Requisitos técnicos para a dosagem da mistura *gap-graded* com asfalto-borracha. Fonte: (DNIT, 2009b)

<i>Características</i>	<i>Método de ensaio</i>	<i>Camada de rolamento gap-graded</i>
Volume de Vazios, %	DNER-ME043	4 a 6
VAM % mín*	DNER-ME 043	14-17
Relação betume / vazios	DNER-ME043	65-78
Estabilidade mínima (kgf) (75 golpes)	DNER-ME043	700
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME138	0,5

\*de acordo com o tamanho nominal máximo e o volume de vazios da mistura

### 2.2.7 Revestimentos asfálticos tipo BBTM (*Béton Bitumineux Très Minces*) e BBUM (*Béton Bitumineux Ultra-Minces*) - concepção francesa

Na década de 1970, foi adotado para o projeto de pavimentos na França o princípio da “dissociação de funções das camadas do revestimento”. Principalmente foram destacados os parâmetros funcionais de conforto, segurança e redução do ruído à camada de rolamento/desgaste e estabelecidos maiores requisitos estruturais para as camadas subjacentes do pavimento. Essa nova concepção técnica impulsionou o desenvolvimento de equipamentos de laboratório, (prensa de cisalhamento giratório - PCG, simulador de tráfego *LPC*, ensaio mecânico de módulo complexo, entre outros) para a determinação das características de trabalhabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente. Também nesse período houve o refinamento do método francês de dosagem de misturas asfálticas, baseado em desempenho.

As misturas asfálticas francesas não atendem a uma “receita de composição”. São definidas e caracterizadas pelo tipo, posição dentro da estrutura (camada intermediária ou de rolamento), espessura média, graduação (ou tamanho nominal máximo dos agregados) e classe de desempenho exigido para o produto acabado. A “dissociação de funções” das camadas do pavimento também levou a seleção de agregados, totalmente britados, com características relacionadas ao desempenho (tamanho, graduação, dureza, angularidade, forma, limpeza, resistência à abrasão, ao polimento, entre outras) e ao desenvolvimento de ligantes modificados ou especiais que resultaram em camadas asfálticas intermediárias mais resistentes (módulo de rigidez elevado), associadas a camadas de rolamento de espessura reduzida e alto desempenho funcional (BROSSEAUD, 2002).

Assim, foram sucessivamente desenvolvidas as misturas asfálticas delgadas conhecidas como *béton bitumineux mince* (BBM) (30 a 50 mm) nos anos 1970; dez anos mais tarde as misturas

muito delgadas denominadas *béton bitumineux très mince* (BBTM) (20 a 30 mm); em meados dos anos 1980 as misturas drenantes ou *beton bitumineux drainant* (BBDr), destinadas a melhorar a visibilidade e a aderência evitando a formação de película de água na superfície do pavimento em dias de chuva; e no início dos anos 1990 as misturas ultra delgadas ou *béton bitumineux ultra mince* (BBUM), com espessura similar ao diâmetro do agregado (monogranular) podendo chegar a 15 mm (RGRA, 2005).

Atualmente, as misturas asfálticas delgadas são amplamente utilizadas como revestimento em pavimentos novos ou na reabilitação de pavimentos antigos, especialmente nas autoestradas, de países como a França, Canadá, Reino Unido e Estados Unidos.

Os revestimentos asfálticos delgados desenvolvidos na França não apresentam efeito estrutural, e seu papel é garantir ou restaurar as características superficiais como aderência, uniformidade e redução de ruídos de contato pneu-pavimento. Para um bom compromisso entre suas características mecânicas e funcionais, foram adequados o volume de vazios e a descontinuidade das curvas granulométricas das misturas projetadas. Essas formulações levam a revestimentos com graduação descontínua e textura superficial aberta que necessitam de uma camada e/ou pintura de ligação, capaz de garantir a impermeabilização das camadas subjacentes.

O emprego de ligantes modificados por polímeros ocorreu principalmente devido ao seu melhor desempenho em revestimentos asfálticos delgados para vias de tráfego pesado. Esse conjunto de revestimentos (BBTM, BBUM e misturas drenantes), de granulometria descontínua, exigia ligantes capazes de envolver os agregados com um filme mais espesso, assegurando a durabilidade requerida (AIPCR, 1999, *apud* FERREIRA, 2006).

Na metodologia de dosagem de misturas asfálticas francesas as seguintes características são avaliadas e comparadas aos valores especificados conforme a classe de desempenho da mistura asfáltica:

- a) determinação do volume de vazios através da Prensa de Compactação e Cisalhamento Giratório - PCG;
- b) sensibilidade à ação deletéria da água pelo ensaio Duriez;
- c) resistência à deformação permanente no simulador de tráfego de laboratório LPC;

- d) determinação da rigidez ou resiliência da mistura asfáltica através do ensaio de módulo complexo;
- e) resistência ao trincamento através do ensaio mecânico de fadiga.

A Tabela 2.13 relaciona níveis de dosagem, equipamentos de laboratório e requisitos técnicos requeridos para as misturas asfálticas francesas. O nível de dosagem depende do volume de tráfego e da importância da obra, de forma a limitar os riscos de danos (FERREIRA, 2006).

Tabela 2.13: Níveis de dosagem, equipamentos de laboratório e requisitos técnicos para as misturas asfálticas francesas. Fonte: (FERREIRA, 2006)

Nível	Tipo de Dosagem			Observações
	Verificação da dosagem	Adaptação da dosagem	Nova dosagem	
1	Ensaio: PCG e Ensaio Duriez	Ensaio: PCG e Ensaio Duriez	Ensaio: PCG e Ensaio Duriez	-
2	Ensaio: PCG e Ensaio Duriez	Ensaio: Deformação permanente	Ensaio: Deformação permanente	Camada exposta a riscos de afundamento de trilha de roda. Ex: tráfego pesado, lento e canalizado.
3	Ensaio: PCG e Ensaio Duriez	Ensaio: Deformação permanente	Ensaio Mecânico: Módulo complexo	Camada com função estrutural Obra importante
4	Ensaio: PCG e Ensaio Duriez	Ensaio: Deformação permanente	Ensaio Mecânico: Módulo complexo e Fadiga	Camada com função estrutural Obra importante

#### 2.2.7.1 BBTM

A partir do ano de 1984 foi desenvolvida a técnica de revestimento asfáltico muito delgado, conhecido na França como BBTM (*béton bitumineux très mince*). A função essencial desse tipo de mistura asfáltica é conferir à superfície do pavimento propriedades como aderência, drenabilidade e, se necessário, propriedades acústicas. Segundo Brosseaud (2002), na França, o BBTM tende a se tornar a técnica mais utilizada para a manutenção de pavimentos de alto tráfego, porque esta representa 1/3 da rede de autoestradas e cerca de 1/4 da rede nacional.

A granulometria mais utilizada em misturas do tipo BBTM é a 0/10 (diâmetro mínimo/diâmetro máximo em mm). A granulometria 0/6 é pouco utilizada e a granulometria

0/14 deixou de ser empregada, por resultar em misturas com tendência à segregação e ao descolamento, nível sonoro mais elevado que os BBTM 0/10 e 0/6 e desempenho inferior em relação à aderência. A norma francesa XP P 98-137 (AFNOR, 2001b), define duas classes de BBTM de acordo com os resultados obtidos no ensaio com a prensa de cisalhamento giratório (PCG). As granulometrias especificadas são a 0/6 e 0/10, apresentando uma descontinuidade bem marcada na fração de agregados 2/4 ou 2/6, respectivamente. A fração areia de brita 0/2 é da ordem de 20 a 30%, e a taxa média de mistura asfáltica aplicada é da ordem de 40 a 60 kg/m<sup>2</sup>.

Para um volume de tráfego superior a 1000 veículos pesados por dia por sentido, é recomendada a utilização de ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos, geralmente do tipo SBS, ou ligante convencional com adição de fibras para melhorar as propriedades mecânicas da mistura e sua resistência às condições climáticas (BROSSEAUD, 1997).

O teor mínimo de ligante para projeto de dosagem é obtido aplicando a Equação 2.4, com módulo de riqueza ( $k$ ) igual a 3,5 para a graduação BBTM 0/6 e 3,4 para a graduação BBTM 0/10. O módulo de riqueza é uma grandeza proporcional à espessura do filme de ligante que recobre os agregados, sendo estabelecido para cada tipo de mistura asfáltica visando assegurar a sua durabilidade. O módulo de riqueza é independente da massa específica efetiva da mistura de agregados.

$$\text{teor de ligante} = k \cdot \alpha \cdot \sqrt[3]{\Sigma} \quad (2.4)$$

Onde:

*teor de ligante*: expresso em porcentagem em peso (%) em relação à mistura de agregados.

$k$ : módulo de riqueza (LCPC, 2006)

$\alpha$ : coeficiente de correção em função da densidade aparente da mistura de agregados

$$\alpha = 2,65 / G_{se}$$

$G_{se}$ : massa específica efetiva da mistura de agregados [g/cm<sup>3</sup>]



$\Sigma$ : superfície específica total calculada utilizando a Equação 2.5 [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]

$$\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 135f$$

(2.5)

Onde:

$G$ : percentagem da mistura de agregados com diâmetro maior que 6,3 mm

$S$ : percentagem da mistura de agregados com diâmetro entre 6,3 e 0,315 mm

$s$ : percentagem da mistura de agregados com diâmetro entre 0,315 e 0,075 mm

$f$ : percentagem da mistura de agregados com diâmetro menor que 0,075 mm

A norma francesa (AFNOR, 2001) sobre os BBTM, define duas classes em função da percentagem de vazios da mistura determinada no ensaio com a PCG após 25 giros. Os BBTM classe 1 devem apresentar volume de vazios variando entre 12 e 20%, e 10 a 18% quando projetados com granulometria 0/6 e 0/10, respectivamente. Estas são as misturas do tipo BBTM tradicionalmente utilizadas, pois garantem textura superficial grossa ou aberta (altura média de mancha de areia entre 0,8 e 1,3 mm). O BBTM classe 2, é composto por mistura com volume de vazios variando entre 20 a 25% (granulometria 0/6) e 18 a 25% (granulometria 0/10), resultando em uma textura superficial muito grossa ou muito aberta (altura média de mancha de areia entre 1,2 a 2,0 mm) semelhante a dos revestimentos drenantes, conhecidos na França como BBDr. A Tabela 2.14 apresenta as composições típicas das misturas do tipo BBTM.

Tabela 2.14: Composições típicas de BBTM. Fonte: (BROSSEAUD, 2005)

Característica		BBTM	
		Classe 1	Classe 2
6/10 ou 4/6	(%)	70 – 80	79 – 85
0/2	(%)	20 – 30	17 – 22
Total de finos*:	(%)	7 – 9	4 – 7
Teor de ligante:	0/6 (%)	6,0 – 6,4	5,0 – 5,5
	0/10 (%)	5,5 – 6,0	4,5 – 5,5

\* % passante na peneira n° 200.

Os níveis 1 e 2 são estabelecidos para as etapas de dosagem do BBTM, conforme apresentado na Tabela 2.13. De acordo com a norma francesa NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001), basicamente três características das misturas são avaliadas para as duas classes de BBTM:

- a) compactidade ou volume de vazios na Prensa de Compactação e Cisalhamento Giratório – PCG NF EN 12697-31, (AFNOR, 2005);
- b) sensibilidade à ação da água pelo ensaio Duriez NF P 98-251-1, (AFNOR, 2002b). A sensibilidade é representada pela relação  $r/R$ , sendo (R) a resistência à compressão simples de um grupo de corpos-de-prova rompidos em temperatura ambiente de 18°C e 50% de umidade relativa do ar e (r) outro grupo de corpos-de-prova rompidos após a imersão em água a 18°C, ambos durante 7 dias;
- c) e estabilidade mecânica – avaliação da deformação permanente no simulador de tráfego de laboratório – LPC após 3000 ciclos a 60°C, NF EN 12697-22 (AFNOR, 2004).

A norma NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001) apresenta somente valores máximos permitidos para os resultados de deformação permanente. Observa-se que a versão anterior desta mesma norma estabelecia, além da avaliação da estabilidade mecânica, a verificação adicional da durabilidade da macrotextura superficial através do método PMT (*Profondeur Moyenne de Texture – Profundidade Média da Textura*) ou HS (*Hauterau Sable - Altura Média de Areia*), segundo NF EN 13036-1 (AFNOR, 2002a).

A relação entre os valores finais e iniciais de HS ou PMT, determinados, respectivamente após e antes do ensaio de deformação permanente (3000 ciclos a 60°C), deveria ser igual ou superior a 0,5 ( $HS_{\text{final}} / HS_{\text{inicial}} \geq 0,5$ ). Em outras palavras, as placas moldadas em laboratório após o ensaio deveriam conservar no mínimo 50% de sua macrotextura original.

Considerando o desempenho do BBTM, a atual norma XP P 98-137 (AFNOR, 2001) observa que:

- a) o teor de vazios “*in situ*” é de difícil determinação e pouco significativa em função da espessura delgada do revestimento;

- b) a avaliação da macrotextura superficial deve ser realizada “*in situ*” através do ensaio da mancha de areia segundo a norma NF EN 13036-1 (AFNOR, 2002a). Os valores mínimos de HS ou PMT devem estar compreendidos entre 0,7 e 0,9 mm para o BBTM 0/6 e 0/10, respectivamente.

Quanto à avaliação em pista, dois critérios podem ser considerados:

- a) aspecto e a integridade da superfície do revestimento – homogeneidade e degradações, tais como: exsudação do ligante, deformações e falhas decorrentes da má adesão-coesão do ligante ao agregado;
- b) e características relativas à segurança e conforto do usuário, tais como: macrotextura, atrito superficial, regularidade da superfície e ruído.

Os requisitos técnicos de dosagem para o BBTM e estabelecidos pela norma NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001), são apresentados na Tabela 2.15.

Tabela 2.15: Requisitos técnicos para o teor de vazios e características mecânicas do BBTM. Fonte: (AFNOR, 2001)

<i>Ensaio</i>	<i>BBTM 0/6</i>		<i>BBTM 0/10</i>	
	<i>Classe</i>		<i>Classe</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
Compactação com a prensa de compactação a cisalhamento giratório a 25 giros	12 a 20	20 a 25	10 a 18	18 a 25
Resistência à compressão simples Relação <sup>1</sup> : r(Mpa) /R(Mpa)	≥0,80%	≥0,80%	≥0,80%	≥0,80%
Estabilidade Mecânica Deformação Permanente (3000 ciclos)	≤20%	≤20%	≤15%	≤15%

<sup>1</sup> relação entre a resistência à compressão simples sem condicionamento (R) e a resistência à compressão simples com condicionamento em água (r)

As características superficiais mais importantes dos revestimentos do tipo BBTM são a forte aderência e a absorção acústica. As misturas BBTM com granulometria 0/6 garantem o maior nível de aderência em relação a qualquer outro tipo de revestimento asfáltico (RGRA, 2005).

Em função do ótimo desempenho da técnica do BBTM em relação à conservação da textura superficial, do perfil transversal (ausência de trilhas de rodas) e redução de ruído (< 76 dB),

com valores médios entre 74,3 dB (0 – 1 ano) e 73,9 dB (1 – 3 anos), Brosseau (2002) recomenda sua aplicação em rodovias e vias urbanas expressas.

No Brasil, em 2005, foi executada a reabilitação de um trecho na Rodovia Castelo Branco no estado de São Paulo (SP 280), empregando pela primeira vez um revestimento asfáltico projetado para atingir as características do BBTM. A rodovia Presidente Castelo Branco é uma rodovia de tráfego intenso, rápido e pesado, com pista dupla e três faixas de tráfego por sentido. A opção pela técnica foi estabelecida em função da necessidade de substituição da camada de microrrevestimento asfáltico a frio e pela possibilidade de aplicar camadas delgadas (20 a 30 mm) em média a cada 8 anos.

A graduação adotada para a mistura foi a 0/10 sendo composta por 77% de pedrisco, 16% de areia de brita e 7% de pó calcário. O ligante utilizado foi um asfalto modificado por 4% de polímero elastomérico do tipo SBS. O teor de ligante de projeto foi de 5,2% e a mistura resultante apresentou volume de vazios da ordem de 9% (FERREIRA, 2006).

A partir da experiência na execução do trecho de 50 km de extensão e espessura da camada acabada de 30 mm, concluiu-se que a usinagem da mistura BBTM deve ser realizada preferencialmente em usinas gravimétricas e que o controle de temperatura é fundamental em todas as etapas do processo. O BBTM foi aplicado na pista sobre uma camada de pintura de ligação com emulsão asfáltica modificada por polímero elastomérico e dosada na taxa de 0,4 l/m<sup>2</sup> de ligante residual. A compactação foi executada imediatamente após o lançamento da mistura na pista a 160°C por rolos tandem lisos de 10 toneladas de peso, sem necessidade de vibração (FERREIRA, 2006).

#### 2.2.7.2 BBUM

Em 1988, foram realizadas as primeiras aplicações de revestimentos asfálticos ultra delgados conhecidos na França como BBUM (*béton bitumineux ultra mince*). Estas misturas são derivadas de duas técnicas: a do BBTM para a composição da mistura asfáltica a quente e a dos tratamentos superficiais para a aplicação de um filme de ligante contínuo, com elevada dosagem (membrana elástica), que assegura a adesão e a impermeabilidade do revestimento. Tendo em vista suas condições de aplicação, a técnica deve ser considerada mais como um procedimento ou um sistema do que propriamente um material e, portanto, não possuem

normalização na França (BROSSEAUD, 2002). A camada de revestimento final do BBUM apresenta espessuras da ordem de 15 a 25 mm como mostra a Figura 2.5.



Figura 2.5: Espessura da camada de BBUM. Fonte: (METCALF e COSTELLO, 2006)

O material é aplicado a quente sobre uma superfície previamente selada com emulsão asfáltica elastomérica. Parte do ligante asfáltico residual da emulsão migra para dentro da mistura, preenchendo parte dos vazios do esqueleto mineral, formando uma membrana elástica e coesiva responsável pela adesão entre o revestimento e a camada subjacente. A emulsão elastomérica do sistema é aplicada simultaneamente com a mistura asfáltica através de uma acabadora especial ou na falta desse equipamento, pode ser substituída por um tratamento superficial simples com polímero ou um microrrevestimento asfáltico a frio, ambos com espessura acabada entre 5 a 6 mm de espessura.

Vários tipos de sistemas foram desenvolvidos principalmente na Europa e EUA, inclusive alguns com nomes comerciais. Em geral, a mistura asfáltica ultra delgada segue a mesma concepção do *Stone matrix asphalt* - SMA, isto é, com alta porcentagem de agregados graúdos (65-75% retido na peneira 2,35 mm) e elevada interação grão/grão, mas com menor conteúdo de ligante asfáltico e fíler. Em relação às misturas drenantes (camada porosa de atrito – CPA), são projetadas com maior quantidade de agregados miúdos e menor volume de vazios com o objetivo de reduzir a sua colmatção, bem como aumentar a estabilidade mecânica e a resistência ao cisalhamento da estrutura. Apresenta descontinuidade na graduação entre as peneiras de aberturas 4,75 e 2,36 mm que asseguram o contato grão-grão entre as partículas de agregados. Além da macrotextura superficial grossa, similar ao SMA, o

revestimento asfáltico ultra delgado apresenta vazios interconectados que melhoram a aderência pneu-pavimento, o escoamento superficial e o *spray* de água em períodos de chuvas intensas (PRETORIUS *et al.*, 2004).

Segundo Lau (2004) a redução da intensidade do ruído em pista molhada, entre outros fatores, é função da permeabilidade da mistura asfáltica. Tal qual ocorre na mistura asfáltica drenante - CPA, o escoamento da água superficial através dos vazios interconectados do revestimento asfáltico ultra delgado tende a reduzir os níveis de pressão sonora da via.

Segundo CALTRANS (2003a) e Bolzan (2001), o revestimento asfáltico ultra delgado pode ser empregado como camada de rolamento para a manutenção preventiva ou reabilitação de pavimentos flexíveis ou rígidos, sem comprometimento estrutural, com elevado volume de tráfego e velocidade diretriz alta. Também pode ser aplicado na construção de novos pavimentos a fim de melhor atender aos índices de segurança e conforto em relação às misturas asfálticas densas convencionais ou ainda, na composição de pavimentos de alto desempenho (denominados perpétuos no meio internacional), e que são projetados para durar 50 anos, com renovação periódica somente do revestimento asfáltico superficial.

Ainda segundo Bolzán (2009), as principais características da técnica são:

- a) combina resistência mecânica ao desgaste e à deformação permanente devido ao contato grão/grão dos agregados graúdos da mistura de graduação descontínua com a flexibilidade dos tratamentos delgados;
- b) apresenta textura e drenabilidade superficial (redução da lâmina de água na camada de rolamento) superiores ao concreto asfalto convencional, promovendo a melhoria das condições de aderência pneu-pavimento em pista molhada e, conseqüentemente de segurança dos usuários;
- c) diminuição do *spray* de água causado pela movimentação dos veículos, bem como da reflexão da luz dos faróis aumentando as condições de visibilidade em períodos chuvosos;
- d) rápida execução dos serviços de pavimentação, (20 a 30 mil m<sup>2</sup>/dia, em média), uma vez que a técnica segue o processo convencional, isto é, a mistura é realizada em usinas de asfalto, aplicada com acabadoras e compactada com rolos metálicos estáticos tipo tandem de 8 a 12 toneladas de peso;

- e) rápida liberação da pista ao tráfego, geralmente 30 minutos após a aplicação da mistura asfáltica, minimizando transtornos aos usuários, principalmente em vias expressas de alta velocidade ou urbanas sujeitas a frequentes congestionamentos;
- f) redução do nível de ruído em relação às misturas asfálticas densas convencionais em até 4 dB e de até 40% comparado a um tratamento superficial;
- g) economia e durabilidade – o revestimento asfáltico é aplicado em espessuras delgadas e apresenta boa durabilidade. Dependendo das condições existentes do pavimento pode-se prolongar sua vida útil entre 7 a 8 anos, reduzindo as intervenções de conservação e as interrupções ao tráfego. Não há necessidade de modificação dos perfis de sarjetas, superelevações, declividades transversais ou outros procedimentos que normalmente decorrem da elevação da cota do pavimento.

O revestimento asfáltico ultra delgado também pode ser produzido e aplicado segundo um grupo de tecnologias denominado de “*warm mix asphalt* – WMA” ou de mistura asfáltica morna. O emprego das misturas asfálticas tipo WMA vem crescendo nos últimos anos devido às maiores exigências em relação ao desenvolvimento sustentável e na preservação das condições de segurança, meio-ambiente e saúde – SMS (AGNUSDEI, 2011).

Os processos empregados para o WMA possibilitam a redução da temperatura de produção e de aplicação em cerca de 30°C, através de um melhor recobrimento dos agregados e compactação da mistura asfáltica com economia entre 15 a 30% do combustível necessário para a sua fabricação (NAPA, 2011).

Não obstante as vantagens anteriormente citadas, os revestimentos asfálticos ultra delgados são mais sensíveis em relação às misturas asfálticas densas convencionais no que se refere à qualidade dos materiais e processos construtivos; não corrigem defeitos estruturais do pavimento; apresentam capacidade de regularização superficial limitada em função de sua reduzida espessura e podem não apresentar desempenho satisfatório em áreas sujeitas a esforços cisalhantes de alta magnitude, como por exemplo: paradas de ônibus.

As misturas do tipo BBUM mais empregadas na França são compostas por agregados com granulometria 0/10 com descontinuidade na fração 2/6. Apresenta textura superficial muito grossa ou muito aberta (altura média de mancha de areia entre 1,3 a 1,8 mm). O BBUM 0/6, que apresenta descontinuidade na fração 2/4, é utilizado em menores proporções e apresenta textura superficial grossa ou aberta (altura média de mancha de areia entre 1,1 a 1,2 mm) (BROSSEAU, 1999).

Ainda segundo Brosseaud (1999), devido ao maior número de pontos de contato da textura superficial com os pneus dos veículos, o BBUM 0/6 é o revestimento asfáltico que apresenta as melhores características de resistência à derrapagem em baixa e em altas velocidades (40 a 120 km/h).

O ligante empregado é geralmente modificado por polímero elastomérico e os teores de projeto adotados podem variar entre 5,0 e 6,1% como mostra a Tabela 2.16. Um BBUM apresenta composições granulométricas intermediárias entre uma mistura drenante do tipo CPA e um BBTM. A taxa média de mistura asfáltica aplicada é da ordem de 25 a 35 kg/m<sup>2</sup>.

Tabela 2.16: Composições típicas de BBUM. Fonte: (BROSSEAUD, 2005)

<i>Característica</i>		<i>BBUM</i>
6/10 ou 4/6	(%)	70 – 85
0/2	(%)	15 – 28
Total de finos*:	(%)	4 – 7
Teor de ligante:	0/6 (%)	5,6 – 6,1
	0/10 (%)	5,0 – 5,6

\* % passante na peneira n° 200

As misturas do tipo BBUM são utilizadas como camada de rolamento em pavimentos não deformados e em boas condições estruturais. As deformações permanentes devem ser inferiores a 10 mm, medidos em campo com a treliça de 1,2 m ou régua de 3 metros; se superiores, uma microfresagem ou reperfilagem com massa asfáltica fina é recomendada.

Embora o BBUM não seja normalizado na França, seus requisitos técnicos de dosagem tendem a seguir os mesmos já descritos para o BBTM, conforme os procedimentos estabelecidos na respectiva norma NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001). O teor de ligante mínimo é similar ao do BBTM e obtido aplicando a Equação 2.1, com módulo de riqueza ( $k$ )



igual a 3,4 para a graduação BBUM 0/6 e 3,3 para a graduação BBUM 0/10. Como a espessura da camada aplicada é da ordem de 15 a 25 mm, não há muito sentido em avaliar a resistência ao afundamento em trilhas de roda, sendo o simulador de tráfego LPC utilizado principalmente para verificar a evolução da textura sob tráfego. De acordo com Brosseau (2002), a redução da altura média de mancha de areia após 3000 ciclos a 60°C de aplicação da carga não deve ser inferior a 50%.

Os procedimentos de usinagem e o transporte da mistura asfáltica do tipo BBUM são similares aos empregados para misturas asfálticas convencionais. Segundo Brosseau (2002), no início a técnica necessitou o desenvolvimento de equipamentos específicos para processo construtivo: uma vibro acabadora especial, como esquematizado na Figura 2.6, que possibilita a aplicação simultânea da emulsão asfáltica (membrana elástica de impermeabilização/ligação) com a mistura asfáltica ultra delgada a quente, acelerando o processo de evaporação da água da emulsão. Entretanto, assiste-se cada vez mais a aplicação com equipamentos polivalentes e tradicionais adaptando-se às condições de execução.

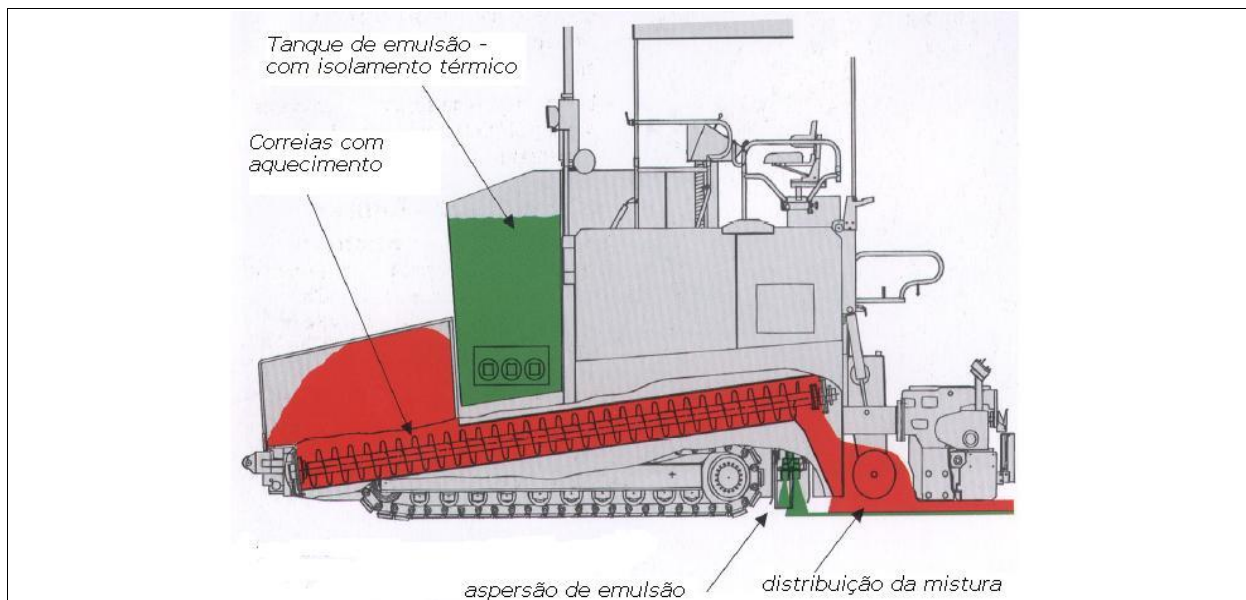


Figura 2.6: Equipamento para aplicação de BBUM. Fonte: (METCALF e COSTELLO, 2006)

Quando for utilizada a vibro acabadora especial, a camada de revestimento deve ser aplicada imediatamente após a aplicação da emulsão asfáltica em uma única passagem do equipamento, evitando o arrancamento da membrana de impermeabilização/ligação devido à

passagem de veículos durante o processo executivo. De acordo com Harris, Messmer e Hill (2006), o tráfego de equipamentos sobre a camada de emulsão pode gerar a formação de ondulações indesejáveis sobre a superfície.

A incorporação do ligante residual proveniente da emulsão asfáltica ao terço inferior do revestimento promove a elevada aderência com a camada subjacente e assegura a impermeabilização superficial da estrutura. A espessura superior (2/3) restante permanece com a textura superficial aberta e porosa para reduzir/eliminar o acúmulo de água na superfície do pavimento (BRENEMAN, 2006).

As funções de aderência e impermeabilização da membrana asfáltica à camada subjacente são garantidas pela camada de ligação, constituída de emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos com dosagem variando entre 600 e 800 g/m<sup>2</sup> de ligante residual. Devido à espessura ultra delgada do revestimento é fundamental a utilização de ligantes modificados para maior resistência a desagregação/arrancamento dos agregados e durabilidade da macrotextura superficial ao longo da vida de serviço do revestimento.

A Figura 2.7 apresenta de forma esquemática o processo de aplicação simultânea da emulsão asfáltica e da mistura asfáltica ultra delgada.

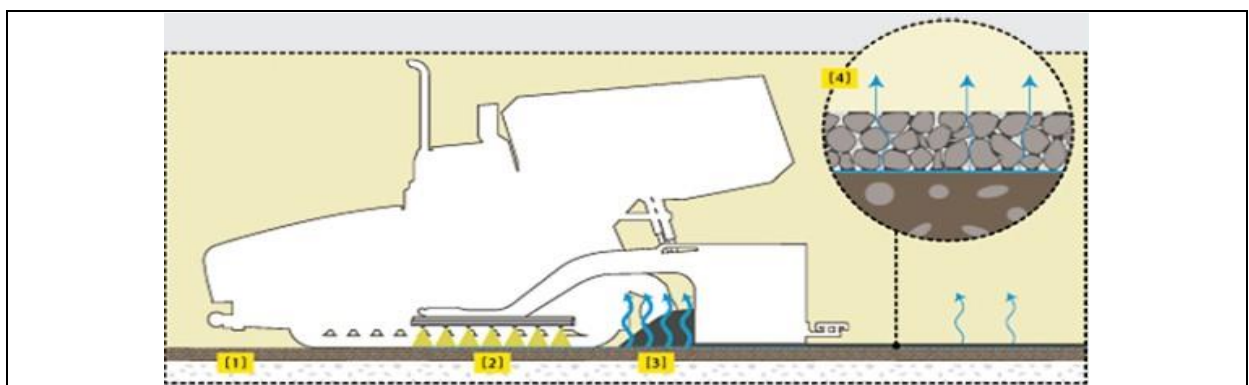


Figura 2.7: Processo de aplicação simultânea de emulsão asfáltica e da mistura asfáltica ultra delgada. Fonte: (WIRTGEN GROUP – VOGELE)

Conforme ilustrado na Figura 2.7, o processo de aplicação simultânea de emulsão asfáltica e da mistura asfáltica ultra delgada pode ser resumido nas seguintes etapas:

(1) A superfície remanescente deve ser previamente tratada através de microfresagem ou reperfilagem da estrutura;

(2) A emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida é espargida entre 70 a 80°C;

(3) Quando a mistura asfáltica ultra delgada (20 a 30 mm) é aplicada a quente (145° -170°C), ocorre o processo de ruptura, evaporação da maior parte da água da emulsão e aderência de uma membrana elástica de ligante residual à camada subjacente;

(4) A água remanescente da emulsão evapora através dos vazios (porosidade) da mistura asfáltica ultra delgada.

A Figura 2.8 ilustra a estrutura do revestimento tipo BBUM. Sua compactação é realizada com rolos lisos de 10 toneladas de peso, sem vibração, sendo necessárias entre 4 a 8 passadas (BROSSEAUD, 2005).



Figura 2.8: Estrutura do BBUM. Fonte: (METCALF e COSTELLO, 2006)

Brosseau (1999) relata a possibilidade de aplicação do BBUM empregando equipamentos convencionais, porém devem ser tomadas algumas precauções, especialmente em temperatura ambiente elevada, para garantir a integridade da camada de ligação com emulsão asfáltica elastomérica, tais como:

- a) reduzir a taxa de ligante residual aplicado;
- b) aplicar imediatamente sobre a camada de ligação 2 a 3 l/m<sup>2</sup> de agregado limpo de graduação 4/6 mm;

- c) utilizar emulsões modificadas por polímeros que não aderem aos pneus do caminhão basculante ou a acabadora durante a aplicação do revestimento;
- d) ou substituir a aplicação da emulsão elastomérica por um microrrevestimento asfáltico a frio (5 a 7 kg/m<sup>2</sup>), com espessura final ente 5 a 6 mm..

O revestimento asfáltico ultra delgado garante excelente aderência e drenabilidade, em função de sua forte textura superficial. As misturas de graduação 0/6 mm podem ser aplicadas em revestimentos asfálticos de vias expressas urbanas para a mitigação do nível de ruído gerado pelo tráfego. Segundo Serfass *et al.* (1991), estudos comparativos utilizando agregados de mesmo tamanho nominal máximo indicaram uma redução na energia acústica de 2 a 3 dB (A) (30 a 40%) para o revestimento do tipo BBUM em relação ao tratamento superficial simples.

A concepção técnica do BBUM tem sido utilizada no desenvolvimento de diversos produtos comerciais em vários países como Estados Unidos, Canadá, Austrália, Reino Unido, Espanha e Alemanha. No Reino Unido, os principais produtos disponíveis no mercado são o *Safepave*® (*Associated Asphalt*) e o *Combiphalt*® (*Colas Denmark*) (NICHOLLS, 2003). Os primeiros projetos empregando a técnica BBUM, originada na França, datam de 1991 e, em 10 anos, foram aplicados nesse país cerca de 40 milhões de m<sup>2</sup> (NICHOLLS, CARSWELL e WILLIAMS, 2002).

No início dos anos 1990, a empresa francesa SCREG *Routes* exportou a tecnologia, adaptada da concepção original do BBUM francês, para os EUA com a denominação comercial de *Novachip*®. Durante os anos subsequentes vários tipos de misturas asfálticas delgadas (SMA, CPA, *gap-graded*) e outros sistemas foram desenvolvidos e aplicados com resultados promissores em diversos programas de preservação de pavimentos (HANSON, 2001).

### 2.2.8 Revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD) - concepção norte-americana

Na América do Norte a técnica é denominada *Ultra Thin Bonded Hot-Mix Asphalt Wearing Course – UTBWC* (HANSON, 2001). O autor entende que o termo “revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD)” é mais adequado para o uso no Brasil devido às adaptações/modificações realizadas no BBUM original às normas técnicas e peculiaridades de cada país.

Segundo a concepção norte-americana, o RAUD é definido como uma mistura asfáltica de graduação descontínua (*gap-graded*), com elevada porcentagem de agregados graúdos recobertos por uma argamassa constituída de areia britada, fíler e ligante asfáltico, produzida e aplicada a quente sobre uma pintura de ligação com emulsão asfáltica. A espessura do revestimento é determinada pelo tamanho máximo do agregado da mistura asfáltica, em geral entre 12,5 a 20 mm.

O Departamento de Transportes do Alabama teve dois projetos de RAUD monitorados entre os anos de 1992 e 1995. As conclusões do estudo foram as seguintes (KANDHAL, 1996):

- a) a textura superficial do RAUD é muito similar a da camada drenante (CPA);
- b) não foram observados defeitos significativos nos dois projetos;
- c) e as superfícies avaliadas apresentaram valores de resistência à derrapagem e de macrotextura superficial maiores em relação ao concreto asfáltico convencional.

De acordo com Hanson (2001), o Departamento de Transportes do Missouri executou o RAUD em duas rampas de concreto de cimento Portland para acesso a rodovia (I-29 norte) na cidade do Kansas entre 1998 e 1999, com o objetivo de melhorar as condições de atrito e segurança. Relatórios da polícia estadual em 2000 indicaram redução de acidentes em pista úmida para ambas as rampas. Baseado na revisão da literatura e em conversações com o pessoal da indústria e dos órgãos rodoviários norte-americanos que executaram várias obras, Hanson recomenda que as trincas existentes no pavimento devem ser previamente seladas para o bom desempenho do RAUD e conclui que a técnica apresenta boas características de macrotextura, atrito e de drenabilidade superficial, bem como excelente retenção de agregados e adesão do revestimento a camada subjacente.

A seguir são apresentados os principais aspectos relacionados à seleção dos materiais e da graduação da mistura, procedimentos de dosagem, processo construtivo e controle tecnológico do RAUD de acordo com as adaptações norte-americanas.

### 2.2.8.1 Seleção dos materiais e da graduação da mistura

As especificações relativas aos agregados visam garantir o desempenho desejado. Por exemplo, a mistura deve apresentar intertravamento granular resistente ao cisalhamento, então partículas com faces britadas e de forma cúbica são fundamentais. Além disso, partículas lamelares reduzem a textura superficial da mistura e, portanto, devem ser evitadas.

Em geral as especificações norte-americanas para o RAUD recomendam agregados britados com tamanho máximo entre 6,2 a 12,5 mm. 90 a 100% do agregado graúdo (> 4,75 mm) devem ter uma ou mais faces fraturadas e pelo menos 85% devem possuir duas ou mais faces fraturadas. Devem apresentar perda por abrasão Los Angeles, ASTM C 131/06 (ASTM, 2006a), limitados a no máximo 35% e/ou 18% pelo método de ensaio Micro Deval úmido, sendo este, em geral, apenas realizado para fins informativos.

O limite máximo para a perda de durabilidade ou sanidade ao sulfato de sódio é de 15%, ASTM C 88/05 (ASTM, 2005). O agregado graúdo deve ser cúbico com no máximo 25% de partículas achatadas e alongadas quando a medida for realizada pelo paquímetro especial (razão 3:1 da maior dimensão em relação à menor dimensão, respectivamente) ou de no máximo 10% na razão comprimento/espessura de 5:1, segundo a norma ASTM D 4791 (ASTM, 2010a).

Para o agregado miúdo os valores mínimos de angularidade (conteúdo de vazios não compactados) conforme a ASTM C 1252/06 (ASTM, 2006b) e de equivalente de areia, segundo a norma ASTM D 2419 (ASTM, 2002a), estão limitados entre 40 ou 45%, e entre 45 a 50%, respectivamente. As especificações norte-americanas também recomendam que esses ensaios sejam realizados sobre a mistura de agregados do projeto e que a adição de fíler industrial (cal hidratada ou cimento Portland) seja limitada a no máximo 2% sobre o peso da mistura de agregados (HANSON, 2001; CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004).

A Tabela 2.17 apresenta as principais características avaliadas e os limites recomendados para os agregados utilizados para o RAUD segundo o Departamento de Transportes da Califórnia (CALTRANS, 2003a).

As especificações estabelecidas pelo Departamento de Transportes do Tennessee (TDOT, 2004), para os agregados graúdos e miúdos são apresentadas nas Tabelas 2.18 e 2.19,

respectivamente. O material de enchimento (fíler) deve ser constituído de material 100% passante na peneira 30 e pelo menos 75% passante na peneira 200.

Tabela 2.17: Propriedades dos agregados para uso em RAUD. Fonte: (CALTRANS, 2003a)

<i>Ensaio</i>	<i>Método</i>	<i>Especificação</i>
Porcentagem de partículas britadas		
Agregado graúdo, (% mínima)	Califórnia Test 205 <sup>(a)</sup>	90
Agregado miúdo, passante 4,75 mm e retido 2,36 mm (% mínima)	Califórnia Test 205 <sup>(a)</sup>	85
Vazios (angularidade) (% mínima) <sup>(b)</sup>	AASHTO T304 (A)	45
Índice de forma, 3:1 (% máxima)	ASTM D 4791	25
Abrasão Los Angeles, perda após 500 revoluções (% máxima)	Califórnia Test 211	35
Equivalente de areia		
Limite de aceitação (% mínima)	Califórnia Test 217	47
Faixa de trabalho (% mínima)	Califórnia Test 217	50

a) Na Seção D da metodologia Califórnia Test 205, a definição de uma partícula britada é revisada como: “Uma partícula com duas ou mais faces fraturadas mecanicamente pode ser considerada uma partícula britada”.

b) Se o agregado miúdo é 100% britado, o uso de material britado deve ser monitorado durante o processo produtivo. Se a fração fina é uma combinação de material britado e materiais naturais, a angularidade do agregado miúdo deve ser monitorada durante o processo.

Tabela 2.18: Características dos agregados graúdos para uso em RAUD. Fonte: (TDOT, 2004)

<i>Ensaio</i>	<i>Método</i>	<i>Limite</i>
Perda por abrasão Los Angeles (%)	ASTM C 131	35 máx
Índice de forma, 3:1 (%)	ASTM D 4791	25 máx
% britada, uma face	ASTM D 5871	95 mín
% britada, duas faces	ASTM D 5821	85 mín

Tabela 2.19: Características dos agregados miúdos para uso em RAUD. Fonte: (TDOT, 2004)

<i>Ensaio</i>	<i>Método</i>	<i>Especificação</i>
Equivalente de areia	ASTM D 2419	> 45
Vazios não compactados (angularidade)	ASTM C 1252	> 40

O CALTRANS (2003a), recomenda ligantes modificados para utilização em revestimentos asfálticos ultra delgados. São diferenciados pelo grau de modificação proporcionados pelo polímero e sua seleção é baseada nas condições climáticas encontradas no Estado da Califórnia. Em geral, o teor de ligante de projeto para o RAUD varia entre 5,2 a 5,8% em

peso. A emulsão asfáltica também deve ser modificada por polímeros e aplicada com taxas variando entre  $0,85 \pm 0,3$  l/m<sup>2</sup>, dependendo do tipo de substrato. Por exemplo, se o pavimento estiver oxidado sua taxa deve ser aumentada; se estiver com a superfície exsudada a taxa deve ser diminuída. A função da emulsão é selar pequenas trincas (< 6,0 mm) e assegurar a perfeita adesão do revestimento à camada subjacente do pavimento (HANSON, 2001).

As características da emulsão asfáltica para a aplicação em camadas asfálticas ultra delgadas, segundo o CALTRANS (2003a), são mostradas na Tabela 2.20. A emulsão asfáltica utilizada na camada de ligação é de ruptura rápida e modificada com polímeros elastoméricos. A natureza descontínua da mistura permite a rápida eliminação da água e cura da emulsão.

Tabela 2.20: Características da emulsão asfáltica para uso em RAUD. Fonte: (CALTRANS, 2003a)

Especificação	Método de ensaio	Requisito	
		Mínimo	Máximo
Viscosidade Saybolt-Furol, 25°C (s)	ASTM D 244	20	100
Peneiramento emulsão virgem (%)	ASTM D 244	---	0,05
Estabilidade a estocagem, 24h <sup>(a)</sup>	ASTM D 244	---	1
Resíduo de evaporação (%)	Califórnia Test 331	63	---
Solubilidade em solvente orgânico (%)	ASTM D 2042	97,5	---
Recuperação torcional, 25°C (%)	Califórnia Test 332	30	---
Penetração do resíduo da emulsão , 25°C (0,01 mm)	ASTM D 5	70	200

a) Após repouso de 24h, a superfície não deve apresentar substância leitosa. O solvente orgânico deve fazer parte da lista do *Transportation Laboratory*.

O Departamento de Transportes do Tennessee também possui especificações para o RAUD. Os ligantes asfálticos recomendados para a formulação da mistura são: PG 76-22 ou PG 70-22, segundo a especificação norte-americana *SUPERPAVE*® (TDOT, 2004). A emulsão asfáltica para execução da camada de ligação deve ser modificada por polímeros elastoméricos e atender aos requisitos apresentados na Tabela 2.21.

Segundo Hanson (2001), a graduação da mistura de agregados para o RAUD é selecionada em função do nível de tráfego e das condições da superfície do pavimento. As graduações típicas utilizadas nos EUA são apresentadas na Tabela 2.22.



Tabela 2.21: Características para a emulsão asfáltica para uso em RAUD. Fonte: (TDOT, 2004)

<i>Ensaio na emulsão</i>	<i>Método</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Viscosidade Saybolt-Furol, 50°C (s)	ASTM D 244	25	125
Estabilidade a estocagem, 24h (%) <sup>*</sup>	ASTM D 244	---	1,0
Peneiramento (%)	ASTM D 244	---	0,05
Resíduo de destilação (%)	ASTM D 244	63	---
Solvente destilado (%)	ASTM D 244	---	2,0
Desemulsibilidade (%) 35 ml, 0,8% dioctilsulfosuccinato de sódio	ASTM D 244	60	---
<i>Ensaio sobre o resíduo de destilação</i>			
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s (0,01 mm)	ASTM D 5	90	150
Solubilidade em solvente orgânico (%)	ASTM D 2042	97,5	---
Recuperação elástica, 10°C <sup>**</sup>	ASTM D 6084	58	---

\* Após repouso de 24h, a superfície não deve apresentar substância leitosa.

\*\* A temperatura de ensaio é 10°C, tempo de relaxação de 5 min e a elongação 20 cm.

Tabela 2.22: Faixas granulométricas para o RAUD. Fonte: (HANSON, 2001)

<i>Peneiras</i>		<i>6,2 mm (1/4") - Tipo A</i>		<i>9,5 mm (3/8") - Tipo B</i>		<i>12,5 mm (1/2") - Tipo C</i>	
<i>(mm)</i>	<i>ASTM</i>	<i>Limites (%passando)</i>	<i>Tolerância (%)</i>	<i>Limites (%passando)</i>	<i>Tolerância (%)</i>	<i>Limites (%passando)</i>	<i>Tolerância (%)</i>
19	3/4"	-				100	
12,5	1/2"	-		100		85-100	± 5
9,5	3/8"	100		85-100	± 5	60-80	± 4
4,75	#4	40-55	± 4	28-38	± 4	28-38	± 4
2,36	#8	22-32	± 4	25-32	± 4	25-32	± 4
1,18	#16	15-25	± 3	15-23	± 3	15-23	± 3
0,60	#30	10-18	± 3	10-18	± 3	10-18	± 3
0,30	#50	8-13	± 3	8-13	± 3	8-13	± 3
0,15	#100	6-10	± 2	6-10	± 2	6-10	± 2
0,075	#200	4-7	± 2	4-7	± 2	4-7	± 2

As Tabelas 2.23 e 2.24 apresentam as faixas granulométricas propostas pelo CALTRANS para utilização em revestimentos asfálticos ultra delgados com diâmetro máximo nominal de 12,5 mm e 9,5 mm, respectivamente.

A graduação com tamanho máximo nominal de 12,5 mm é recomendada para rodovias de alto volume de tráfego e a graduação com tamanho máximo nominal de 9,5 mm é utilizada em vias urbanas para redução do ruído do tráfego e rodovias secundárias (CALTRANS, 2003a).

O Departamento de Transportes do Tennessee (TDOT, 2004), estabelece três faixas granulométricas conforme apresentado na Tabela 2.25. A mistura de agregados não deverá conter material reciclado ou areia natural.

Tabela 2.23: Graduação faixa CALTRANS 12,5 mm para RAUD. Fonte: (CALTRANS, 2003a)

Tamanho do grão (mm)	Porcentagem Passante 12,5 mm		
	Limites	Faixa de trabalho	Limite de Aceitação
19	---	100	100
12,5	---	85 – 100	82 – 100
9,5	60 – 80	X ± 5	X ± 8
4,75	28 – 38	X ± 4	X ± 8
2,36	25 – 32	X ± 4	X ± 6
,18	15 – 23	X ± 3	X ± 5
0,6	10 – 18	X ± 3	X ± 5
0,3	8 – 13	X ± 3	X ± 5
0,15	---	5 – 11	4 – 12
0,075	---	3 – 8	2 – 9

Tabela 2.24: Graduação faixa CALTRANS 9,5 mm para RAUD. Fonte: (CALTRANS, 2003a)

Tamanho do grão (mm)	Porcentagem Passante 9,5 mm		
	Limites	Faixa de trabalho	Limite de Aceitação
12,5	---	100	100
9,5	---	85 – 100	82 – 100
4,75	28 – 38	X ± 4	X ± 8
2,36	25 – 32	X ± 4	X ± 6
1,18	15 – 23	X ± 3	X ± 5
0,6	10 – 18	X ± 3	X ± 5
0,3	8 – 13	X ± 3	X ± 5
0,15	---	5 – 11	4 – 12
0,075	---	3 – 8	2 – 9

Tabela 2.25: Graduação dos agregados faixa Tennessee para RAUD. Fonte: (TDOT, 2004)

Peneiras ASTM	1/4" Tipo A % passante	3/8" Tipo B % passante	1/2" Tipo C % passante
3/4"	---	---	100
5/8"	---	100	---
1/2"	---	90 – 100	75 – 100
3/8"	100	75 – 100	50 – 80
Nº4	40 – 55	25 – 38	25 – 38
Nº.8	22 – 32	19 – 27	19 – 27
Nº16	15 – 25	15 – 23	15 – 23
Nº30	10 – 18	10 – 18	10 – 18
Nº50	8 – 13	8 – 13	8 – 13
Nº100	6 – 10	6 – 10	6 – 10
Nº200	4 – 7	4 – 7	4 – 7
Teor de ligante	5 – 6,2	4,8 – 6,2	4,6 – 6,2

### 2.2.8.2 Dosagem da mistura asfáltica

O desempenho de uma camada ultra delgada depende da qualidade dos materiais utilizados e da sua interação durante a aplicação, compactação e após a abertura ao tráfego. O objetivo do projeto de dosagem é determinar a quantidade necessária de ligante para assegurar uma adequada espessura do filme de asfalto que recobre os agregados e, conseqüentemente, garantir a durabilidade da mistura.

Hanson (2001) recomenda que o teor de ligante do projeto seja estabelecido para um teor de vazios da mistura de aproximadamente 10% e espessura mínima do filme de ligante de 10  $\mu\text{m}$ . Já os Departamentos de Transportes norte-americanos do Tennessee (TDOT, 2004), e do Texas (TxDOT, 2004), determinam para a estimativa do teor de ligante de projeto que a espessura da película de asfaltos que recobre as partículas de agregados seja de no mínimo 9  $\mu\text{m}$ .

A metodologia de obtenção dos parâmetros volumétricos de dosagem da mistura ultra delgada preconizada pelo TxDOT é baseada na metodologia de cálculo do Instituto do Asfalto norte-americano, MS – 2 (ASPHALT INSTITUTE, 1995), e pode ser resumida nas seguintes etapas:

- a) seleção dos materiais e da graduação da mistura;
- b) determinação das massas específicas reais, aparentes e absorção dos agregados, massa específica do ligante ( $G_b$ ), massa específica aparente da mistura de agregados ( $G_{sb}$ ) e da massa específica máxima medida da mistura asfáltica ( $G_{mm}$ );
- c) moldagem e compactação de corpos de prova da mistura com teores ( $T$ ) de ligante asfáltico no compactador *SUPERPAVE*® estabelecendo 50 giros para evitar a quebra excessiva de agregados. Por exemplo:  $T_s$  e  $T_{s\pm 1,0\%}$ , onde  $T_s$  é o teor sugerido de ligante baseado na experiência do projetista;
- d) determinação da massa específica aparente ( $G_{mb}$ ), da massa específica efetiva da mistura de agregados ( $G_{se}$ ), do teor vazios do agregado mineral (VAM), teor de ligante absorvido ( $P_{ba}$ ) e efetivo ( $P_{be}$ ), bem como o teor de vazios da mistura asfáltica para os 03 teores de ligantes previamente estabelecidos;

- e) determinação do teor de ligante de projeto (Pb) com base nos seguintes requisitos: espessura mínima do filme de asfalto (FT) correspondente a 9  $\mu\text{m}$  e teor de vazios entre 8 e 15% ou relação massa específica aparente (Gmb) / massa específica máxima medida (Gmm) da mistura asfáltica entre 85 e 92%, conforme mostra a Figura 2.9.

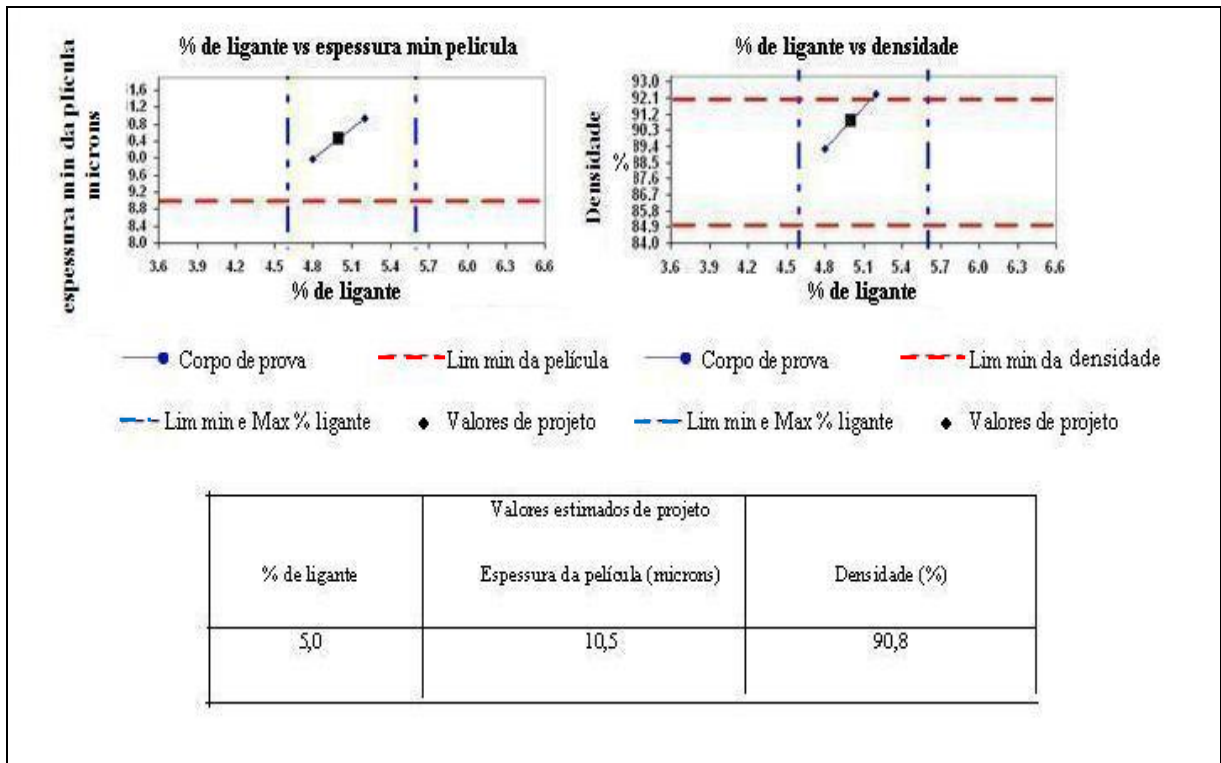


Figura 2.9: Exemplo de determinação do teor de ligante de projeto (Pb) com base na espessura do filme de ligante (FT) e teor de vazios (ou relação Gmb/Gmm) da mistura asfáltica. Baseado em: (TxDOT, 2004)

Para a determinação da espessura do filme de ligante asfáltico os seguintes passos devem ser seguidos:

- a) usando os fatores de áreas superficiais para as aberturas de peneira especificadas, calcula-se a área superficial dos agregados na mistura. Se a graduação dos agregados apresenta tamanhos diferentes, faz-se uma interpolação para estimar a porcentagem passando pelas peneiras estabelecidas na Tabela 2.26. Deve-se então multiplicar cada porcentagem passando pelo respectivo fator de área. Somando as áreas individuais em cada peneira é obtida a área superficial total (SA) em  $\text{m}^2/\text{kg}$  conforme a equação 2.6.

Tabela 2.26: Fatores de área superficial para cálculo da espessura de ligante. Fonte: (ASPHALT INSTITUTE, 1995)

<i>Abertura da peneira (mm)</i>	<i>Fator de área (m<sup>2</sup>/kg)</i>
4,75 mm	0,41
2,36 mm	0,82
1,18 mm	1,64
600 μm	2,87
300 μm	6,14
150 μm	12,29
75 μm	32,77

$$SA = \frac{0,41 + (\%P\#4)0,41 + (\%P\#8)0,82 + (\%P\#16)1,64 + (\%P\#30)2,87 + (\%P\#50)6,14 + (\%P\#100)12,29 + (\%P\#200)32,77}{100} \quad (2.6)$$

Onde:

SA: área superficial da mistura de agregados, m<sup>2</sup>/kg

%P#i: agregados passando pela peneira #i, %

b) o teor de ligante asfáltico absorvido pela mistura de agregados é obtido, conforme a Equação 2.7.

$$P_{ba} = 100 \cdot G_b \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \cdot G_{se}} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

P<sub>ba</sub>: teor de ligante asfáltico absorvido pela mistura de agregados, %;

G<sub>b</sub>: massa específica do ligante asfáltico, g/cm<sup>3</sup>;

G<sub>se</sub>: massa específica efetiva da mistura de agregados, g/cm<sup>3</sup>;

G<sub>sb</sub>: massa específica aparente da mistura de agregados, g/cm<sup>3</sup>.

c) o teor de ligante asfáltico efetivo da mistura da mistura asfáltica é obtido, conforme a Equação 2.8:

$$P_{be} = P_b - P_{ba} \left( \frac{100 - P_b}{100} \right)$$

(2.8)

Onde:  $P_{be}$ : teor de ligante efetivo da mistura asfáltica, % ;

$P_b$ : teor de ligante da mistura asfáltica, g/cm<sup>3</sup>;

$P_{ba}$ : teor de ligante absorvido pela mistura de agregados, % .

d) a espessura do filme de ligante asfáltico que recobre os agregados da mistura é obtida conforme a Equação 2.9.

$$FT = \frac{\left( \frac{P_{be}}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{P_{be}}{100} \right)} \cdot \frac{10^6}{SA \cdot G_s} \quad (2.9)$$

Onde:

FT: espessura do filme de ligante asfáltico, μm;

$P_{be}$ : teor de ligante efetivo da mistura asfáltica, %;

SA: área superficial da mistura de agregados, m<sup>2</sup>/kg;

$G_s$ : massa específica do ligante asfáltico, g/cm<sup>3</sup>.

O Instituto do Asfalto norte-americano, MS – 2 (ASPHALT INSTITUTE, 1995), recomenda que a Equação 2.9 seja somente utilizada para a determinação teórica ou estimada da quantidade de asfalto necessária para uma boa durabilidade da mistura. Os fatores de área superficial da Equação 2.6 não levam em consideração a forma dos agregados e a mistura quando compactada, apresenta partículas finas de agregados que compartilham do mesmo filme de ligante (mástique), isto é, não estão isoladas, como assumido nos cálculos. Portanto, é necessário verificar se o teor de ligante, obtido através dos requisitos volumétricos do

projeto de dosagem, atende a espessura mínima de asfalto requerida para recobrir os agregados da mistura.

As especificações do CALTRANS (2003a), TDOT (2004) e do TxDOT (2004) para o RAUD determinam que na etapa final da dosagem da mistura asfáltica sejam avaliadas, no teor de ligante de projeto, as seguintes características:

- a) resistência ao dano por umidade induzida, segundo o método Lottmann modificado (ASTM D 4867/ D4867M/09c );
- b) sensibilidade ao escorrimento do ligante (ASTM D 6390/11).

O TxDOT (2004) e o National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 2011), também recomendam verificar a durabilidade da mistura através do ensaio de desgaste por abrasão Cantabro, NBR 15140 (ABNT, 2004d). O ensaio Cantabro avalia indiretamente a qualidade e quantidade de ligante asfáltico do projeto da mistura.

Os valores limites estabelecidos para os ensaios de resistência ao dano por umidade induzida e sensibilidade ao escorrimento estão compilados na Tabela 2.27.

Tabela 2.27: Características e valores limites a serem verificados no teor de ligante de projeto do RAUD. Fonte: (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004 e NCHRP, 2011)

<i>Características</i>	<i>Métodos</i>	<i>Valores (%)</i>	
		<i>Min.</i>	<i>Máx.</i>
Resistência ao dano por umidade induzida *	ASTM D 4867/D4867M/09c ou NBR 15617/2011	70 a 80	---
Sensibilidade ao escorrimento **	ASTM D 6390/99	---	0,1 a 0,3
Ensaio de desgaste por abrasão Cantabro	NBR 15140/2004	---	15 a 20

\* O ensaio deve ser realizado segundo a ASTM D 4867/D4867M/09c com as seguintes alterações: (i) corpos de prova compactados com 50 giros; (ii) não há valores limites estabelecidos para o teor de vazios; (iii) não há valores limites estabelecidos para a saturação, porém vácuo de 660 mm de Hg deve ser aplicado por 10 minutos ao corpo de prova e (iv) os corpos de prova são mantidos submersos em água durante o ciclo de congelamento/descongelamento.

\*\* O ensaio deve ser realizado segundo a ASTM D 6390/99 com as seguintes alterações: (i) o cesto cilíndrico deve ser confeccionado com tela metálica de abertura 2,36 mm e (ii) a temperatura de realização do ensaio deve ser a prevista para a produção da mistura asfáltica

### 2.2.8.3 Processo construtivo

O uso do RAUD é recomendado para pavimentos em bom estado estrutural, para melhoria principalmente da aderência pneu-pavimento, cujos defeitos (buracos; trincas superiores a 6,0 mm, em bloco ou do tipo “couro de jacaré”; trilhas de rodas superiores a 12 mm; entre outros) já tenham sido previamente identificados e tratados.

A curva granulométrica descontínua da mistura favorece a segregação e/ou escorrimento do ligante, portanto, o tempo de armazenamento e/ou transporte da massa asfáltica não deve exceder a 04 horas. Devido à espessura ultra delgada do revestimento e a umidade do ligante residual da emulsão, o tempo para o espalhamento e compactação da mistura é crítico. Essas temperaturas medidas na pista, em geral são da ordem de 165 e 140°C, respectivamente. Temperaturas de espalhamento superiores a 177°C e de compactação inferiores a 135°C não são permitidas. A temperatura final de compactação não deve ser inferior a 90°C (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004).

As operações do processo construtivo devem ser realizadas de forma rápida, contínua, integrada e imediatamente após a aspersão da emulsão asfáltica, reduzindo ao máximo o tempo de resfriamento da mistura, as paradas da vibro acabadora e os trabalhos manuais. A vibro acabadora deve ser capaz de espalhar a mistura em velocidades da ordem de 15 a 25 m/min. A compactação é realizada com 4 a 8 passagens de 02 rolos lisos tandem (>10 toneladas de peso), sem vibração, posicionados em comboio e imediatamente atrás da vibro acabadora. O processo de rolagem tem por finalidade apenas o assentamento dos agregados e, portanto, não há requisitos técnicos a serem atendidos em relação ao grau de compactação em pista. Em geral, o serviço pode ser liberado ao tráfego quando a temperatura da mistura for inferior a 75°C (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004).

### 2.2.8.4 Controle tecnológico

O controle tecnológico do serviço deve incluir no mínimo os seguintes itens:

- a) taxa de espalhamento da membrana de emulsão asfáltica;
- b) taxa de espalhamento da mistura asfáltica;
- c) teor de ligante asfáltico e graduação da mistura;
- d) e avaliação das características de aderência da pista (macro e microtextura).



A frequência dos ensaios deve ser estabelecida de acordo com as especificações técnicas do contratante.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DA TEXTURA SUPERFICIAL RELACIONADAS À ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

A principal propriedade do pavimento no que diz respeito à segurança é a sua capacidade de proporcionar condições adequadas de aderência e atrito entre a sua superfície e os pneus do veículo sob efeito das solicitações de aceleração, frenagem e mudanças de direção durante sua condução. A maioria dos pavimentos asfálticos apresentam níveis satisfatórios de aderência em condições de pista seca. A resistência à derrapagem se torna crítica pelo aumento da velocidade dos veículos em condições de pista molhada e com uso de pneus inadequados para facilitar o escoamento da água e o contato com a superfície.

A textura da superfície está relacionada às condições de macro e microtextura da camada de rolamento. A microtextura é decorrente dos pontos de contato da superfície do agregado, expostos na superfície do revestimento, com os pneus dos veículos, em pista molhada. A profundidade da macrotextura indica os canais entre os agregados que são capazes de promover a drenagem, reduzindo a lâmina de água entre a superfície de rolamento e os pneus dos veículos e, conseqüentemente, o risco de hidroplanagem.

Em presença de água, as más condições da superfície de rolamento podem conduzir a perda de aderência pneu/pavimento, reduzindo o controle da frenagem do veículo e da manutenção na trajetória desejada. Em pavimentos com seção transversal exibindo pequena declividade, e quando a profundidade das trilhas de roda atinge cerca de 13 mm, criam-se condições para que o armazenamento de água seja suficiente para uma potencial situação de hidroplanagem (DNIT, 2006a).

Aps (2006) classificou as combinações entre a microtextura e a macrotextura em quatro tipos, respectivamente: rugosa & aberta; rugosa & fechada; polida & aberta e polida & fechada.

Conforme a autora citada, o ideal é que a camada de rolamento apresente textura rugosa e aberta, admitindo-se, dependendo da situação, textura rugosa & fechada ou polida & aberta, devendo ser evitada a condição de textura polida & fechada. A Figura 2.10 esquematiza o tipo de superfície em função da classe de macrotextura e microtextura


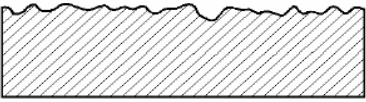
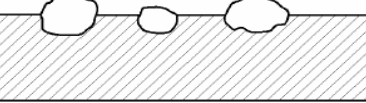
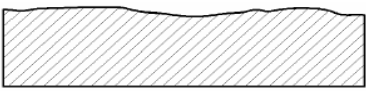
Microtextura	Macrotextura	Superfície	Tipo de Textura
Rugosa	Aberta		Rugosa e Aberta
	Fechada		Rugosa e Fechada
Polda ou Lisa	Aberta		Polda e Aberta
	Fechada		Polda e Fechada

Figura 2.10: Tipo de superfície em função da classe de macrotextura e microtextura.  
Fonte: (APS, 2006)

Em relação ao aspecto da textura superficial, quando as partículas de agregados se projetam para fora da superfície do revestimento (tratamentos superficiais e microrrevestimento asfáltico a frio, por exemplo) a textura superficial é denominada “positiva”. Por outro lado, uma textura superficial “negativa” pode ser formada quando os vazios entre as partículas dos agregados encontram-se abaixo do plano superficial do revestimento. A textura superficial negativa é principalmente observada nos revestimentos asfálticos executados a quente, tipo CA, SMA, CPA, entre outros. Revestimentos com textura superficial positiva estão mais expostos ao desgaste em relação aos de textura superficial negativa cujas partículas permanecem menos expostas ao tráfego e intertravadas pela estrutura mineral da mistura asfáltica (HUNTER, 2000).

Existe uma interdependência entre a textura superficial, a qualidade dos agregados, a graduação adotada, o processo de produção e a aplicação dos revestimentos asfálticos. No tocante à influência da composição granulométrica verifica-se que com o aumento do tamanho nominal máximo do agregado utilizado e a diminuição da proporção de material com diâmetro inferior a 2,00 mm (agregado miúdo) na composição da mistura, a macrotextura superficial é aumentada. Esses dois fatores por si só não garantem a manutenção da mesma, é necessário selecionar agregados de qualidade quanto à limpeza, resistência mecânica e forma, bem como adequar a proporção de cada componente na mistura asfáltica.

Embora o ligante tenha pouca influência na formação da textura superficial, o emprego de asfaltos modificados assegura a manutenção e a durabilidade das características relacionadas à aderência pneu-pavimento, principalmente em rodovias com elevado volume de tráfego e maior velocidade diretriz (LCPC, 2007).

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfáltico (DNIT, 2006a), e a especificação de serviço 031/2006 ES (DNIT, 2006b) estabelecem padrões de exigência com relação às características de segurança para os serviços de pavimentação em concreto asfáltico – CA. Os seguintes valores limites para a avaliação das condições de aderência pneu/pavimento devem atendidos:

- a) profundidade média da macrotextura entre 0,6 a 1,2 mm (textura média a grosseira) determinada pelo método volumétrico de Altura de Areia (HS), segundo a norma ASTM E 965/96 (ASTM, 2001c);
- b) e resistência à derrapagem (VRD) igual ou maior que 45 (superfície medianamente rugosa a rugosa), determinado com o Pêndulo Britânico, segundo a norma ASTM E 303/93 (ASTM, 1998).

O concreto asfáltico (CA) é o tipo de revestimento mais empregado no país para a camada de rolamento, e apresenta graduação densa, bem graduada. Entretanto, tendem a apresentar pobres características de durabilidade da macrotextura superficial, observando-se o seu fechamento ao longo do tempo de operação da via (valores médios de altura de areia - HS entre 0,3 a 0,7 mm).

De acordo com Aps *et al.*(2003c), a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) recomenda que a macrotextura superficial das pistas de aeronaves (HS) não deverá ser inferior a 0,5 mm e para pavimentos novos 1,0 mm. A Organização da Aviação Civil (OACI) recomenda HS = 1,0 mm para superfície de pavimentos novos e  $HS \geq 0,4$  mm para o nível de manutenção.

Uma boa macrotextura para a camada de rolamento pode ser obtida substituindo as curvas granulométricas contínuas tradicionais por outras de tipo descontínuo mediante a eliminação total ou parcial de alguma fração da graduação a ser utilizada. As curvas granulométricas descontínuas, com ênfase àquelas que proporcionam descontinuidade entre as frações 2/6 mm

ou 2/4 mm, tendem a gerar o efeito desejado na textura da superfície de rolamento, pois é esta fração "faltante" que irá propiciar a existência de espaços entre o material de tamanho superior a 2,00 mm e maior contato entre eles dentro da graduação adotada para o projeto de dosagem. Criam-se assim, caminhos preferenciais para a drenabilidade superficial da água, minimizando as condições para a ocorrência de hidroplanagem, do *spray* de água e, conseqüentemente, de acidentes rodoviários em condições de velocidade elevada em pista molhada.

A seleção de curvas granulométricas descontínuas para as misturas tipo CPA, SMA, *gap-graded*, BBTM, BBUM deve atender aos seguintes requisitos:

- a) diâmetro nominal máximo em função da espessura da camada;
- b) descontinuidade da curva granulométrica em função de limites de porcentagem passante principalmente nas frações 2/6 ou 2/4 mm;
- c) e quantidade de finos adequada para compatibilizar as características volumétricas, mecânicas e funcionais desejadas (vazios no agregado mineral, teor de vazios, resistência à tração, ao desgaste e a água, macro e microtextura adequadas, redução de ruído, entre outras).

Segundo Brosseau (2006), os revestimentos asfálticos com níveis elevados de aderência em altas velocidades apresentam as seguintes características :

- a) granulometrias descontínuas entre 2/6 ou 2/4 mm;
- b) fração granulométrica passante na peneira 2 mm inferior a 30%;
- c) espessura delgada a muito delgada (inferior a 40 mm);
- d) agregados com boa resistência ao polimento e tamanho nominal máximo de 6 ou 10 mm;
- e) valores de macrotextura superiores a 0,7 mm, quando medidos através do ensaio da mancha de areia (HS); e de microtextura superiores a 50, quando medidos através do Pêndulo Britânico (VRD).

Também o MRAF é projetado para apresentar macrotextura superficial de média a rugosa, com valores médios de altura de areia (HS) entre 0,8 a 1,2 mm, com a finalidade de melhorar a resistência à derrapagem, o spray de água e a reflexão das luzes dos faróis em dias chuvosos. A concepção da textura superficial positiva do MRAF depende das características dos agregados e da seleção de faixas granulométricas, em geral contínuas, compatíveis com o tipo e velocidade do tráfego. A quantidade de partículas com tamanho superior a 1 mm, as graduações mais grossas com maior tamanho máximo, bem como a forma cúbica dos agregados são características importantes na definição de sua macrotextura superficial. Para uma dada graduação, a macrotextura superficial diminui com o aumento da espessura da camada, com o aumento do teor de ligante asfáltico e durante a vida de serviço do MRAF. A homogeneidade e a uniformidade do processo de aplicação também são relevantes. O MRAF é distribuído sob a forma de uma argamassa com consistência adequada para propiciar deposição contínua de ligante asfáltico residual sobre a superfície e contato das partículas de maior dimensão com os pneus dos veículos (NASCIMENTO e REIS, 2003).

Os autores citados propõem que os valores limite de macrotextura superficial e de resistência à derrapagem estabelecidos para o concreto asfáltico também sejam adotados às demais especificações de serviços de revestimento para pavimentos, conforme já exigido por grande parte das concessionárias de rodovias do país em suas especificações particulares.

Para a avaliação da condição de aderência do pavimento são realizadas medições através de diversos equipamentos e métodos de avaliação, conforme o país ou administração. No Brasil, os procedimentos de ensaios mais correntes são descritos a seguir.

### 2.3.1 Avaliação da macrotextura - mancha de areia

A macrotextura de um pavimento se refere às asperezas superficiais em consequência das rugosidades dos agregados, com comprimento de onda de 0,5 a 50 mm e amplitude de 0,2 a 10 mm, dimensões estabelecidas pela norma ASTM E 867/02 (2002b). Portanto, características do agregado como a distribuição granulométrica, forma e tamanho influem nessa propriedade, assim como a dosagem da mistura e o processo construtivo do revestimento (SPECHT *et al.*, 2007).

Dentre as diversas maneiras de se medir a macrotextura, a mais difundida é o ensaio denominado Mancha de Areia, normalizado pela ASTM E 965/96 (ASTM, 2001c). A

metodologia consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume pré-determinado de  $25000 \text{ mm}^3 \pm 150 \text{ mm}^3$  de areia natural limpa e seca, de grãos arredondados e com uma granulometria definida: a areia deve passar na peneira de abertura 0,3 mm e ficar retida na peneira de abertura 0,15 mm. A medida pode ser feita também com microesferas de vidro com as mesmas características granulométricas da areia. A superfície a ser analisada deve ser previamente limpa com auxílio de escova de mão macia (APS *et al.*, 2003b). A areia ou as microesferas são colocadas num recipiente cilíndrico e o material é despejado no ponto de ensaio com o auxílio de um disco, em movimentos circulares, obtendo-se uma área também aproximadamente circular. O conteúdo deve ser vertido de forma a preencher todas as depressões da superfície do pavimento, até que não seja possível alargar a área do espalhamento (ALVES, 2007). Mede-se, então, o diâmetro do círculo da “mancha” obtida com a areia em três direções com aproximação visual de 5 mm; o diâmetro médio  $D_m$ , será o resultado da média obtida nas três medições (APS *et al.*, 2003a). O diâmetro final da mancha é função da altura média, e conseqüentemente, do volume consumido. O resultado é expresso em altura da areia (HS), em mm, conforme a Equação 2.10:

$$HS = \frac{V \cdot 4}{D_m^2 \cdot \Pi} \quad (2.10)$$

Onde:

$V = 25000 \text{ mm}^3$ ;

$D_m$  = diâmetro médio da mancha de areia (mm);

HS = altura média da mancha de areia (mm).

A classificação quanto à macrotextura de acordo com o DNIT (2006a), é apresentada na Tabela 2.28. Os valores mínimos admissíveis devem estar na faixa de 0,4 mm para uma aderência aceitável, sendo que valores superiores a 0,7 mm garantem uma boa drenagem superficial (SPECHT *et al.*, 2007). A macrotextura é uma das características mais importantes que afetam a aderência em velocidades superiores a 50 km/h. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Tabela 2.28: Avaliação da macrotextura pelo método mancha de areia. Fonte: (DNIT, 2006a)

<i>Profundidade Média em mm</i>	<i>Textura superficial</i>
HS < 0,20 mm	Muito fina ou muito fechada
0,20 mm < HS < 0,40 mm	Fina ou fechada
0,40 mm < HS < 0,80 mm	Média
0,80 mm < HS < 1,20 mm	Grosseira ou aberta
HS > 1,20 mm	Muito grosseira ou aberta

### 2.3.2 Avaliação da microtextura – pêndulo britânico

A microtextura está ligada à própria textura superficial dos agregados, com comprimentos de onda que variam entre 0 a 0,5mm e amplitude de 0 a 0,2mm. A microtextura depende diretamente das características mineralógicas dos agregados; é de fundamental importância para romper o filme de água quando do contato pneu/pavimento (SPECHT et al., 2007).

Dentre os métodos de medição da microtextura, o mais comumente utilizado é o ensaio de pêndulo britânico, normalizado pela ASTM E 303/93 (ASTM, 1998). O pêndulo britânico é um equipamento portátil que foi primariamente desenvolvido pelo *United States National Bureau of Standards* e aperfeiçoado pelo *British Road Research Laboratory* (ALVES, 2007).

O aparelho determina o grau de aderência ou resistência à derrapagem entre o pneu e o pavimento, também chamado como coeficiente de atrito cinemático. O equipamento consiste de uma placa de borracha que simula um pneu liso de veículos automotores, sendo montada no extremo de um pêndulo. Esse, quando liberado em queda livre, descreve um arco circular que tangencia e fricciona a superfície do pavimento onde se coloca o aparelho para o ensaio. A medida, com unidade de BPN (*British Pendulum Number*) ou SRT (*Skid Resistance Test*), é dada pela diferença de altura entre o centro de gravidade da placa de borracha tomada antes e depois que ela desliza sobre a superfície do revestimento (DNIT, 2006a).

O sistema como um todo simula a passagem do pneu liso de um veículo a uma velocidade de aproximadamente 50 km/h sobre o pavimento molhado. No ensaio é avaliada a perda de energia devido à fricção, portanto quanto maior for o valor de BPN, maior será a resistência oferecida pela superfície do pavimento à passagem da borracha do pêndulo, já que maior será a energia perdida pelo pêndulo (ALVES, 2007).

Esse equipamento também é utilizado no ensaio de laboratório para a determinação do Coeficiente de Polimento Acelerado (CPA) de agregados, segundo a norma ASTM D 3319 (ASTM, 2000b).

Para que o ensaio seja bem executado, é necessário calibrar e nivelar o aparelho com auxílio de uma bitola. Deve-se então verificar se o pavimento está seco e antes de cada leitura espalhar água na zona da passagem da borracha do pêndulo de modo a simular condições mais desfavoráveis. Para realizar a queda livre da borracha sobre o pavimento, roda-se a agulha e o pêndulo para a direita até a posição horizontal, soltando os dois elementos, procedendo-se então a leitura do valor dado pela posição da agulha na escala de medida BPN. Também é indicado que seja medida a temperatura da água despejada sobre o pavimento com um termômetro, imediatamente após o ensaio. A variação da temperatura da água está associada à variação do coeficiente de atrito, daí ser necessário proceder-se à normalização dos resultados obtidos, considerando uma temperatura de referência de 20°C (ALVES, 2007).

De acordo com o DNIT (2006a), a microtextura dos agregados pode ser obtida de forma indireta através dos valores de resistência à derrapagem – VRD (equivalente à sigla em inglês, BPN) medidos pelo equipamento, conforme mostra a Tabela 2.29.

Tabela 2.29: Avaliação da microtextura pelo método pêndulo britânico. Fonte: (DNIT, 2006a)

<i>Classe</i>	<i>VRD - Valor de resistência à derrapagem</i>
Perigosa	<25
Lisa	25-31
Muito lisa	32-39
Insuficientemente rugosa	40-46
Mediamente rugosa	47-54
Rugosa	55-75
Muito rugosa	>75

### 2.3.3 Avaliação da drenabilidade

O ensaio da drenabilidade analisa a capacidade da macrotextura em drenar a água da chuva através dos canais da superfície de um pavimento (APS *et al.*, 2003b). Portanto, pode ser utilizado como uma medida indireta de macrotextura (SILVA, 2008).

Esta medida é feita com um aparelho desenvolvido nos moldes do drenômetro ou flow meter, do ISETH - Institute for Highway, Railroads and Rock Engineering, pelo Laboratório de



Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (MOMM, 1998, *apud* APS, 2006). O ensaio consiste em medir o tempo de escoamento da água contida em um cilindro de volume de 0,73 litros através um orifício circular em contato com a superfície do revestimento.

Antes de iniciar o ensaio, deve-se molhar a parte inferior do drenômetro, e em seguida colocá-lo sobre o pavimento, averiguando-se a uniformidade do contato do anel de vedação de borracha com o pavimento; o recipiente é então preenchido com água, zera-se o cronômetro e puxa-se a alça (RIBEIRO *et al.*, 2008). Quanto mais lisa a superfície, maior será o tempo de escoamento (SILVA, 2008). Nos ensaios realizados, quando o tempo de escoamento ultrapassa 10 minutos o ensaio é interrompido e o valor deve ser anotado como: >10 minutos.

Este método mede a drenabilidade pontual na área de contato entre o pneu e o pavimento, portanto, a seleção da área de ensaio deve ser representativa do pavimento em estudo e os ensaios efetuados nas áreas mais solicitadas pelos pneus dos veículos (ALVES, 2007).

O resultado do ensaio é expresso em termos de tempo de escoamento ou de vazão de água escoada, cujo objetivo será de verificar o comportamento da textura do pavimento frente à água da chuva.

Aps (2006) observou dispersões nos valores obtidos por meio do ensaio de drenabilidade em comparação com o método da mancha de areia indicando limitações desse ensaio para texturas fechadas e muito abertas (camada porosa de atrito, por exemplo) de pavimentos asfálticos.

#### 2.3.4 Avaliação do IFI

O IFI - *International Friction Index* (índice internacional de atrito) é um parâmetro de medida de resistência à derrapagem que combina a macro e a microtextura, visando à segurança quanto à aderência do pavimento. Chegou-se a esse índice após um esforço internacional do Comitê de Características de Superfície da PIARC ou AIPCR (*Association International Permanent des Congrès de Laroute*) no ano de 1992. O comitê fez uma comparação e harmonização de métodos de medidas de textura dos pavimentos, incluindo 41 equipamentos diferentes. Desse levantamento, com mais de 1500 valores, foi montado um banco de dados contemplando diferentes tipos de superfícies e criada uma escala conveniente que quantificasse a aderência no pavimento molhado: o IFI. Essa escala é baseada em medidas de

aderência ( $F_{60}$ ) e textura ( $sp$ ), e serve como uma estimativa do coeficiente de atrito para um veículo a 60 km/h, com pneus lisos e rodas travadas (APS e BERNUCCI, 2004a).

Para proceder-se o cálculo do IFI é necessário obter informações sobre a textura do pavimento (mm) e sobre o atrito (FRS), sendo a medição dessas propriedades feita de acordo com a norma ASTM E 1960/98 (ASTM, 2000c). Por definição, os pares de valores  $F_{60}$  e  $sp$  são denominados de IFI de um pavimento (APS *et al.*, 2004b).

Com a avaliação da textura de acordo com os equipamentos e métodos descritos na norma, calcula-se o valor de  $sp$  - 'speed number', que traduz a dependência do atrito com relação à velocidade no pavimento molhado, sendo essa uma observação importante, pois só na presença de um filme de água (ou algum outro líquido) na superfície lubrificando o contato pneu/pavimento, haverá problemas de insuficiência de atrito capaz de provocar acidentes (AMARANTE JR. *et al.*, 2005). Com estudos experimentais notou-se que é possível obter o valor de  $sp$  através de uma regressão linear dos dados de macrotextura coletados ( $tx$ ), sendo os parâmetros de ajuste da reta tabelados de acordo com o equipamento utilizado, conforme a norma ASTM E-1960/98 (ASTM, 2000c). Portanto, tem-se que:

$$sp = a + b . tx$$

(2.11)

Sendo que para o ensaio da mancha de areia são obtidos os seguintes parâmetros:  $a = -11,6$  e  $b = 113,6$  (APS *et al.*, 2004b).

Com o valor de atrito (FRS) medido por ensaios de microtextura, é obtido o FR60, fator ajustado para velocidade de 60 km/h. Esses valores são relacionados por meio de uma equação exponencial em que é possível converter a medida de atrito FRS realizada a qualquer velocidade em que opera o equipamento (S), a uma medida de atrito a 60 km/h (FR60), conforme a expressão seguinte:

$$FR60 = FRS . e^{\left[ \frac{S-600}{sp} \right]}$$

(2.12)

O valor de S, constante da velocidade do equipamento, também está tabelado na norma ASTM E 1960/98, sendo 10 km/h para o pêndulo britânico (SILVA, 2008).

O último passo na harmonização é a calibração do equipamento via regressão linear da medida ajustada FR60, através do número de fricção F60 calibrado com os parâmetros de ajuste da reta e tabelados pela referida norma de acordo com o equipamento utilizado para as medições, resultando na seguinte equação:

$$F60 = A + B .FR60 + C .tx$$

(2.13)

Para os parâmetros do pêndulo britânico tem-se  $A = 0,056$ ,  $B = 0,008$ ,  $C = 0$ .

Ou ainda, combinando todos os fatores já descritos, o F60 pode ser equacionado como (ASTM E-1960-98):

$$F60 = A + B .FRS .e^{[-(60-S)/(a + b .tx)]} + C .tx$$

(2.14)

Segundo Aps (2006), os valores de IFI podem ser empregados na avaliação de acidentes, para gerenciamento de pavimentos, manutenção, operações aeroportuárias entre outras aplicações.

O DNIT (2006b) recomenda a classificação do IFI, apresentada na Tabela 2.30, para a avaliação das condições de atrito (segurança) dos pavimentos.

Tabela 2.30: Avaliação do IFI. Fonte: (DNIT, 2006a)

Valores do IFI	Mínimo	Máximo
Péssimo	<0,06	
Ruim	0,06	0,12
Regular	0,13	0,16
Bom	0,17	0,30
Ótimo	>0,30	

## 2.4 AVALIAÇÃO DO RUÍDO AMBIENTAL

As atuais discussões sobre sustentabilidade têm levado os engenheiros rodoviários a repensarem seus projetos frente ao meio ambiente e as comunidades envolvidas. O transporte rodoviário causa grande impacto no meio ambiente, tanto pelo grande consumo de energia

quanto pela infraestrutura física necessária à sua operação. A emissão de gases e os ruídos causados pelo tráfego causam danos irreversíveis ao meio e têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas.

Ruído pode ser definido como uma mistura de sons cujas frequências não seguem nenhuma lei precisa ou simplesmente como todo som indesejável (ABNT, 1983). A pressão sonora é utilizada para definir os níveis de ruído ou sua intensidade e sua unidade é o decibel. O decibel (dBA) é a unidade logarítmica que expressa a razão entre a pressão sonora que está sendo medida e uma referência. O som é composto por uma variedade de frequências, todavia o ouvido humano é capaz de sentir apenas parte desta frequência (audiofrequência de 20 - 20.000 Hz). Os medidores de ruído são capazes de selecionar tais frequências e a escala A dos decibelímetros é a que melhor representa a percepção humana.

No transporte rodoviário, o ruído é causado pelo motor, escapamento, sistema de transmissão, contato pneu/pavimento e efeito aerodinâmico. Segundo Hanson *et al.* (2005, *apud* SPECHT *et al.*, 2011), considerando a velocidade de referência de 100 km/h, a participação do ruído pneu/superfície de rolamento chega a 78% contra 10% do ruído aerodinâmico e 12% do motor. Os limites aceitáveis/toleráveis de ruído causados pelo tráfego de veículos variam de país para país. Nos Estados Unidos a EPA (*Environmental Protection Agency*) fixa valores entre 80 dBA e 87 dBA dependendo do tipo veículo e da velocidade (USDOT/FTHW, 1995).

De acordo com a emissão de ruído, os franceses classificam os revestimentos em pouco ruidosos (< 76 dBA), intermediários (76 a 79 dBA) e muito ruidosos (> 79 dBA). Os revestimentos com maior porcentagem de vazios, como os drenantes ou porosos, possibilitam a absorção do ruído quando as ondas sonoras são dissipadas no interior do revestimento, ao longo de seus vazios comunicantes (BROSSEAUD e LEDEE, 2001 *apud* FERREIRA, 2006).

No Brasil, a NBR 10151 (ABNT 2000b), fixa como valores máximo de ruído flutuante para áreas externa e no período diurno valores entre 40 dBA para sítios e fazendas até 70 dBA para áreas predominantemente industriais. Em geral, superfícies mais porosas são mais silenciosas que superfícies mais densas (APS, 2006).

Algumas ações são possíveis no sentido de reduzir a geração e propagação do ruído a partir de intervenções no pavimento. As principais são:

- a) revestimentos asfálticos tipo CPA (Camada Porosa de Atrito), com volume de vazios na ordem de 18-25%. Na Europa tem sido executado a CPA em duas camadas, sendo a superior mais fina, evitando a colmatação prematura dos poros;
- b) misturas descontínuas delgadas com agregados miúdos (entre 6 e 10mm e espessuras entre 15 e 25mm) ;
- c) e pavimento poro-elástico, são camadas abertas executadas com borracha reciclada que proporcionam durabilidade elevada e baixos níveis de ruído, exemplos de aplicação são encontrados no Arizona (BERNHARD e WAYSON, 2008, *apud* SPECHT *et al.*, 2011).

Um pavimento é dito silencioso quando sua superfície, interagindo com um pneu rodando, influencia o ruído total do veículo de tal forma que no mínimo 3 dBA (metade da energia acústica) são reduzidos em relação às superfícies rodoviárias tradicionais (SANDBERG e EJSMONT, 2002, *apud* SPECHT *et al.*, 2009).

Os pavimentos considerados de baixo nível de ruído apresentam valores de pressão sonora inferior a 76 dBA e se caracterizam por uma graduação de tamanho nominal máximo reduzido (6 mm), curva granulométrica descontínua e uma espessura delgada (inferior a 40 mm). Considerando o mesmo tipo de mistura asfáltica, quanto mais porosa e menor o tamanho nominal máximo da graduação, maior é a absorção sonora e, portanto menor o nível de ruído pneu/superfície de rolamento. Por exemplo: misturas drenantes (CPA) e os revestimentos delgados franceses do tipo BBTM e BBUM (BROSSEAUD e ANFOSSO-LEDEE, 2004).

Como parte do projeto denominado SILVIA (*SIL*enda *VIA* - *Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control*), patrocinado pelo *Forum European National Highway Research Laboratories* (FEHRL, 2006), foi realizado um estudo para mitigação do ruído pneu/superfície de rolamento em zonas urbanas de três cidades da Dinamarca, com tráfego entre 6.700 a 12.500 veículos diários, com 6% de veículos pesados e velocidades entre 50 a 60 km/h. Quatro seções experimentais de revestimentos asfálticos foram construídas a saber: concreto asfáltico denso CA 0/8 mm, concreto asfáltico semi-denso CA 0/6 mm (teor de vazios entre 8 a 14%), SMA 0/6 mm (teor de vazios entre 4 a 8%) e BBUM 0/6 mm, (teor de

vazios aproximadamente de 14%). Os resultados de pressão sonora indicaram uma redução de ruído de 3 dBA para o BBUM 0/6 mm, 2 dBA para o SMA 0/6 mm e CA semi-denso 0/6 mm e 1 dBA para o CA denso 0/8 mm, quando comparados ao concreto asfáltico convencional, CA denso 0/11 mm.

Specht *et al.* (2009) avaliaram o ruído gerado em quatro diferentes pavimentos implantados em rodovias brasileiras através de 1.487 medidas. Foram encontrados os seguintes valores: 84,31 dBA para o concreto de cimento Portland, 82,52 dBA para o concreto asfáltico convencional, 82,19 dBA para o tratamento superficial duplo e 79,29 dBA para a camada porosa de atrito (CPA). A diferença entre a camada porosa de atrito e o concreto de cimento Portland chegou a 5 dBA, representando 67% de perda na energia acústica. Essa diferença expressiva demonstrou a importância das propriedades acústicas dos tipos de revestimentos e de veículos.

A partir desses resultados experimentais, Callai *et al.* (2009, *apud* SPECHT *et al.*, 2011), verificaram que o perfil de influência do ruído médio em função da distância é representado pela Equação 2.15; tal modelo tem crucial importância e pode auxiliar os engenheiros rodoviários e planejadores a disciplinar as atividades em áreas marginais das rodovias.

$$Ruído = 84,18 - (0,6892 \cdot d) \quad (2.15)$$

Onde o ruído é dado em dBA e  $d$  é a distância do receptor até a fonte, em metros.

O ruído produzido pode ser estimado recorrendo a métodos diretos ou a métodos indiretos. A Norma ISO 11819-1:1997 descreve o método direto de referência: *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method* (método SPB) (ALVES, 2007).

Este método resulta em um índice de ruído para a comparação de superfícies de estrada, que se baseia nos níveis de som do veículo e leva em conta as características e velocidades dos veículos, ISO 11819 (ISO, 1997). O princípio básico do método SPB é medir o máximo ponderado dos níveis de pressão sonora ( $L_{Amax,m}$ ) de uma amostra significativa de veículos individuais passando em um local especificado na estrada juntamente com a velocidade do veículo (FEHRL, 2006). Cada veículo medido é classificado como veículo leve, pesado com

dois eixos e pesados com mais de dois eixos. As rodovias são classificadas em três níveis de acordo com a velocidade de utilização. As velocidades de referência são as seguintes (SPECHT *et al.*, 2011):

- a) velocidade baixa: 45-64 km/h; velocidade de referência de 50 km/h;
- b) velocidade média: 65-99 km/h; velocidade de referência de 80 km/h;
- c) velocidade alta: 100 km/h ou mais; velocidade de referência de 110 km/h.

Este método é aplicável para locais onde não se verifique congestionamento de tráfego, preferencialmente em locais sem objetos refletivos em pelo menos uma área de 550 m<sup>2</sup> (ALVES, 2007). Ainda, os locais da medição devem atender aos seguintes critérios:

- a) a extensão da pista deve ter no mínimo 30 m para ambos os lados a partir da posição do microfone;
- b) para velocidades altas essa distância deve ser de 50 m;
- c) e a rodovia deve estar “nivelada”, plana e em boas condições, a não ser que a intenção seja estudar o efeito de condição geométrica diferenciada (SPECHT *et al.*, 2009).

O microfone deve estar posicionado em um ambiente livre de barreiras sonoras (sejam elas naturais ou artificiais). Um espaço livre mínimo de 25 m ao redor do microfone deve ser o suficiente para evitar absorções ou reverberações e deve estar posicionado a uma distância de 7,5 m  $\pm$  0,1 m do eixo da via e a 1,2 m  $\pm$  0,1 m acima da superfície da rodovia.

Para ponderar a influência de cada categoria de veículo sobre o ruído, o número de veículos de cada grupo deve ser atendido conforme mostrado na Tabela 2.31.

As categorias de veículos pesados devem, conjuntamente, atender a um mínimo de 80 veículos. Somente devem ser relacionados os veículos que estão claramente livres da interferência acústica dos demais. Deve ser feita uma regressão linear dos valores obtidos para que sejam enquadrados nos da Tabela 2.32.

Tabela 2.31: : Quantidade de veículos por categoria para a medição de ruído. Fonte: (SPECHT *et al.*, 2011)

<i>Tipo de veículo</i>	<i>Quantidade</i>
Veículos de passeios – carros	Mínimo de 100
Veículos pesados com dois eixos	Mínimo de 30
Veículos pesados com mais de dois eixos	Mínimo de 30

A análise de regressão linear dos níveis de pressão sonora em velocidade devem ser feitas utilizando pares de dados, o que consiste no nível sonoro máximo ponderado versus o logaritmo (base 10) de velocidade para cada veículo. A linha de regressão deve feita para os pontos de dados de cada categoria de veículos separados, usando o método dos mínimos quadrados, ISO11819 (ISO, 1997).

Tabela 2.32: Velocidades de referência e peso dos fatores ( $W_x$ ). Fonte: (SPECHT *et al.*, 2011)

<i>Categoria do veículo</i>		<i>Velocidade da rodovia</i>					
		<i>Baixa</i>		<i>Média</i>		<i>Alta</i>	
<i>Nome</i>	<i>Classe</i>	<i>Velocidade de referência</i>	$W_x$	<i>Velocidade de referência</i>	$W_x$	<i>Velocidade de referência</i>	$W_x$
Carros	1	50km/h	0,900	80km/h	0,800	110km/h	0,700
Pesados de dois eixos	2a	50km/h	0,075	70km/h	0,100	95km/h	0,075
Pesados de mais de dois eixos	2b	50km/h	0,025	70km/h	0,100	95km/h	0,225

Os valores obtidos com a regressão nas velocidades da Tabela 2.32, são aplicados na Equação 2.16, assim obtendo o SPBI.

$$SPBI = 10 \cdot \log \cdot (10) \left[ \left( W1 \cdot (10^{\frac{L1}{10}}) \right) + \left( W2a \cdot \left( \frac{v1}{v2a} \cdot (10^{\frac{L2a}{10}}) \right) \right) + \left( W2b \cdot \left( \frac{v1}{v2b} \cdot (10^{\frac{L2b}{10}}) \right) \right) \right] \quad (2.16)$$

Onde:

SPBI = Índice estatístico de passagem (*Statistical Pass – By Index*), para uma média entre veículos leves e pesados;

L1, L2a, L2b = Valores de pressão sonora para as categorias respectivas (dBA);



W1, W2a, W2b = Fatores que presumem as proporções dos veículos respectivos, de acordo com a Tabela 2.32. Esses valores podem variar de acordo com o país, localidade e com o horário do dia ou noite. Portanto, eles representam valores globais em casos típicos dos países de origem da norma de referência.

V1, V2a, V2b = Velocidades de referência dos veículos, de acordo com a Tabela 2.32.

A norma ISO reconhece que a temperatura exerce uma influência importante sobre os níveis de ruído, e sugere que o experimento siga em temperatura constante, propondo ainda que os níveis de ruído máximo sejam corrigidos para uma temperatura de ar de referência de 20°C (FEHRL, 2006). A norma não impõe um padrão para essa correção. Specht *et al.* (2011) propõem um método consagrado de correção, balizado pela norma ISO 13325 (ISO, 2001), como é mostrado na Equação 2.17.

$$L(\theta_{ref}) = L_m + k(\theta_{ref} - \theta) \quad (2.17)$$

Onde:

L é o ruído corrigido;

L<sub>m</sub> é o ruído medido (dB);

Θ é a temperatura da rodovia (°C);

Θ<sub>ref</sub> é 20 °C;

K é o coeficiente de correção da temperatura, sendo:

Para pneus classe C1 (veículos de passeio):

K é -0.03 dB/ °C se θ > θ<sub>ref</sub>;

K é -0.06 dB/°C se θ < θ<sub>ref</sub>;

Para pneus classe C2 (Caminhões leves e vans), K é -0.02 dB/°C;

Para pneus classe C3 (caminhões pesados), K é 0.

Os ensaios não devem ser executados se a temperatura do ar for abaixo de 5 °C ou acima de 40 °C (SPECHT *et al.*, 2011).

## 2.5 AGREGADOS

Para que um pavimento apresente um bom desempenho e durabilidade durante sua vida útil, é de fundamental importância que os agregados que compõem a mistura asfáltica, tipicamente entre 93 a 96% em peso, apresentem propriedades de modo a suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e também no interior de sua estrutura.

Os principais requisitos técnicos para aceitação de agregados em misturas asfálticas são descritos a seguir, conforme recomendações de Bernucci *et al.* (2008) e do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP, 2011).

### 2.5.1 Tamanho e graduação

O tamanho máximo do agregado e sua graduação são estabelecidos por especificações que determinam a distribuição granulométrica a ser utilizada em uma determinada aplicação. As partículas maiores tendem a proporcionar maior estabilidade e resistência à derrapagem, porém são mais suscetíveis à segregação e podem reduzir a trabalhabilidade da mistura asfáltica durante sua execução.

A espessura mínima aplicada de uma mistura asfáltica deve ter uma relação direta com o tamanho máximo do agregado a ser empregado. O tamanho e a graduação dos agregados influenciam a estabilidade (intertravamento ou atrito entre as partículas), o teor de vazios, o grau de compactação, a resistência à fadiga e aos danos por umidade induzida da mistura, entre outros fatores (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A geração de ruído ambiental proveniente do pneu/superfície de rolamento também é diretamente relacionada ao tamanho nominal máximo da graduação de agregados, como ilustra a Figura 2.11 (HANSON *et al.*, 2004, *apud* NAPA, 2009).

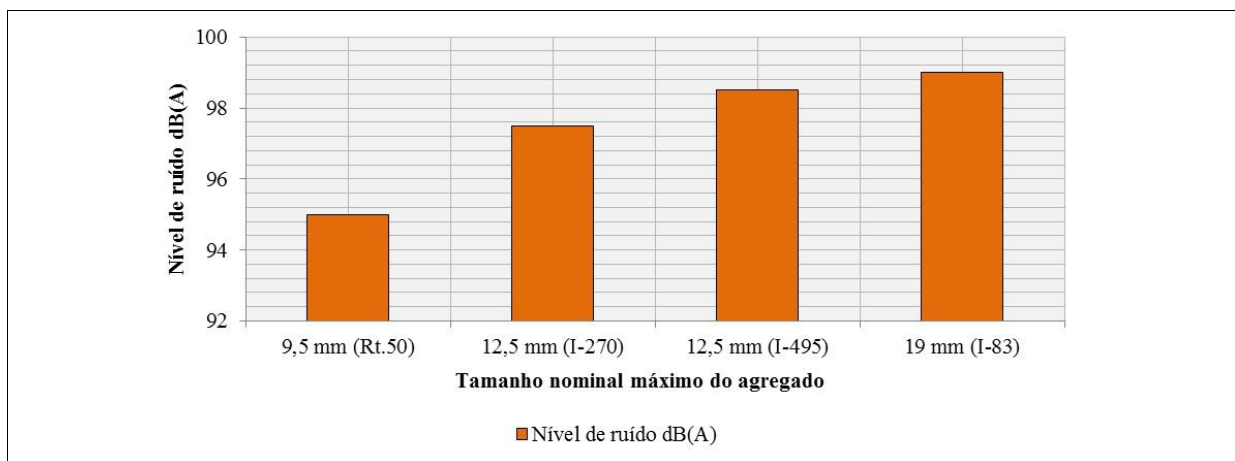


Figura 2.11: Relação entre o nível de ruído e o tamanho nominal máximo dos agregados. Baseado em: (NAPA, 2009)

### 2.5.2 Limpeza

As partículas de agregado graúdo e miúdo devem estar limpas, sem argila ou outro material deletério, evitando-se, também, o emprego do material fino ou pó mineral que contenha argila. A fração argila pode provocar o rompimento da película de ligante que envolve os agregados, dificultando a adesão entre as partículas. O ensaio de equivalente de areia, descrito na norma DNER-ME 054/97 (DNER, 1997a), determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos.

### 2.5.3 Resistência e angularidade

Os agregados utilizados devem ser resistentes à degradação para suportar a ruptura e a abrasão durante a execução do revestimento asfáltico e, posteriormente, pela ação do tráfego e do clima. Agregados com baixa resistência à abrasão também podem ser polidos sob ação do tráfego reduzindo as condições de aderência pneu-pavimento. O ensaio corrente utilizado para medir a resistência à degradação por impacto e abrasão é o ensaio Los Angeles descrito na norma DNER-ME 035/98 (DNER, 1998a).

Os agregados devem possuir boa angularidade, isto é, com uma ou mais faces fraturadas por britagem para garantir o atrito entre as partículas e minimizar o potencial de deformação permanente. A angularidade do agregado graúdo é examinada visualmente mediante a determinação percentual do número de faces britadas. A angularidade do agregado miúdo é avaliada conforme o método de ensaio descrito na norma ASTM C 1552 (ASTM, 2009a).

#### 2.5.4 Forma das partículas e textura superficial

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Segundo o *Asphalt Institute* (2007), as partículas lamelares ou chatas e alongadas são mais suscetíveis à segregação, podem fragmentar-se durante a compactação/vida de serviço e requerem maior quantidade de ligante para preenchimento dos vazios do agregado mineral (VAM) da mistura asfáltica.

À medida que aumenta a rugosidade do agregado, cresce principalmente a resistência ao atrito e ao cisalhamento da mistura. De preferência, devem ser selecionados agregados cujas partículas se aproximam mais da forma cúbica e cujas texturas superficiais sejam rugosas. A forma das partículas pode ser caracterizada segundo a norma NBR 6954 (ABNT, 1989), ou com o uso de um paquímetro especial, conforme a norma ASTM D 4791 (ASTM, 2010a).

#### 2.5.5 Porosidade interna adequada

Agregados que possuem porosidade interna elevada poderão absorver muita água e/ou parte significativa do ligante acarretando deficiências de material asfáltico e de adesão/coesão da mistura. A absorção é a relação entre a massa de água absorvida pelo agregado graúdo após 24 horas de imersão, DNER-ME 081/98 (DNER, 1998b). A absorção dos agregados exerce um grande efeito nos parâmetros volumétricos e na quantidade efetiva de ligante da mistura. Agregados de elevada porosidade normalmente não são utilizados em misturas asfálticas.

#### 2.5.6 Sanidade

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), alguns agregados que inicialmente apresentam boas características de resistência, podem sofrer processos de desintegração química quando expostos às condições ambientais no pavimento. Determinados basaltos, por exemplo, podem ser decompostos com formação de argilas. A resistência ao intemperismo ou durabilidade dos agregados pode ser avaliada segundo o método de ensaio DNER-ME 089/94 (DNER, 1994c).

#### 2.5.7 Propriedades hidrófobas - adesividade

A água pode separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado tornando-o inaceitável para uso em misturas asfálticas. Como consequência, tem-se a perda de resistência da camada de revestimento asfáltico levando à aceleração do processo de

trincamento e/ou deformações permanentes, à desagregação, à abertura de buracos, reduzindo consideravelmente a vida útil dos pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 1999).

De acordo com Read e Whiteoak (2003), a natureza dos agregados, principalmente do fíler mineral, exerce uma considerável influência na adesão do ligante asfáltico. Os agregados ácidos ou eletronegativos (altamente silicosos) são hidrofílicos (granitos, gnaisses, quartzitos, etc.) e, portanto, mais suscetíveis à ação da água que os agregados básicos ou eletropositivos (basaltos, diabásicos, calcários, etc.). Os agregados básicos possuem características hidrófobas; em geral, tem baixa afinidade com a água e apresentam boa adesividade ao ligante asfáltico. De acordo com a ABEDA (2010) quando se utilizam agregados altamente hidrófilos devem ser empregados aditivos melhoradores de adesividade na quantidade determinada pelo projeto de dosagem da mistura asfáltica.

A perda de adesão também pode ocorrer se o agregado estiver contaminado com pó na sua superfície. O uso de pedras limpas evita o isolamento da película de ligante asfáltico com o material pétreo. Também a composição química, a estrutura mineralógica e as características físicas do agregado (textura superficial, forma e porosidade), têm importante influência no comportamento adesivo (ASPHALT INSTITUTE, 1987).

A água pode entrar na estrutura do pavimento principalmente por fissuras ou trincas na superfície do revestimento e/ou ascensão por capilaridade proveniente das camadas inferiores ou do subleito, e na mistura por secagem incompleta de agregados durante a produção de misturas a quente.

Os ensaios para determinação das características de adesividade podem ser subdivididos em dois grupos: aqueles que analisam o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico, considerando a adesão ativa agregado-ligante e aqueles que analisam o desempenho adesivo e coesivo de determinadas propriedades mecânicas de misturas sob a ação da água.

Nos métodos ABNT NBR 14329 (ABNT, 1999) e DNER-ME 078/94 (DNER, 1994a), a mistura asfáltica não compactada é imersa em água por determinado intervalo tempo e a área das partículas recobertas pelo ligante asfáltico é estimada visualmente após este período.

Outro procedimento para avaliação da suscetibilidade à ação da água é denominado ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283 ou ASTM D 4867/D4867M/09c) e pertence à atual

especificação por desempenho Americana de ligantes e misturas asfálticas a denominada SUPERPAVE® – *Superior Performance Asphalt Pavements*. Esse ensaio foi utilizado como referência na elaboração da Norma Brasileira NBR 15617 (ABNT, 2011) para a determinação do dano por umidade induzida, possibilitando a avaliação quantitativa da eficiência da adesividade na interface ligante / agregado em misturas asfálticas densas tipo concreto asfáltico, pela ação deletéria da água.

Segundo estudos comparativos laboratório-campo do Asphalt Institute (1987, 2007), esse procedimento é considerado como um dos mais apropriados para prever o dano por umidade, pois considera além da adesão as características coesivas da mistura asfáltica.

O ensaio consiste na moldagem de no mínimo seis corpos de prova com teor asfáltico de projeto e volume de vazios na faixa de (7+1%), compactando com um número baixo de golpes por face no caso Marshall, ou menor número de giros no procedimento SUPERPAVE®. Na sequência, é determinada a densidade aparente dos corpos de prova. Os corpos de prova são separados em dois grupos; um dos grupos é submetido a um condicionamento, simulando com isto a presença de água na mistura e tensões internas induzidas por cargas do tráfego, envolvendo as seguintes etapas: saturação de água entre 55% e 80% de seus vazios com ar; resfriamento a -18°C durante 16 horas; aquecimento em banho-maria a 60°C durante 24 horas e resfriamento em outro banho a 25°C por 2 a 3 horas.

Depois do condicionamento, os corpos de prova são ensaiados para a determinação da resistência à tração por compressão diametral conforme a norma NBR 15087 (ABNT, 2004c) e, finalmente, a relação de resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados é determinada e denominada de resistência à tração retida (RRT).

Valores mínimos, determinados no ensaio, entre 70 a 80% demonstram um comportamento satisfatório de misturas asfálticas densas (CA) aos danos causados por ação da água (Asphalt Institute, 1995; 2007).

## 2.6 LIGANTES ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico utilizado em pavimentação provém da destilação do petróleo. Suas características principais são: adesão aos agregados, agindo como um produto termo-viscoelástico que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante; é durável e

resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido, diluído em solventes de petróleo ou emulsionado em água, em amplas combinações de esqueleto mineral (ABEDA, 2010).

### 2.6.1 Cimentos asfálticos de petróleo - CAP

No Brasil, utiliza-se a denominação cimentos asfálticos de petróleo – CAP, para designar ligantes semissólidos a temperaturas baixas, visco elásticos a temperatura ambiente, líquidos a altas temperaturas, e que se enquadram em limites de consistência para determinadas temperaturas de modo a distingui-los dos asfaltos utilizados na construção civil e para finalidade industriais.

Os cimentos asfálticos de petróleo – CAP são materiais caracterizados segundo as normas brasileiras ABNT NBR, e especificados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e B combustíveis - ANP. Atualmente há quatro tipos de CAP, classificados por penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, constituindo-se em produtos básicos para a produção de outros materiais asfálticos de acordo com sua aplicação em pavimentação.

A Tabela 2.33 apresenta a classificação por penetração para os cimentos asfálticos de petróleo – CAP, segundo a Resolução N° 19 da ANP, de 11 de julho de 2005 e Regulamento Técnico N° 3/2005 (ABEDA, 2010).

Tabela 2.33: Cimentos asfálticos de petróleo – CAP – classificação por penetração. Fonte: (ABEDA, 2010)

Características	Unidades	Limites				Métodos	
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol 135°C, min 150°C, min 177°C, min Ou Viscosidade Brookfield 135°C,min SP 21, 20 rpm, mín. 150°C, min SP 21, 20 rpm,mín 177°C, min SP 21, 20 rpm,mín	s	192	141	110	80	NBR 140950	E 102
		90	50	43	36		
	cP	40-150	30-150	15-60	15-60	NBR 15184	D 4402
		374	274	214	155		
		203	112	97	81		
		76-285	57-285	28-114	28-114		
Índice de susceptibilidade térmica(1)		(-1,5)a(+0.7)	(-1,5)a(+0.7)	(-1,5)a(+0.7)	(-1,5)a(+0.7)		
Ponto de fulgor mínimo	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno	% massa	99.5	99.5	99.5	99.5	NBR 14855	D 2042
Ductibilidade a 25°C,min	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e dor ar (RTFOT) 163C 85min		D 2872					
Varição em massa máx. (2)	% massa	0.5	0.5	0.5	0.5		
Ductibilidade 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	D36
Penetração retida, mín.(3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D5



### 2.6.2 Ligantes asfálticos modificados por polímeros - AMP

A modificação do CAP por polímeros visa reduzir as variações de suas propriedades em relação às temperaturas de serviço a fim de evitar grandes alterações no comportamento mecânico do pavimento pelas solicitações de tráfego, entre outras: aumento do ponto de amolecimento e da elasticidade; melhoria das características adesivas e coesivas e maior resistência ao envelhecimento, à deformação permanente e às trincas de fadiga ou térmicas.

Em função do seu melhor desempenho, as misturas asfálticas com AMP têm possibilitado a concepção de revestimentos asfálticos mais resistentes, delgados, duráveis, seguros, confortáveis e econômicos. Além disso, novas metodologias de dosagem e requisitos técnicos para os materiais asfálticos foram estabelecidas, tais como: as Normas Unificadas da Comunidade Europeia e Especificações SUPERPAVE®, através do programa de pesquisas SHRP – *Strategic Highway Research Program*.

No Brasil, o uso de AMP iniciou a partir dos anos 1990. Algumas raras experiências anteriores foram realizadas, porém pouco expressivas. O polímero mais empregado na atualidade é o SBS, seguido do SBR (látex de estireno-butadieno), produzidos no Brasil especialmente para o mercado de pavimentação, respectivamente, a partir de 1997 e 1998 (BERNUCCI, MOURA e LEITE, 2002).

O DNIT, em 1999, incluiu às suas especificações gerais, uma coletânea de normas para asfaltos modificados por polímeros do tipo SBS, englobando métodos de ensaios, especificações de materiais e de serviço.

Atualmente há um incremento no uso de ligantes modificados, principalmente em obras do DNIT e sob administração privada. A Tabela 2.34 apresenta as especificações brasileiras para os Asfaltos Modificados por Polímeros Elastoméricos (AMP-E), segundo a Resolução ANP Nº 32, de 21 de setembro de 2010 (ABEDA, 2010).

Tabela 2.34: Classificação para asfaltos modificados por polímeros elastoméricos (AMP-E). Fonte: (ABEDA, 2010)

Característica	Unidade	Limite			Método	
		Tipo			NBR	ASTM
		55/75-E	60/85-E	65/90-E		
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	45-70	40-70		6576	D5
Ponto de amolecimento mín	°C	55	60	65	6560	D36
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 RPM, máx.	cP	3000			15184	D4402
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 RPM, máx.		2000				
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 RPM, máx.		1000				
Ponto de fulgor, mín.	°C	235			11341	D92
Ensaio de separação de fase Max.	°C	5			15166	D7173
Recuperação elástica 25°C, 20cm, mín.	%	65	85	90	15086	D6084
<i>Efeito do calor e do ar (RTFOT) 163°C 85 min</i>						
Varição em massa Max. (1)	% em massa	1			15235	D2872
Varição do ponto de amolecimento máx.	°C	-5 a +7			6560	D36
Percentagem de penetração original mín.	°C	60			6576	D5
Percentagem de recuperação elástica original a 25°C mín.	%	80			15086	D6084

### 2.6.3 Emulsões asfálticas

O desenvolvimento das emulsões asfálticas catiônicas, a partir da década de 1960 no Brasil, somente com dez anos de atraso em relação à Europa e cinco anos em relação aos EUA, trouxe vantagens indiscutíveis para a evolução das técnicas de tratamento de superfície, tais como: pintura de ligação, tratamento superficial, lama asfáltica, pré-misturados a frio, etc.

As vantagens são principalmente pela facilidade de aplicação, baixo custo de transporte e estocagem, bom envolvimento e adesividade do ligante aos agregados úmidos, bem como a possibilidade de combinar grandes volumes de produção com baixo risco de poluição ambiental.

Na Europa, EUA e mais recentemente no Brasil, a partir de meados da década de 1990, tem-se verificado a crescente demanda de emulsões modificadas por polímeros do tipo SBR (látex de estireno-butadieno) e SBS (estireno-butadieno-estireno). Ambos os polímeros são elastômeros e conferem ao ligante asfáltico residual propriedades elásticas que proporcionam melhor desempenho das técnicas de aplicação, por exemplo em: pintura de ligação, tratamento superficial, microrrevestimento asfáltico, entre outras.

De acordo com ABEDA (2010), as seguintes características dos ligantes asfálticos residuais das emulsões elastoméricas podem ser ressaltadas:

- a) menor suscetibilidade térmica tanto a alta quanto a baixa temperatura;
- b) maior coesão interna que se transmite ao revestimento asfáltico delgado (lama, microrrevestimento asfáltico a frio ou tratamentos superficiais);
- c) elasticidade, praticamente inexistente nos resíduos asfálticos das emulsões convencionais;
- d) maior adesão aos agregados;
- e) maior aderência entre as diversas camadas para absorção das cargas em movimento e manutenção da integridade do pavimento (estrutura monolítica);
- f) e maior resistência ao envelhecimento em serviço.

A Tabela 2.35 apresenta as especificações brasileiras para as emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos de acordo com a Resolução ANP n° 32 de 14 de outubro de 2009 (ABEDA, 2010).

Tabela 2.35: Especificações brasileiras para as emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos. Fonte: (ABEDA, 2010)

Características	Unidades	Limites					Método	
		Ruptura Rápida		Ruptura média	Ruptura Controlada	Ruptura Lenta	ABNT NBR	ASTM
		RR1C-E	RR2C-E	RM1C-E	RC1C-E	RL1C-E		
Viscosidade Saybolt-Furol, S, a 50°C	S	70máx	100-400	20-200	70máx	70máx	14491	D244
Sedimentação, máx.	%massa	5	5	5	5	5	6570	D6930
Peneiração 0,84 mm, Max	%massa	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	14393	D6933
Resistência à água mín de cobertura (2)							6300	D244
Agregado seco	%massa	80	80	80	80	80	6300	D244
Agregado úmido	%massa	80	80	60	60	60	6300	D244
Carga de partícula	-	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	6567	D244
pH, Max.	-	-	-	-	6,5	6,5	6599	D244
Destilação - solvente destilado a 361°C, %vol.	%volume	0-3	0-3	0-12	0	0	6568	D244
Resíduo seco, mín	%massa	62	67	62	62	60	14376	D6934
Desemulsibilidade mín Max	%massa	50	50	-	-	-	6569	D6936
	%massa	-	-	50	-	-	6569	D6936
<i>Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896</i>								
Penetração a 25°C, 100g, 5s	0,1mm	45-150	45-150	45-150	45-150	45-150	6576	D5
Ponto de amolecimento, min.	°C	50	55	55	55	55	6560	D36
Viscosidade Brook. a 135°C, SP 21,20 RPM, min.	cP	550	600	600	600	600	1518 4	D4402
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, min.	%	65	70	70	70	70	1508 6	D6084

(1) A equivalência das normas NBR e ASTM é parcial, sendo que, preferencialmente, os ensaios devem ser realizados pelas normas NBR.

(2) Se não houver envio de mostra ou informação da natureza do agregado pelo consumidor final, o distribuidor deverá indicar a natureza do agregado usado no ensaio no Certificado de Qualidade.

## 2.7 ADITIVOS MELHORADORES DE ADESIVIDADE

Pesquisas nos Estados Unidos conduzida pelo Departamento de Transportes do Colorado incluindo todos os 50 departamentos estaduais, mostram que 82% dos estados americanos adotam métodos de ensaios em laboratório para prever o comportamento das misturas asfálticas em presença de umidade e produtos químicos apropriados a fim de evitar tais problemas (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

A combinação ligante asfáltico-agregado determina a escolha do melhorador de adesividade. As combinações devem ser avaliadas em laboratório para determinar o melhor tipo e dosagem do aditivo químico para cada aplicação.

Uma solução consagrada para reduzir ou eliminar danos causados por ação da umidade e melhorar a afinidade química na interface ligante asfáltico-agregado é através do emprego da cal hidratada -  $\text{Ca(OH)}_2$  tipo CH-I. Em geral, a cal hidratada é empregada numa proporção entre 1% a 3% em peso de mistura asfáltica a quente sendo adicionada preferencialmente ao agregado úmido.

Também podem ser utilizados aditivos orgânicos melhoradores de adesividade (AMO) devido à simplicidade operacional durante o transporte, manuseio, dosagem e armazenamento desses materiais. A composição ativa do AMO está baseada na síntese de amidoaminas e poliaminas graxas de alto peso molecular. A sua adição é realizada em pequenas quantidades, geralmente entre 0,1% a 0,5% em peso (dependendo de sua concentração) diretamente ao ligante asfáltico e age modificando a sua natureza físico-química.

O AMO apresenta em sua composição um grupo polar (moléculas de aminas) que se ligará quimicamente a superfície do agregado e outro grupo apolar (cadeias de hidrocarbonetos) que interagem com o cimento asfáltico deslocando a água da superfície dos agregados e formando uma ligação adesiva entre ambos os materiais.

O AMO pode ser incorporado ao ligante pelo próprio distribuidor de asfalto ou em obra, direto no tanque da usina, através de simples agitação mecânica ou via recirculação da mistura pela bomba de transferência de asfalto.

A Norma Brasileira NBR 15528 (ABNT, 2007d) fixa os procedimentos para o recebimento de aditivos orgânicos melhoradores de adesividade (AMO). A Norma ABNT NBR 15618/2008: Avaliação por desempenho de aditivos orgânicos melhoradores de adesividade (AMO) (ABNT, 2008d), estabelece o valor mínimo de 75% para a resistência à tração retida (RRT) de misturas asfálticas a quente aditivadas, com volume de vazios entre 3 a 6 %, após o ensaio de determinação do dano por umidade induzida NBR 15617 (ABNT, 2011).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO

Este capítulo descreve os seguintes tópicos:

- a) Planejamento do programa de laboratório;
- b) Seleção e caracterização dos materiais;
- c) Estudo de dosagem do revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD) e
- d) Resultados e discussões do estudo de dosagem.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA DE LABORATÓRIO

Basicamente, o programa de laboratório consistiu na seleção e caracterização dos materiais e da faixa granulométrica, bem como na elaboração e/ou adequação dos procedimentos utilizados para os projetos de dosagem do RAUD.

Para tanto, foi planejado o desenvolvimento de 12 estudos de dosagem baseados em relações volumétricas do método Marshall e nas avaliações comparativas de comportamento mecânico da mistura visando à seleção do teor de ligante e complementação dos requisitos de projeto do RAUD.

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais asfálticos, agregados e graduações:

- a) dois tipos de ligantes asfálticos: um convencional, CAP 50/70 e outro modificado por polímero elastomérico, AMP 55/75-E;
- b) três tipos de agregados pétreos de natureza mineralógica distinta;
- c) duas faixas granulométricas usualmente empregadas em RAUD.

Na Tabela 3.1, são relacionados os projetos de dosagem das misturas asfálticas desenvolvidos para o estudo do RAUD, segundo a combinação de materiais e faixas granulométricas.

Tabela 3.1: Projetos de estudo do RAUD desta pesquisa.

<i>Projetos</i>	<i>Pedreira/Faixa/Ligante</i>
Projeto 1	Pedreira Basalto, Faixa CALTRANS com CAP 50/70
Projeto 2	Pedreira Basalto, Faixa Tennessee com CAP 50/70
Projeto 3	Pedreira Central, Faixa CALTRANS com CAP 50/70
Projeto 4	Pedreira Central, Faixa Tennessee com CAP 50/70
Projeto 5	Pedreira Tibagi, Faixa CALTRANS com CAP 50/70
Projeto 6	Pedreira Tibagi, Faixa Tennessee com CAP 50/70
Projeto 7	Pedreira Basalto, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E
Projeto 8	Pedreira Basalto, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E
Projeto 9	Pedreira Central, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E
Projeto 10	Pedreira Central, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E
Projeto 11	Pedreira Tibagi, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E
Projeto 12	Pedreira Tibagi, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E

## 3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1 Seleção dos agregados minerais

Devido à concepção da mistura, o atrito interno entre os agregados graúdos do RAUD é maior que nas misturas densas convencionais, exigindo agregados provenientes de britagem com valores de abrasão *Los Angeles* baixos e forma cúbica que proporcionem resistência mecânica adequada durante a aplicação e em serviço. Os agregados de graduação fina, praticamente não devem possuir em sua composição finos plásticos (argilas) e materiais reativos. Tal como o concreto asfáltico (CA), a resistência ao intemperismo e a porosidade dos agregados afetam o desempenho desta técnica, objeto deste estudo.

Para este estudo, inicialmente foram selecionadas amostras representativas de três tipos de agregados, procedentes das pedreiras comerciais Basalto, Central e Tibagi localizadas no Estado do Paraná, cuja natureza mineralógica gnáissica, granítica e riolítica, respectivamente, representam a maior parte das rochas ácidas do país que são britadas para a pavimentação rodoviária. Os agregados ácidos ou eletronegativos (altamente silicosos) são hidrofílicos (granitos, gnaisses, quartzitos, etc.) e, portanto, mais suscetíveis à ação deletéria da água.

Posteriormente, foi coletado um quarto tipo de agregado de natureza diabásica, proveniente da pedreira comercial Calógeras, localizada no município de Arapoti no Estado do Paraná, para a dosagem da mistura asfáltica a ser utilizada na execução da seção - teste da pesquisa em RAUD e da seção de referência em CA na obra de pavimentação da PR - 092 – Jaguariaíva a Wenceslau Brás - Trecho Jaguariaíva a Arapoti.



As graduações da mistura descontínua do RAUD atendem às seguintes faixas granulométricas: Faixa ¼” tipo "A" Tennessee; e Faixa 9,5 mm CALTRANS, preconizadas, respectivamente, pelos Departamentos de Transportes norte-americanos do Tennessee e da Califórnia, cujo desempenho tem sido comprovado pela sua prática usual, conforme descrito na revisão bibliográfica.

A seguir são relacionados os métodos de ensaios utilizados no estudo de caracterização dos agregados graúdos e miúdos:

- a) determinação da abrasão *Los Angeles* DNER – ME 035/98 (DNER, 1998a);
- b) determinação da abrasão Micro Deval úmido - AASHTO TP – 58 (AASHTO, 2000);
- c) determinação de partículas chatas e alongadas - ASTM D 4791 (ASTM, 2010a);
- d) determinação da angularidade de agregados miúdos - ASTM C 1552 (ASTM, 2009a);
- e) equivalente de areia - DNER-ME 054/97 (DNER, 1997a);
- f) análise granulométrica - DNER-ME 083/98 (DNER, 1998c);
- g) avaliação da durabilidade - DNER-ME 089/94 (DNER, 1994c);
- h) reatividade ao azul de metileno - NBR 14949 (ABNT, 2003b);
- i) densidade real, aparente e absorção do agregado graúdo - ASTM C 127 (ASTM, 2007a);
- j) e densidade real, aparente e absorção do agregado miúdo - ASTM C 128 (ASTM, 2007b).

### 3.2.2 Seleção do material de enchimento – fíler mineral

O material de enchimento ou fíler mineral utilizado no estudo e que também contribui para a melhoria da adesividade da mistura asfáltica é a cal calcítica tipo CH-I. O material é homogêneo, não plástico, passando 100% na peneira de 0,42 mm (# 40) e no mínimo 65% na

peneira de 0,075 mm (#200) conforme análise granulométrica (DNER 083/98), seco e livre de grumos provenientes de agregações de partículas finas.

### 3.2.3 Seleção dos ligantes asfálticos

Conforme descrito na revisão da literatura, para aumentar a resistência e a durabilidade da camada de rolamento são empregados, preferencialmente, ligantes modificados por polímeros elastoméricos tanto na produção da mistura asfáltica ultra delgada como na execução da membrana de ligação sobre o suporte. Para fins de estudos comparativos das misturas asfálticas também foi utilizado o ligante convencional CAP 50-70 como referência.

Os seguintes materiais asfálticos, procedentes da empresa distribuidora de produtos derivados de petróleo - Compasa do Brasil – Asfaltos e Serviços, foram selecionados para a pesquisa:

- a) cimento asfáltico de petróleo tipo CAP 50-70;
- b) cimento asfáltico de petróleo modificado por polímeros elastoméricos tipo 55/75-E, denominado no presente estudo de AMP 55/75-E;
- c) e emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos tipo RR1C-E, denominado no presente estudo de RR1C-E.

As Tabelas 3.2 a 3.4 mostram a caracterização dos ligantes asfálticos segundo as normas brasileiras ABNT NBR e especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis– ANP.

A Tabela 3.5 apresenta as faixas de viscosidades e de temperaturas dos ligantes asfálticos tipo CAP 50/70 e AMP 55/75-E para a mistura e compactação dos corpos de prova, segundo o procedimento do ensaio Marshall (DNER ME – 043/95). A representação gráfica da Tabela 3.5 é apresentada na Figura 3.1(a) e (b).

Tabela 3.2: Caracterização do cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70

Métodos ABNT	Ensaio	Valores Especificados Tipo CAP 50/70		Resultados
		Mín	Máx	CAP
NBR 6576	Penetração (100g, 5s, 25°C) (0,1mm)	50,0	70,0	51
NBR 6560	Ponto de amolecimento (°C)	46,0	-	47,5
NBR 14950	Visc. Saybolt-Furol a 135°C (s)	141,0	-	176,0
NBR 14950	Visc. Saybolt-Furol a 150°C (s)	50,0	-	87,9
NBR 14950	Visc. Saybolt-Furol a 177°C (s)	30,0	150,0	34,6
NBR 15184	Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20RPM (cP)	274,0	-	342,0
NBR 15184	Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 20RPM (cP)	112,0	-	167,0
NBR 15184	Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 20RPM (cP)	57,0	285,0	64,0
-	Índice de susceptibilidade térmica	(-1,5)	(+0,7)	-1,5
NBR 11341	Ponto de fulgor (°C)	235,0	-	296,0
NBR 14855	Solubilidade em tricloroetileno (% massa)	99,5	-	99,0
NBR 6293	Ductilidade a 25°C (cm)	60,0	-	>100
NBR 15235	ECA-variação em massa (%)	-	0,5	0,4
NBR 6293	ECA-ductilidade a 25°C (%)	20,0	-	>100,0
NBR 6560	ECA-aumento pto. Amolecimento(°C)	-	8,0	5,7
NBR 6576	ECA-penetração retida(%)	50,0	-	60,0
-	Densidade relativa 20/4°C (Gb)	-	-	1,001
-	Aquecimento a 177°C	-	-	NESP

Tabela 3.3: Caracterização do asfalto modificado por polímeros elastoméricos - AMP 55/75-E

Métodos	Ensaio	Valores Especificados Tipo 55/75-E		Resultados
		Mín	Máx	AMP 55/75-E
NBR-6576	Penetração (100g,5s,25°C) (0,1mm)	45,0	70,0	51,0
NBR-6560	Ponto de amolecimento (°C)	55,0	-	55,5
NBR-11341	Ponto de fulgor (°C)	235	-	260,0
NBR-15184	Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20RPM (cP)	-	3000,0	710,0
NBR-15184	Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 20RPM (cP)	-	2000,0	357,5
NBR-15184	Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 20RPM (cP)	-	1000,0	135,0
NBR-15166	Estabilidade à estocagem (°C)	-	5	0,5
NBR-15086	Recuperação elástica a 25°C, 20 cm (%)	75,0	-	79,5
<i>Ensaio no resíduo do RTFOT</i>				
NBR-15235	Varição em massa (%)	-	1,0	0,1
NBR-6560	Aumento do ponto de amolecimento (°C)	-	7,0	3,5
NBR-6560	Redução do ponto de amolecimento (°C)	-	5,0	-
NBR-6576	Penetração original (%)	60,0	-	64,7
NBR-15086	Recuperação elástica original a 25°C (%)	80,0	-	98,7
-	Densidade relativa 20/4°C (Gb)	-	-	1,011

Tabela 3.4: Caracterização da emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos – RR1C-E

<i>Métodos</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Valores Especificados Tipo RR1C-E</i>		<i>Resultados</i>
		<i>Mín</i>	<i>Máx</i>	
NBR-14491	Viscosidade Saybolt-Furol, 50 °C (s)	-	70,0	28,0
NBR-6570	Sedimentação, 5 dias (% em peso)	-	5,0	2,1
NBR-14393	Peneiramento, Peneira 0,84mm (% em peso)	-	0,10	0,02
NBR-6567	Carga de partícula	Positiva	-	Positiva
NBR-14376	Resíduo da emulsão (%)	62,0	-	63,9
NBR-6569	Desemulsibilidade (%)	50	-	54,0
<i>Ensaio sobre o resíduo</i>				
NBR-6576	Penetração a 25 °C, 100 g, 5s (0,1 mm)	45,0	150,0	48,0
NBR-6560	Ponto de amolecimento (°C)	50,0	-	57,5
NBR-15184	Viscosidade Brookfield a 135°C, sp21, 20rpm (cP)	550,0	-	1437,0
NBR-15086	Recuperação elástica a 25°C, 20 cm (%)	65,0	-	71,0

Tabela 3.5: Faixas de viscosidades e temperaturas para os ligantes asfálticos tipo CAP 50/70 e AMP 55/75-E

<i>Viscosidade SSF</i>				
	<i>CAP 50/70</i>		<i>AMP 55/75-E</i>	
<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Viscosidade</i>		<i>Viscosidade</i>	
135	176,0		328,4	
150	87,9		165,3	
177	34,6		62,4	
<i>Viscosidade de mistura e compactação SSF</i>				
	<i>CAP 50/70</i>		<i>AMP 55/75-E</i>	
<i>Características</i>	<i>Faixas de Viscosidade (SSF)</i>	<i>Faixas de Temperatura (°C)</i>	<i>Faixas de Viscosidade (SSF)</i>	<i>Faixas de Temperatura (°C)</i>
Mistura	75-95	149-155	125-152	153-158
Compactação	125-155	137-142	249-305	136-141

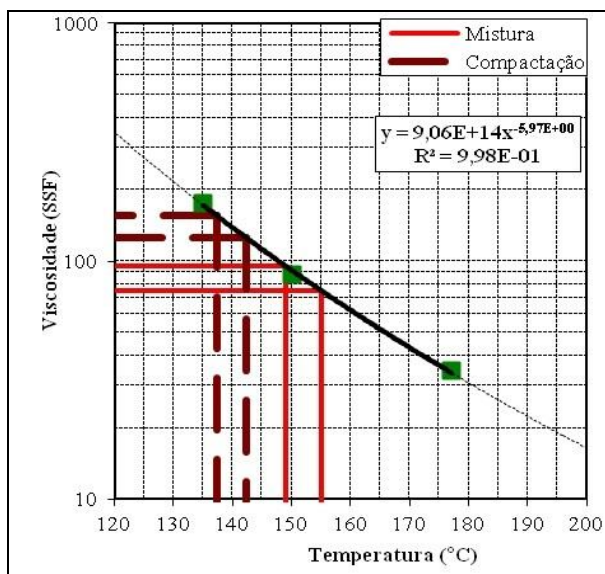


Figura 3.1a: Viscosidade x temperatura para os ligantes asfálticos tipo CAP 50/70.

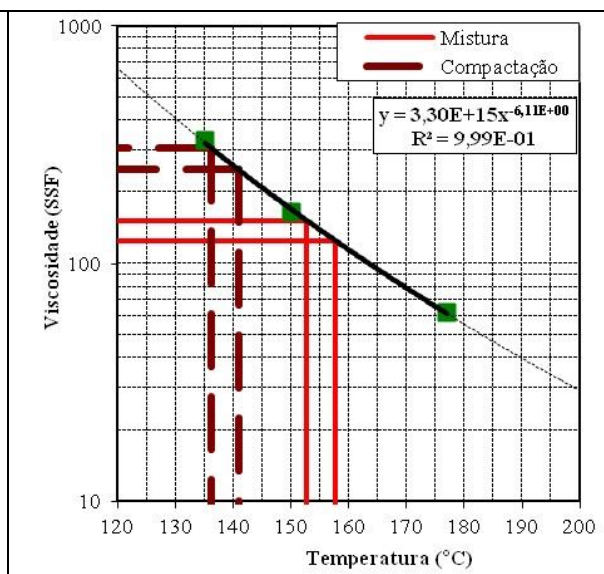


Figura 3.1b: Viscosidade x temperatura para os ligantes asfálticos tipo AMP 55/75-E.

### 3.2.4 Aditivo Melhorador de Adesividade

Em adição a cal CH-I, foi empregado o aditivo melhorador de adesividade, denominado comercialmente de Compadope AP, procedente da empresa Compasa do Brasil – Asfaltos e Serviços, para a melhoria das características de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados sob a ação deletéria da água.

Compadope AP é um aditivo orgânico melhorador de adesividade concentrado (AMO) cuja composição química é baseada na síntese de poliaminas e ácidos graxos. O produto atende aos requisitos da norma de Avaliação para Recebimento de AMO NBR 15528 (ABNT, 2007d). As principais características do Compadope AP são apresentadas na Tabela 3.6.

A dosagem de 0,2% de Compadope AP foi estabelecida em relação à massa de ligante asfáltico (somente para as misturas asfálticas estudadas com CAP 50/70), após a realização do ensaio expedito da fervura NBR 14329 (ABNT, 1999). Esse procedimento permitiu estimar visualmente a porcentagem da área de agregados que se mantinham recobertos pela película de ligante após a mistura ser submetida à água fervente. Valores mínimos de 90% foram considerados satisfatórios.

Tabela 3.6: Propriedades técnicas do Compadope AP

<i>Propriedade</i>	<i>Característica</i>
Estado físico / Aparência	Produto líquido de coloração marrom
Ponto de fulgor (Vaso aberto)	>170 °C
Viscosidade 60°C (Valores típicos)	150 - 235 cP
Densidade (valores típicos)	0,998 – 1,015
Solubilidade (em água)	Insolúvel

### 3.2.5 Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial das misturas estudadas

As Tabelas 3.7 e 3.8 relacionam a procedência e a natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial das misturas estudadas com a identificação dos projetos desenvolvidos para o RAUD.

Tabela 3.7: Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial das misturas

<i>RAUD com CAP 50/70</i>			
<i>Projetos</i>	<i>Procedência</i>	<i>Natureza</i>	<i>Materiais</i>
<b>1</b>	Pedreira Basalto	Gnaisse	Brita 3/8"
	Pedreira Basalto	Gnaisse	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>2</b>	Pedreira Basalto	Gnaisse	Brita 3/8"
	Pedreira Basalto	Gnaisse	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>3</b>	Pedreira Central	Granito	Brita 3/8"
	Pedreira Central	Granito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>4</b>	Pedreira Central	Granito	Brita 3/8"
	Pedreira Central	Granito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>5</b>	Pedreira Tibagi	Riolito	Brita 3/8"
	Pedreira Tibagi	Riolito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>6</b>	Pedreira Tibagi	Riolito	Brita 3/8"
	Pedreira Tibagi	Riolito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1

Tabela 3.8: Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do filer industrial das misturas

<i>RAUD com AMP 55/75-E</i>			
<i>Projetos</i>	<i>Procedência</i>	<i>Natureza</i>	<i>Materiais</i>
<b>7</b>	Pedreira Basalto	Gnaisse	Brita 3/8"
	Pedreira Basalto	Gnaisse	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>8</b>	Pedreira Basalto	Gnaisse	Brita 3/8"
	Pedreira Basalto	Gnaisse	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>9</b>	Pedreira Central	Granito	Brita 3/8"
	Pedreira Central	Granito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>10</b>	Pedreira Central	Granito	Brita 3/8"
	Pedreira Central	Granito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>11</b>	Pedreira Tibagi	Riolito	Brita 3/8"
	Pedreira Tibagi	Riolito	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>12</b>	Pedreira Tibagi	Riolito	Brita 3/8"
	Pedreira Tibagi	Riolito	3/16" ao fundo
	Comercial	Cacítica	CAL CH-1

### 3.2.6 Caracterização e densidade da mistura de agregados

A Tabela 3.9 apresenta a caracterização dos agregados utilizados para compor os traços das misturas asfálticas estudadas. Busca-se com a seleção do tamanho máximo do agregado (Brita 3/8"- 9,5 mm) um melhor desempenho funcional do RAUD no que se refere às condições de atrito, textura superficial, conforto ao rolamento e redução do ruído ambiental, conforme descrito na revisão bibliográfica do tema proposto.

A Tabela 3.10 apresenta a densidade da mistura de agregados, absorções e teores de ligantes efetivos determinados para os estudos de dosagem das misturas asfálticas.



Tabela 3.9: Caracterização dos agregados

Métodos	Ensaios	Valores especificados		Resultados											
				Projetos											
		Mín	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DNER ME 035	Abrasão Los Angeles (s)	-	35,0	20,8	20,8	23,5	23,5	19,5	19,5	20,8	20,8	23,5	23,5	19,5	19,5
DNER ME 054	Equivalente de areia, em peso (%)	45,0	-	70,6	70,6	77,3	77,3	70,6	70,6	70,6	70,6	77,3	77,3	70,6	70,6
ASTM D4791	Partículas chatas e alongadas 3:1 (%)	-	25,0	28,0	28,0	39,0	39,0	28,0	28,0	28,0	28,0	39,0	39,0	28,0	28,0
ASTM C1552	Angularidade de agregado miúdo (%)	40,0	-	48,1	48,1	47,1	47,1	48,1	48,1	48,1	48,1	47,1	47,1	48,1	48,1
AASHTO TP58	Micro Deval agregado miúdo (%)	-	18,0	6,6	6,6	8,3	8,3	6,6	6,6	6,6	6,6	8,3	8,3	6,6	6,6
DNER ME089	Durabilidade do agregado sulfato de sódio (%)	-	12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0	<12,0
NBR14949	Reatividade ao azul de metileno (m/g)	-	10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0

Tabela 3.9: Caracterização dos agregados

Métodos	Ensaio	Valores especificados		Resultados											
		Mín	Max	Projetos											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ASTM C-127	Densidade do agregado seco-Gsa	-	-	2,702	2,702	2,747	2,747	2,702	2,702	2,702	2,702	2,747	2,747	2,702	2,702
	Densidade do agregado graúdo saturado-Gsb	-	-	2,631	2,631	2,636	2,636	2,631	2,631	2,631	2,631	2,636	2,636	2,631	2,631
	Absorção de água do agregado graúdo (%)	-	-	1,00	1,00	0,80	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	1,00
ASTM C-128	Densidade do agregado miúdo seco-Gsa	-	-	2,695	2,695	2,753	2,753	2,695	2,695	2,695	2,695	2,753	2,753	2,695	2,695
	Densidade do agregado miúdo saturado-Gsb	-	-	2,610	2,610	2,675	2,675	2,610	2,610	2,610	2,610	2,675	2,675	2,610	2,610
ASTM C-128	Absorção de água do agregado miúdo (%)	-	-	1,20	1,20	1,10	1,10	1,20	1,20	1,20	1,20	1,10	1,10	1,20	1,20

\*Projeto 1: Basalto CALTRANS CAP ; Projeto 2: Basalto Tennessee CAP; Projeto 3: Central CALTRANS CAP; Projeto 4: Central Tennessee CAP; Projeto 5: Tibagi CALTRANS CAP; Projeto 6:Tibagi Tennessee CAP; Projeto 7: Basalto CALTRANS AMP 55/75-E; Projeto 8: Basalto Tennessee AMP 55/75-E; Projeto 9: Central CALTRANS AMP 55/75-E; Projeto 10: Central Tennessee AMP 55/75-E; Projeto 11: Tibagi CALTRANS AMP 55/75-E; Projeto 12:Tibagi Tennessee AMP 55/75-E.

Tabela 3.10: Densidade da mistura de agregados.

Ensaio	Normas	Resultados											
		Projetos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Densidade real-Gsa	ASTM C-127 e ASTM C-128	2,699	2,699	2,750	2,750	2,699	2,698	2,699	2,726	2,750	2,750	2,646	2,646
Densidade aparente-Gsb		2,621	2,621	2,653	2,653	2,621	2,620	2,621	2,647	2,653	2,653	2,597	2,597
Densidade efetiva-Gse		2,660	2,660	2,701	2,701	2,660	2,659	2,660	2,686	2,701	2,701	2,622	2,622
Densidade efetiva (RICE)-Gse		2,682	2,682	2,722	2,727	2,609	2,608	2,658	2,704	2,699	2,721	2,610	2,612
Absorção de água		1,096	1,096	0,933	0,933	1,092	1,104	1,096	1,107	0,933	0,933	1,092	1,092
Absorção de ligante-Pba <sup>1</sup>		0,565	0,565	0,681	0,681	0,563	0,569	0,562	0,557	0,678	0,678	0,363	0,363
Ligante efetivo-Pbe <sup>2</sup>		4,463	4,463	4,353	4,856	4,465	4,692	4,466	4,470	4,355	4,859	4,655	5,156

<sup>1</sup> absorção de ligante em peso de mistura de agregados

<sup>2</sup> conteúdo efetivo de ligante em peso de mistura asfáltica

### 3.2.7 Composição e graduação da mistura de agregados

As Tabelas 3.11 a 3.22 apresentam as composições, graduações, faixas de trabalho e as tolerâncias admitidas para a mistura de agregados segundo os projetos de dosagem desenvolvidos. As representações gráficas correspondentes são mostradas na sequência de Figuras 3.2 a 3.13.

Analisando as Tabelas 3.11, 3.13, 3.15, 3.17, 3.19, 3.21 e Figuras correspondentes 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10 e 3.12, observa-se que as graduações da mistura de agregados comercialmente disponíveis não atendem a Faixa CALTRANS nas peneiras de abertura 4,76 ou 2,40 mm. Por outro lado, verifica-se que todas as graduações da mistura de agregados estabelecidas para os demais projetos atendem a Faixa Tennessee.

Tabela 3.11: Composição e graduação dos agregados - Projeto 1 - Pedreira Basalto (CALTRANS CAP 50-70)

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
65			34				I	
Peneira		Graduação da Mistura (%)	Faixa CALTRANS (%)		Faixa de Trabalho (%)		Tolerância (%)	
Nº	Abertura		Limite Mín	Limite Max	Limite Mín	Limite Max	Limite Mín	Limite Máx
½"	12,70 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
3/8"	9,52 mm	100,00	85,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	48,10	28,00	38,00	28,00	38,00	-4,00%	4,00%
#8	2,40 mm	25,10	35,00	32,00	25,00	29,10	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	16,50	15,00	23,00	15,00	19,50	-3,00%	3,00%
#30	0,60 mm	11,60	10,00	18,00	10,00	14,60	-3,00%	3,00%
#50	0,33 mm	8,70	8,00	13,00	8,00	11,70	-3,00%	3,00%
#100	0,15 mm	6,50	5,00	11,00	6,50	6,50	0,00%	0,00%
#200	0,07 mm	4,60	3,00	8,00	4,60	4,60	0,00%	0,00%

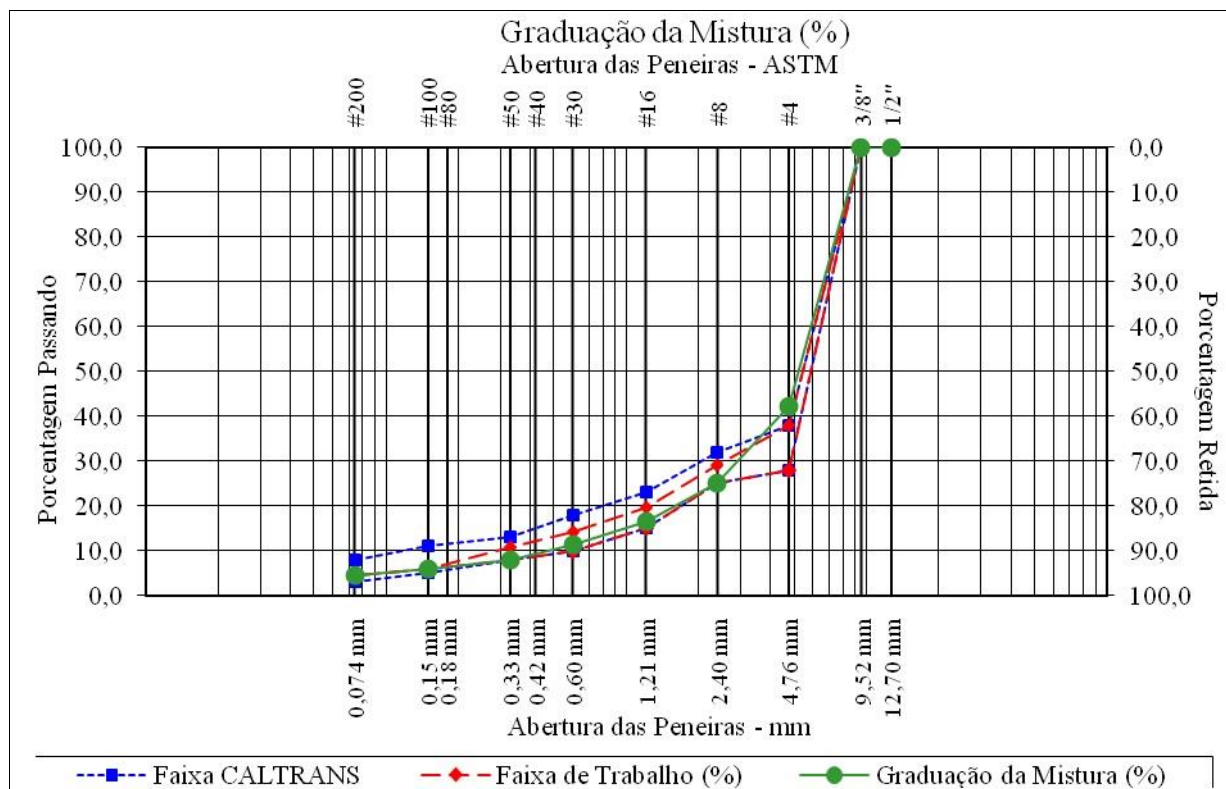


Figura 3.2: Graduação da mistura Pedreira Basalto CALTRANS CAP 50-70

Tabela 3.12: Composição e graduação dos agregados - Projeto 2 - Pedreira Basalto Tennessee CAP 50-70

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
60			39				1	
<i>Peneira</i>		<i>Graduação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa 1/4 TIPO "A" TENNESSEE (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	52,10	40,00	55,00	47,10	55,00	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	28,40	22,00	32,00	24,40	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	18,50	15,00	25,00	15,00	22,50	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	13,10	10,00	18,00	10,00	17,10	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	9,80	8,00	13,00	8,00	13,00	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	7,10	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	5,00	4,00	7,00	4,00	6,00	-1,00%	1,00%

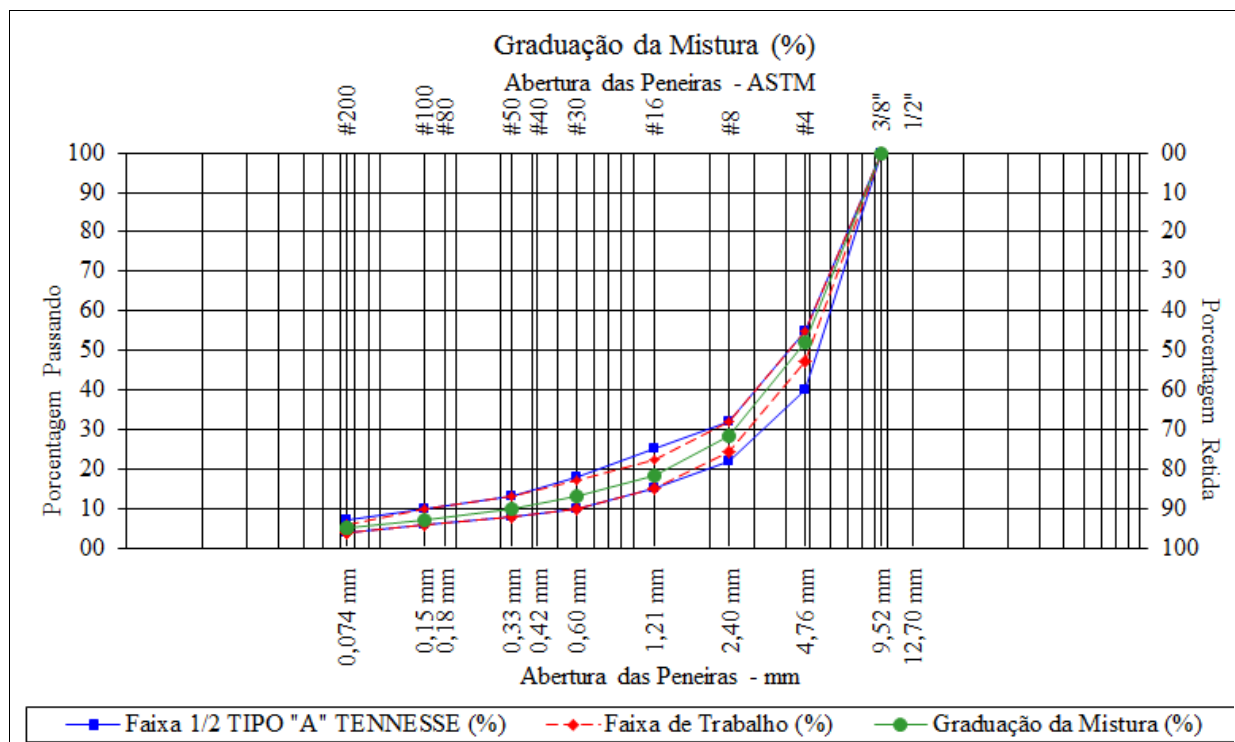


Figura 3.3: Graduação da mistura Pedreira Basalto Tennessee CAP 50-70

Tabela 3.13: Composição e graduação dos agregados - Projeto 3 - Pedreira Central CALTRANS CAP 50-70

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
70			29				1	
<i>Peneira</i>		<i>Gradação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa CALTRANS (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
1/2"	12,70 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
3/8"	9,52 mm	100,00	85,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	36,60	28,00	38,00	32,60	38,00	-4,00%	4,00%
#8	2,40 mm	22,80	25,00	32,00	25,00	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	16,30	15,00	23,00	15,00	19,30	-3,00%	3,00%
#30	0,60 mm	12,30	10,00	18,00	10,00	15,30	-3,00%	3,00%
#50	0,33 mm	9,10	8,00	13,00	8,00	12,10	-3,00%	3,00%
#100	0,15 mm	6,60	5,00	11,00	6,60	6,60	0,00%	0,00%
#200	0,07 mm	4,60	3,00	8,00	4,60	4,60	0,00%	0,00%

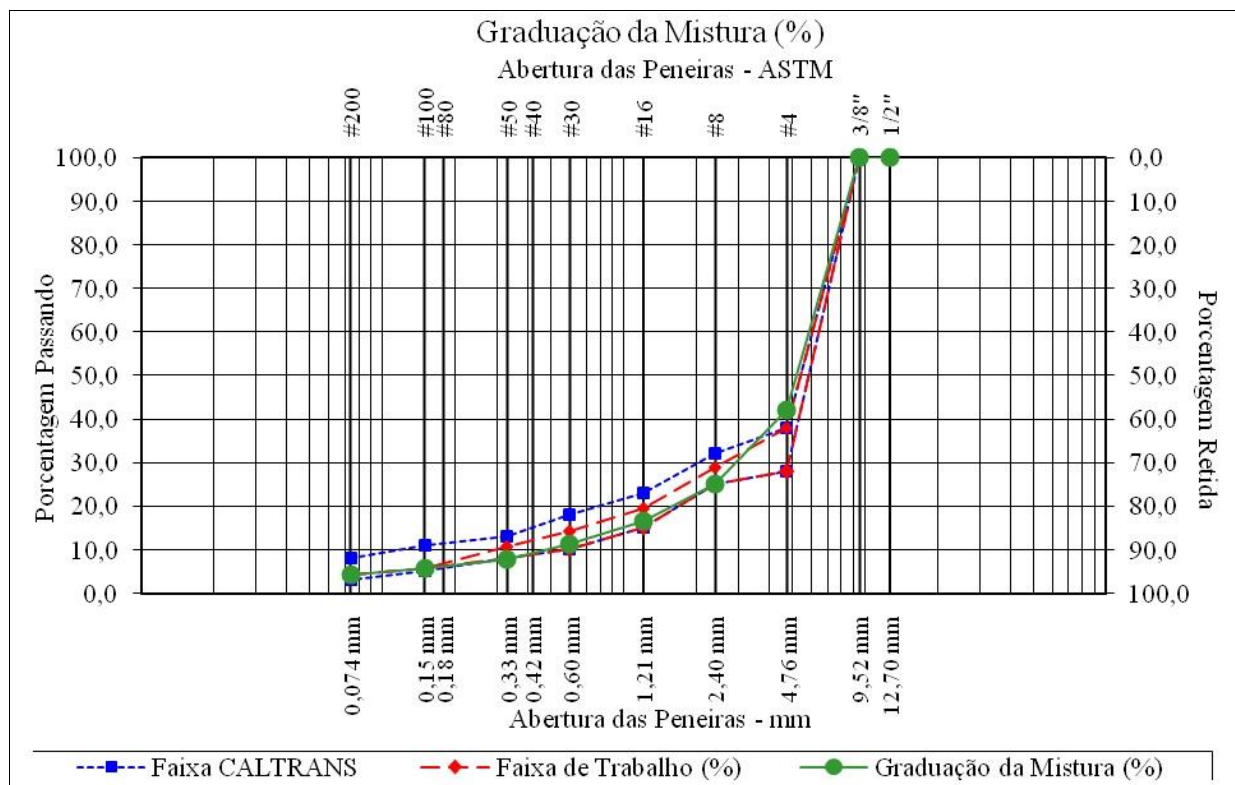


Figura 3.4: Graduação da mistura Pedreira Central CALTRANS CAP 50-70

Tabela 3.14: Composição e graduação dos agregados - Projeto 4 - Pedreira Central Tennessee CAP 50-70 70

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
60			39				1	
<i>Peneira</i>		<i>Graduação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa 1/4 TIPO "A" TENNESSEE (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	44,40	40,00	55,00	40,00	49,40	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	28,90	22,00	32,00	24,90	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	20,60	15,00	25,00	16,60	24,60	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	15,40	10,00	18,00	11,40	18,00	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	11,10	8,00	13,00	8,00	13,00	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	7,90	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	5,50	4,00	7,00	4,50	6,00	-1,00%	1,00%

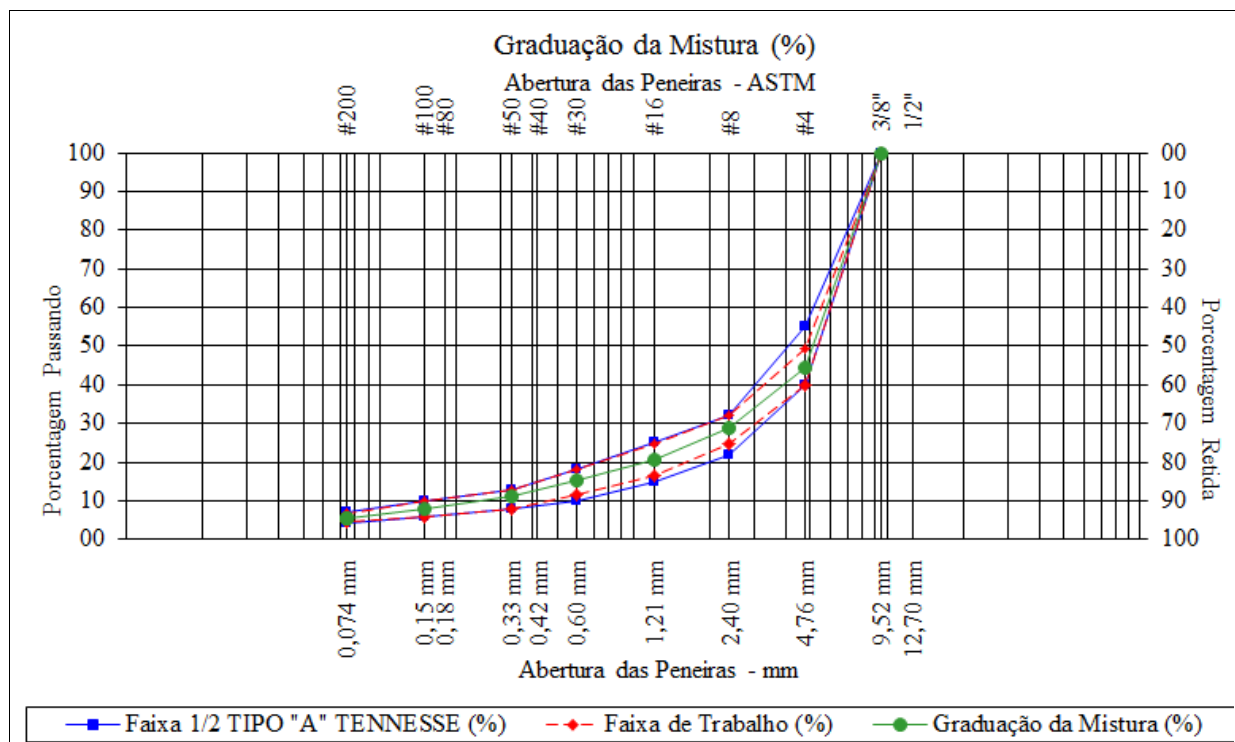


Figura 3.5: Gradação da mistura Pedreira Central Tennessee CAP 50-70

Tabela 3.15: Composição e graduação dos agregados - Projeto 5 - Pedreira Tibagi CALTRANS CAP 50-70

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
65			34				1	
<i>Peneira</i>		<i>Gradação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa CALTRANS (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
3/8"	9,52 mm	100,00	85,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	42,20	28,00	38,00	28,00	38,00	-4,00%	4,00%
#8	2,40 mm	25,00	25,00	32,00	25,00	29,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	16,50	15,00	23,00	15,00	19,50	-3,00%	3,00%
#30	0,60 mm	11,20	10,00	18,00	10,00	14,20	-3,00%	3,00%
#50	0,33 mm	7,80	8,00	13,00	8,00	10,80	-3,00%	3,00%
#100	0,15 mm	5,80	5,00	11,00	5,80	5,80	0,00%	0,00%
#200	0,07 mm	4,30	3,00	8,00	4,30	4,30	0,00%	0,00%



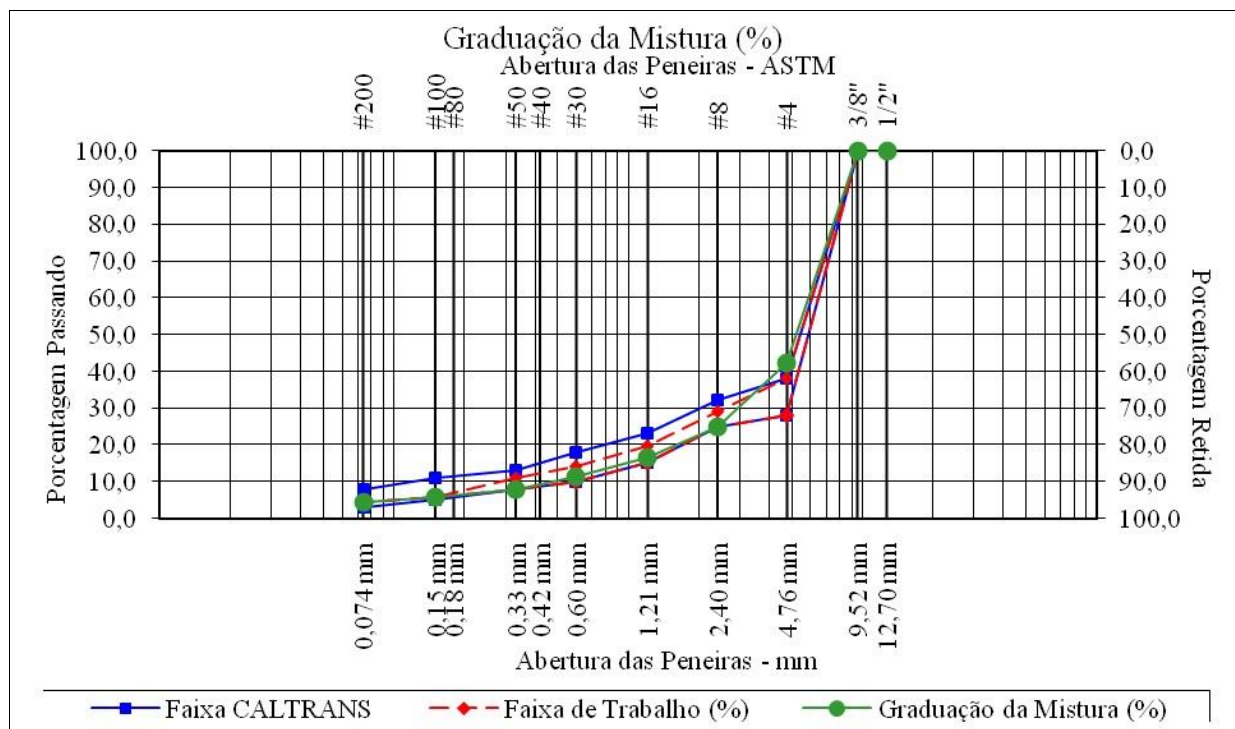


Figura 3.6: Graduação da mistura Pedreira Tibagi CALTRANS CAP 50-70

Tabela 3.16: Composição e graduação dos agregados - Projeto 6 - Pedreira Tibagi Tennessee CAP 50-70

Composição da mistura seca (%)								
Brita 3/8"		3/16" ao fundo					CAL CH-1	
60		39					1	
Peneira		Graduação da Mistura (%)	Faixa 1/4 TIPO "A" TENNESSEE (%)		Faixa de Trabalho (%)		Tolerância (%)	
Nº	Abertura		Limite Mín	Limite Máx	Limite Mín	Limite Máx	Limite Mín	Limite Máx
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	46,00	40,00	55,00	41,00	51,00	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	28,10	22,00	32,00	24,10	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	18,70	15,00	25,00	15,00	22,70	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	12,50	10,00	18,00	10,00	16,50	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	8,80	8,00	13,00	8,00	12,80	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	6,30	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	4,80	4,00	7,00	4,00	5,80	-1,00%	1,00%

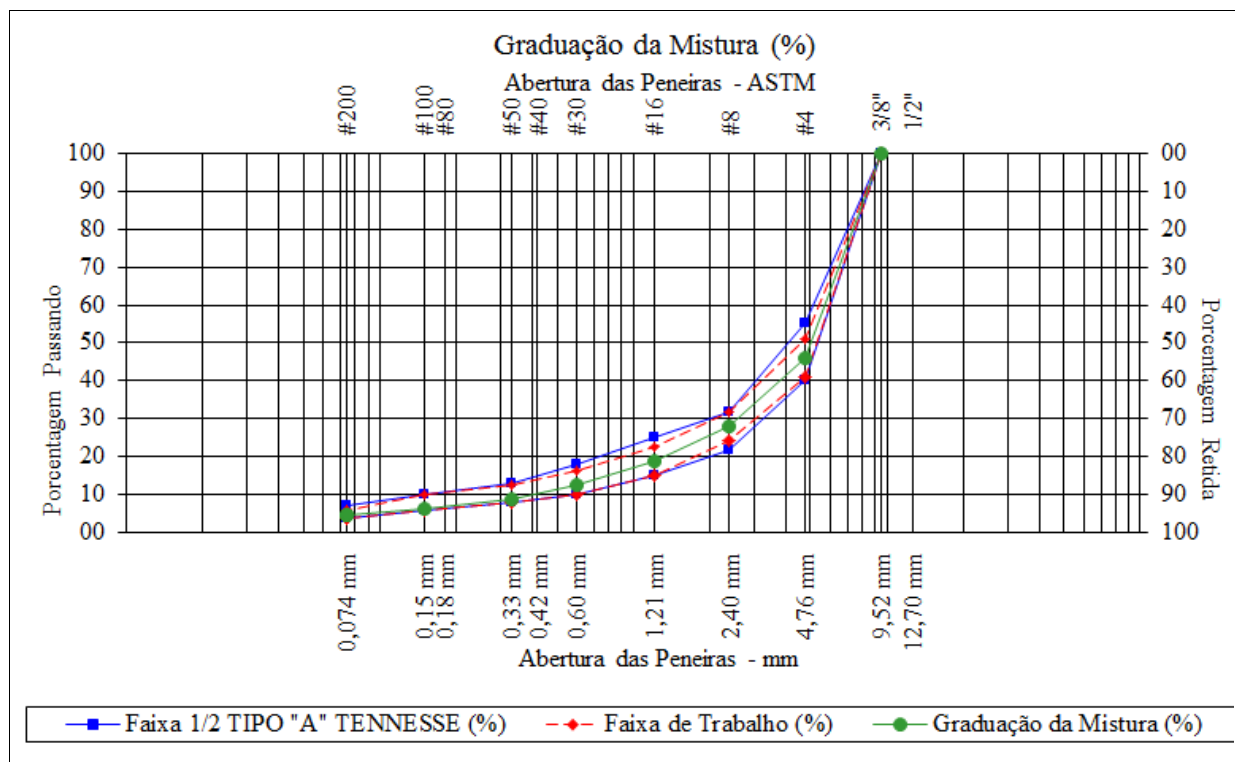


Figura 3.7: Gradação da mistura Pedreira Tibagi Tennessee CAP 50-70

Tabela 3.17: Composição e graduação dos agregados - Projeto 7 - Pedreira Basalto CALTRANS AMP 55/75-E

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
60			39				1	
Peneira		Gradação da Mistura (%)	Faixa CALTRANS (%)		Faixa de Trabalho (%)		Tolerância (%)	
Nº	Abertura		Limite Mín	Limite Máx	Limite Mín	Limite Max	Limite Mín	Limite Máx
1/2"	12,70 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
3/8"	9,52 mm	100,00	85,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	48,10	28,00	38,00	28,00	38,00	-4,00%	4,00%
#8	2,40 mm	25,10	25,00	32,00	25,00	29,10	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	16,50	15,00	23,00	15,00	19,50	-3,00%	3,00%
#30	0,60 mm	11,60	10,00	18,00	10,00	14,60	-3,00%	3,00%
#50	0,33 mm	8,70	8,00	13,00	8,00	11,70	-3,00%	3,00%
#100	0,15 mm	6,50	5,00	11,00	6,50	6,50	0,00%	0,00%
#200	0,07 mm	4,60	3,00	8,00	4,60	4,60	0,00%	0,00%

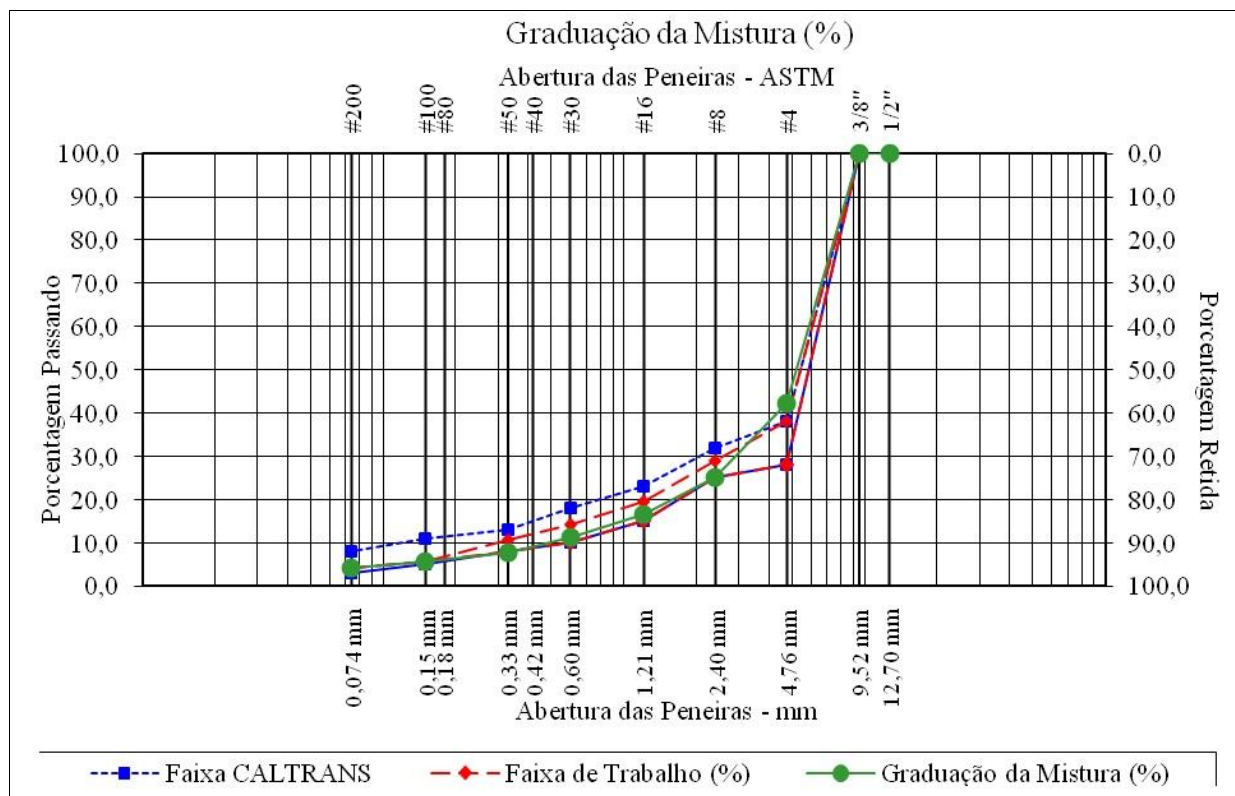


Figura 3.8: Graduação da mistura Pedreira Basalto CALTRANS AMP 55/75-E

Tabela 3.18: Composição e graduação dos agregados - Projeto 8 - Pedreira Basalto Tennessee AMP 55/75-E

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
65			34				1	
<i>Peneira</i>		<i>Gradação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa 1/4 TIPO "A" TENNESSEE (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	52,10	40,00	55,00	47,10	55,00	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	28,40	22,00	32,00	24,40	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	18,50	15,00	25,00	15,00	22,50	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	13,10	10,00	18,00	10,00	17,10	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	9,80	8,00	13,00	8,00	13,00	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	7,10	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	5,00	4,00	7,00	4,00	6,00	-1,00%	1,00%

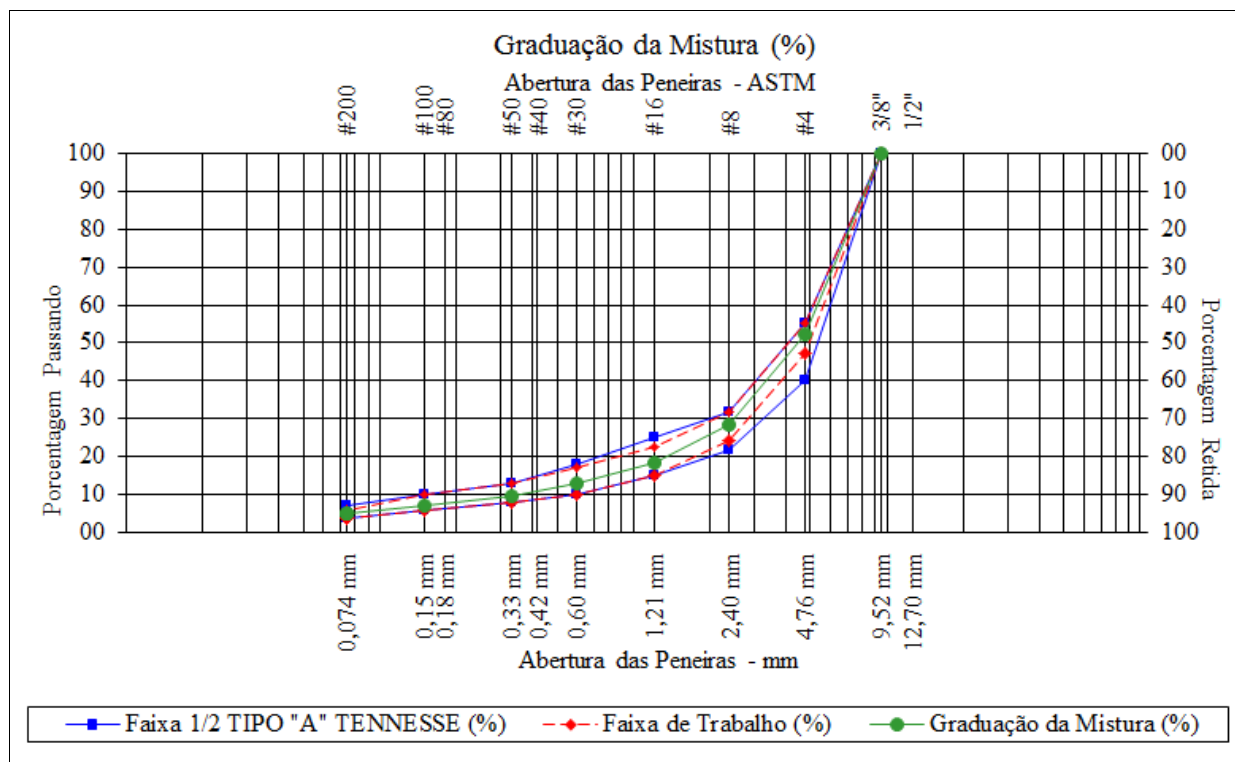


Figura 3.9: Gradação da mistura Pedreira Basalto Tennessee AMP 55/75-E

Tabela 3.19: Composição e graduação dos agregados - Projeto 9 - Pedreira Central CALTRANS AMP 55/75-E

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
70			29				1	
<i>Peneira</i>		<i>Gradação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa CALTRANS (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
1/2"	12,70 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
3/8"	9,52 mm	100,00	85,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	36,60	28,00	38,00	32,60	38,00	-4,00%	4,00%
#8	2,40 mm	22,80	25,00	32,00	25,00	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	16,30	15,00	23,00	15,00	19,30	-3,00%	3,00%
#30	0,60 mm	12,30	10,00	18,00	10,00	15,30	-3,00%	3,00%
#50	0,33 mm	9,10	8,00	13,00	8,00	12,10	-3,00%	3,00%
#100	0,15 mm	6,60	5,00	11,00	6,60	6,60	0,00%	0,00%
#200	0,07 mm	4,60	3,00	8,00	4,60	4,60	0,00%	0,00%

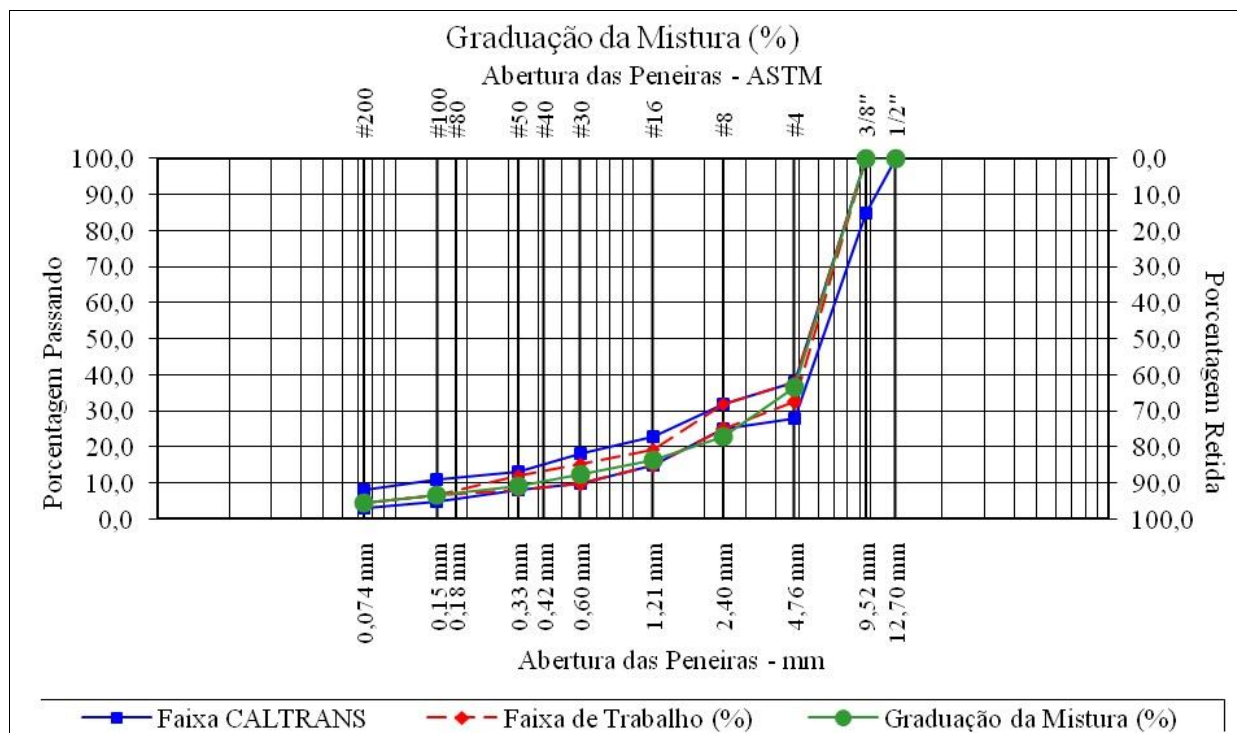


Figura 3.10: Graduação da mistura Pedreira Central CALTRANS AMP 55/75-E

Tabela 3.20: Composição e graduação dos agregados - Projeto 10 - Pedreira Central Tennessee AMP 55/75-E

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
60			39				I	
<i>Peneira</i>		<i>Graduação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa ¼ TIPO "A" TENNESSEE (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	44,40	40,00	55,00	40,00	49,40	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	28,90	22,00	32,00	24,90	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	20,60	15,00	25,00	16,60	24,60	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	15,40	10,00	18,00	11,40	18,00	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	11,10	8,00	13,00	8,00	13,00	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	7,90	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	5,50	4,00	7,00	4,50	6,00	-1,00%	1,00%

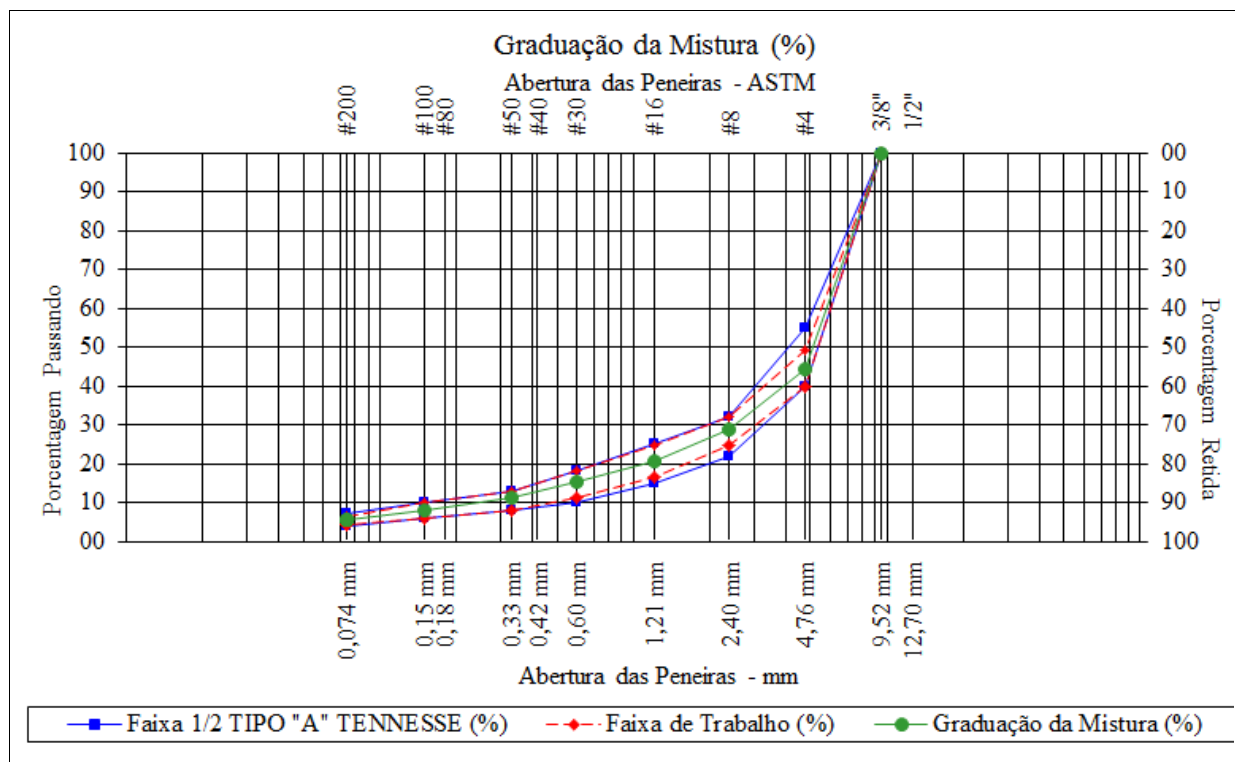


Figura 3.11: Gradação da mistura Pedreira Central Tennessee AMP 55/75-E

Tabela 3.21: Composição e graduação dos agregados - Projeto 11 - Pedreira Tibagi CALTRANS AMP 55/75-E

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"			3/16" ao fundo				CAL CH-1	
65			34				1	
<i>Peneira</i>		<i>Gradação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa CALTRANS (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
1/2"	12,70 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
3/8"	9,52 mm	100,00	85,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	42,20	28,00	38,00	28,00	38,00	-4,00%	4,00%
#8	2,40 mm	25,00	25,00	32,00	25,00	29,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	16,50	15,00	23,00	15,00	19,50	-3,00%	3,00%
#30	0,60 mm	11,20	10,00	18,00	10,00	14,20	-3,00%	3,00%
#50	0,33 mm	7,80	8,00	13,00	8,00	10,80	-3,00%	3,00%
#100	0,15 mm	5,80	5,00	11,00	5,80	5,80	0,00%	0,00%
#200	0,07 mm	4,30	3,00	8,00	4,30	4,30	0,00%	0,00%

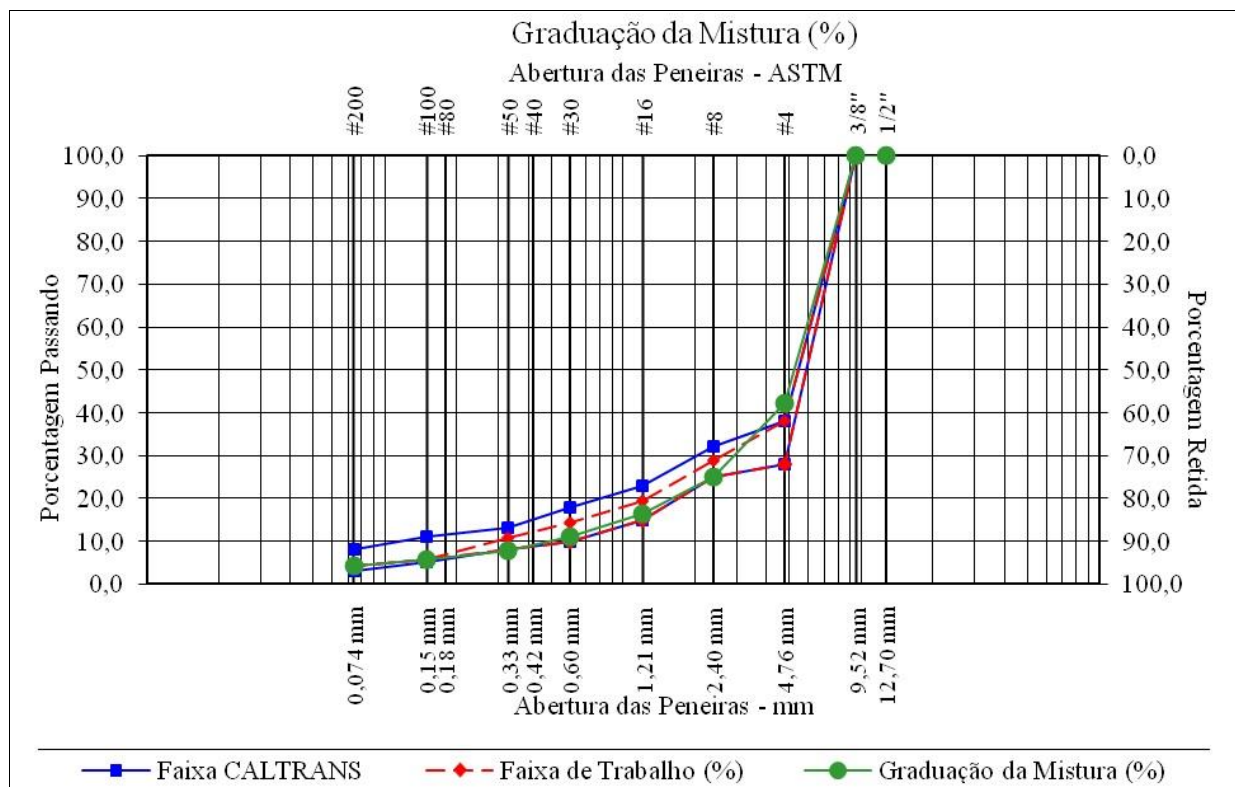


Figura 3.12: Graduação da mistura Pedreira Tibagi CALTRANS AMP 55/75-E

Tabela 3.22: Composição e graduação dos agregados - Projeto 12 - Pedreira Tibagi Tennessee AMP 55/75-E

<i>Composição da mistura seca (%)</i>								
Brita 3/8"		3/16" ao fundo					CAL CH-1	
60		39					1	
<i>Peneira</i>		<i>Graduação da Mistura (%)</i>	<i>Faixa 1/4 TIPO "A" TENNESSEE (%)</i>		<i>Faixa de Trabalho (%)</i>		<i>Tolerância (%)</i>	
<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>		<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Max</i>	<i>Limite Mín</i>	<i>Limite Máx</i>
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	46,00	40,00	55,00	41,00	51,00	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	28,10	22,00	32,00	24,10	32,00	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	18,70	15,00	25,00	15,00	22,70	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	12,50	10,00	18,00	10,00	16,50	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	8,80	8,00	13,00	8,00	12,80	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	6,30	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	4,80	4,00	7,00	4,00	5,80	-1,00%	1,00%

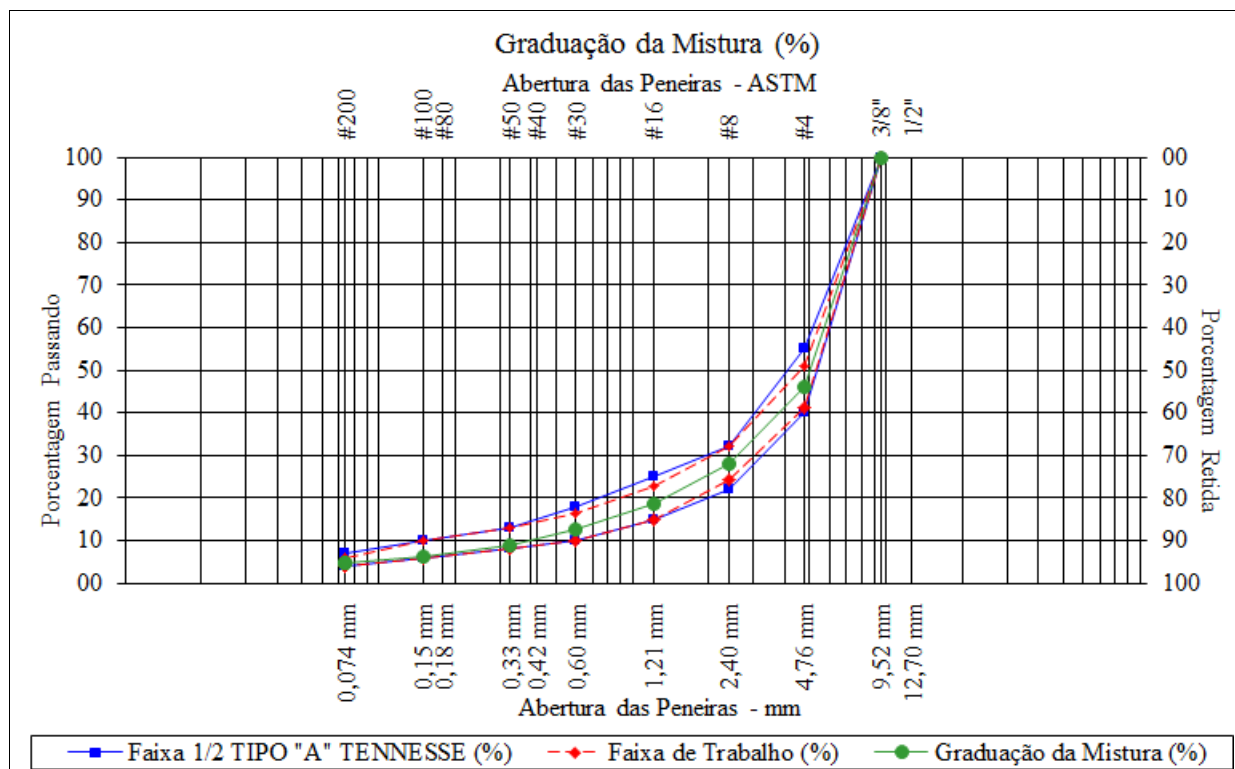


Figura 3.13: Graduação da mistura Pedreira Tibagi Tennessee AMP 55/75-E

### 3.3 ESTUDO DE DOSAGEM DO RAUD

Os procedimentos utilizados para os projetos de dosagem do RAUD foram baseados na interpretação das relações volumétricas obtidas no estudo Marshall e na avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas em estudo.

Os seguintes critérios foram adotados para a seleção do teor de ligante asfáltico de projeto:

- espessura mínima do filme de asfalto ( $9,0 \mu\text{m}$ ), determinada através da Equação 2.9, de modo a assegurar boa resistência da mistura asfáltica à desagregação (resistência à tração por compressão diametral), ao dano por umidade induzida (RRT) e ao desgaste por abrasão (ensaio Cantabro);
- verificação da existência do contato grão-grão da mistura asfáltica obtido pelas expressões 2.1, 2.2 e 2.3, conforme determina a NCHRP (2011);
- avaliação da sensibilidade ao escorrimento do ligante - ASTM D 6390 (ASTM, 2011c) ou AASHTO T-305 (AASHTO, 1997).



Adicionalmente, foi selecionada uma mistura asfáltica em estudo para a verificação da sua estabilidade mecânica no teor de ligante de projeto, através do simulador de tráfego tipo LPC.

Para o projeto de dosagem das misturas asfálticas foi adotado o procedimento do ensaio Marshall DNER ME – 043/95 (DNER, 1995), sendo a compactação dos corpos de prova (CPs) realizada com 50 golpes por face com o objetivo de evitar a quebra excessiva de agregados, conforme recomenda a metodologia norte-americana para o RAUD.

As respectivas temperaturas de mistura e compactação do CPs foram determinadas para os ligantes asfálticos CAP 50/70 e AMP 55/75-E, conforme apresentado na Tabela 3.5 e Figura 3.1 (a e b). Os CPs foram armazenados previamente em estufa por 2 horas, na temperatura estabelecida para a compactação da mistura, visando à adequada absorção do ligante.

As Figuras 3.14 a 3.25 mostram a representação gráfica das densidades aparentes dos CPs, massas específicas máximas medidas e dos parâmetros volumétricos / mecânicos Marshall em função de cinco teores de ligantes predefinidos.

Em misturas descontínuas com elevado contato grão-grão como o RAUD, a estabilidade Marshall apresenta pouca sensibilidade ao teor de ligante até o ponto em que o cimento asfáltico preenche os vazios do agregado mineral (VAM) e passa a promover a separação das partículas, conforme pode ser observado pela representação gráfica, (Figuras 3.14 a 3.25), dos valores de estabilidade Marshall de CPs (não condicionados e condicionados a 60°C, 24 horas em água).

Verifica-se, portanto, que não há significado prático na determinação dos parâmetros mecânicos de estabilidade e fluência para a definição do teor de ligante de projeto, sendo relevantes apenas as características volumétricas do método Marshall (Volume de vazios – Vv, Relação Betume-Vazios – RBV, e Vazios do Agregado Mineral – VAM) para a dosagem das misturas asfálticas em estudo.

Observa-se ainda nas Figuras 3.14 a 3.25 os valores de Volume de vazios – Vv, Relação Betume-Vazios – RBV, Vazios do Agregado Mineral – VAM, massa específica máxima medida e densidade aparente das misturas asfálticas em estudo, determinados em função do teor de ligante asfáltico de projeto. Os teores de ligante de projeto foram selecionados com

base na verificação dos critérios técnicos estabelecidos no estudo de dosagem para o RAUD e descritos nos itens 3.3.1 a 3.3.3 da pesquisa.

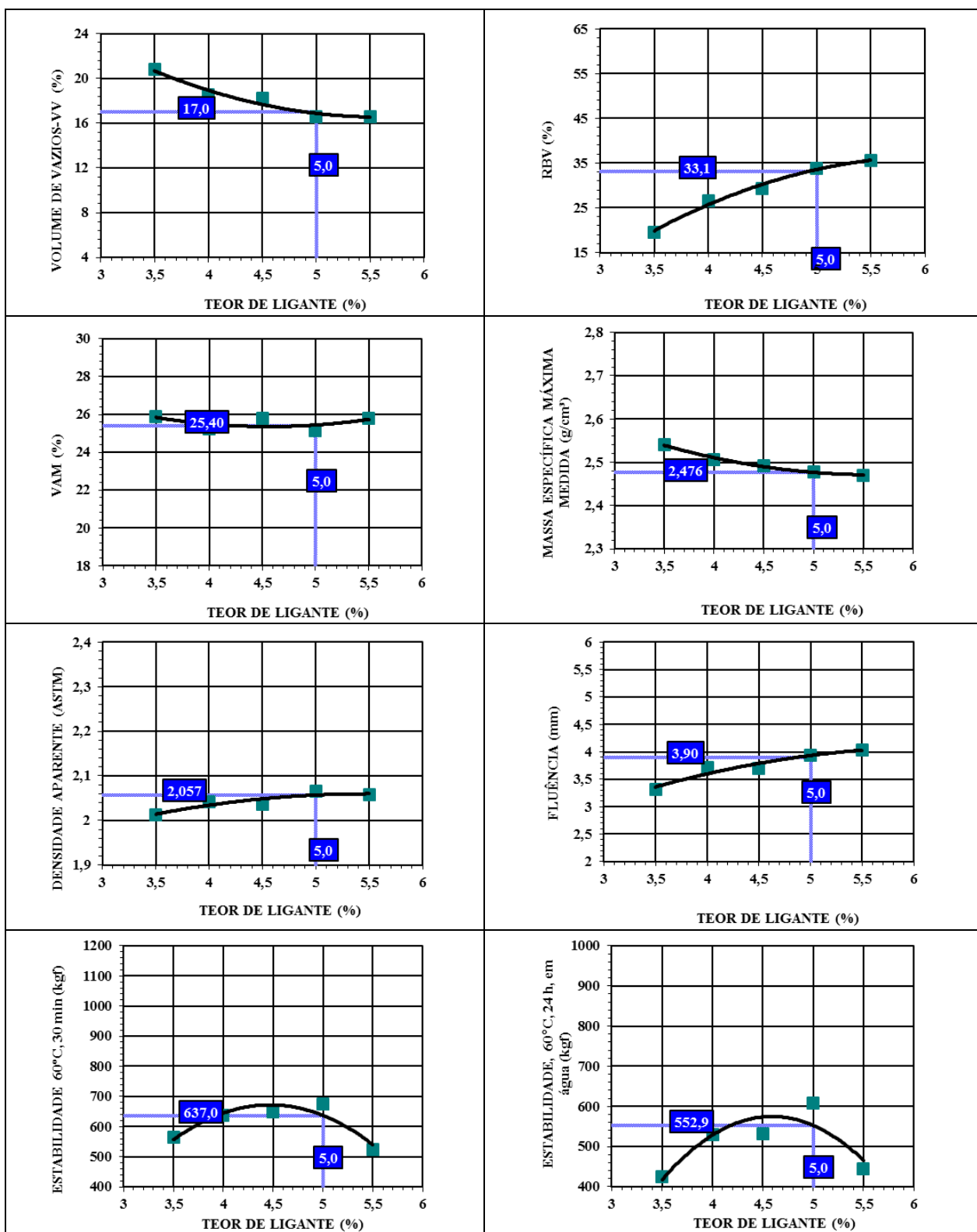


Figura 3.14: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 1 - Pedreira Basalto, Faixa CALTRANS com CAP 50/70

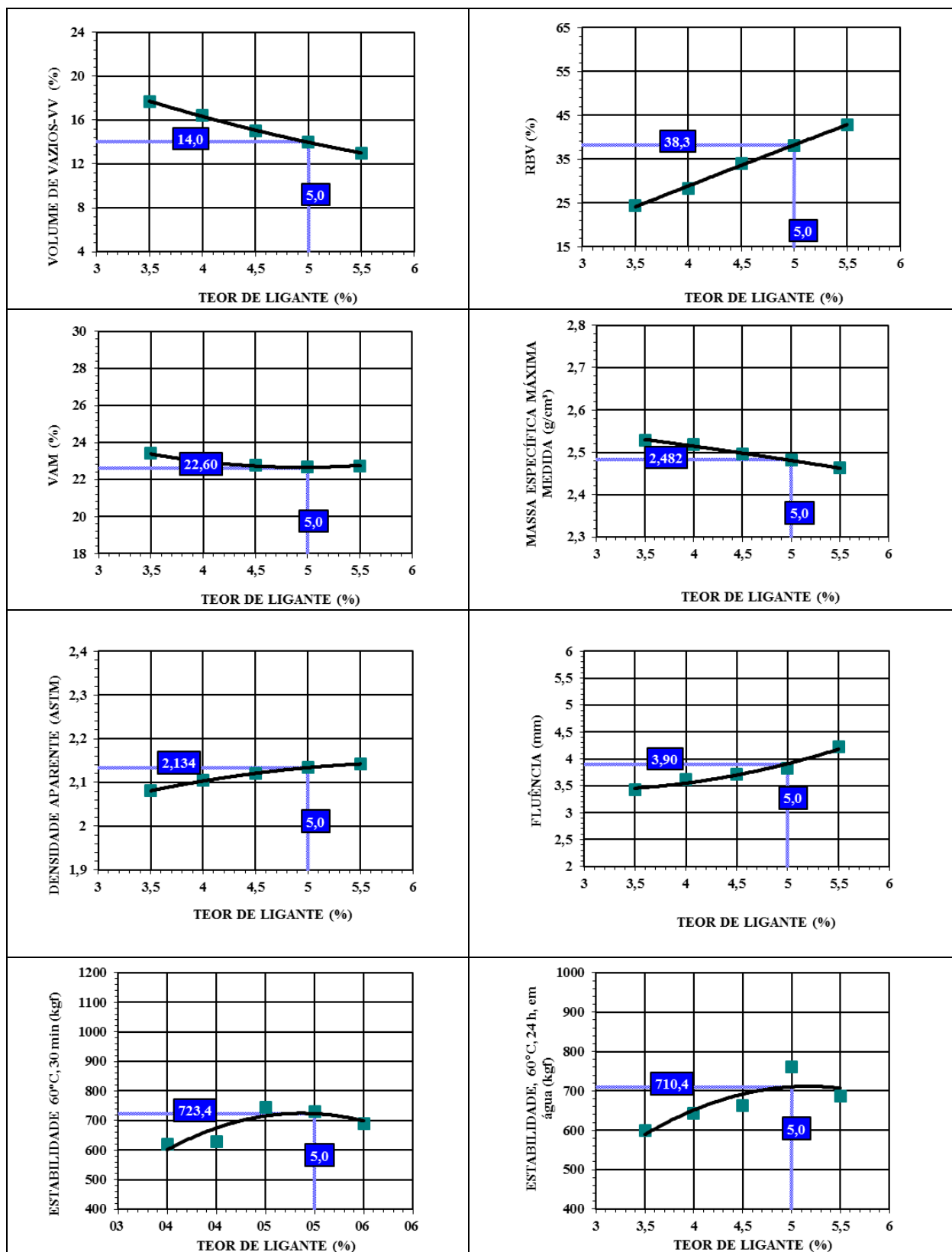


Figura 3.15: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 2 - Pedreira Basalto, Faixa Tennessee com CAP 50/70

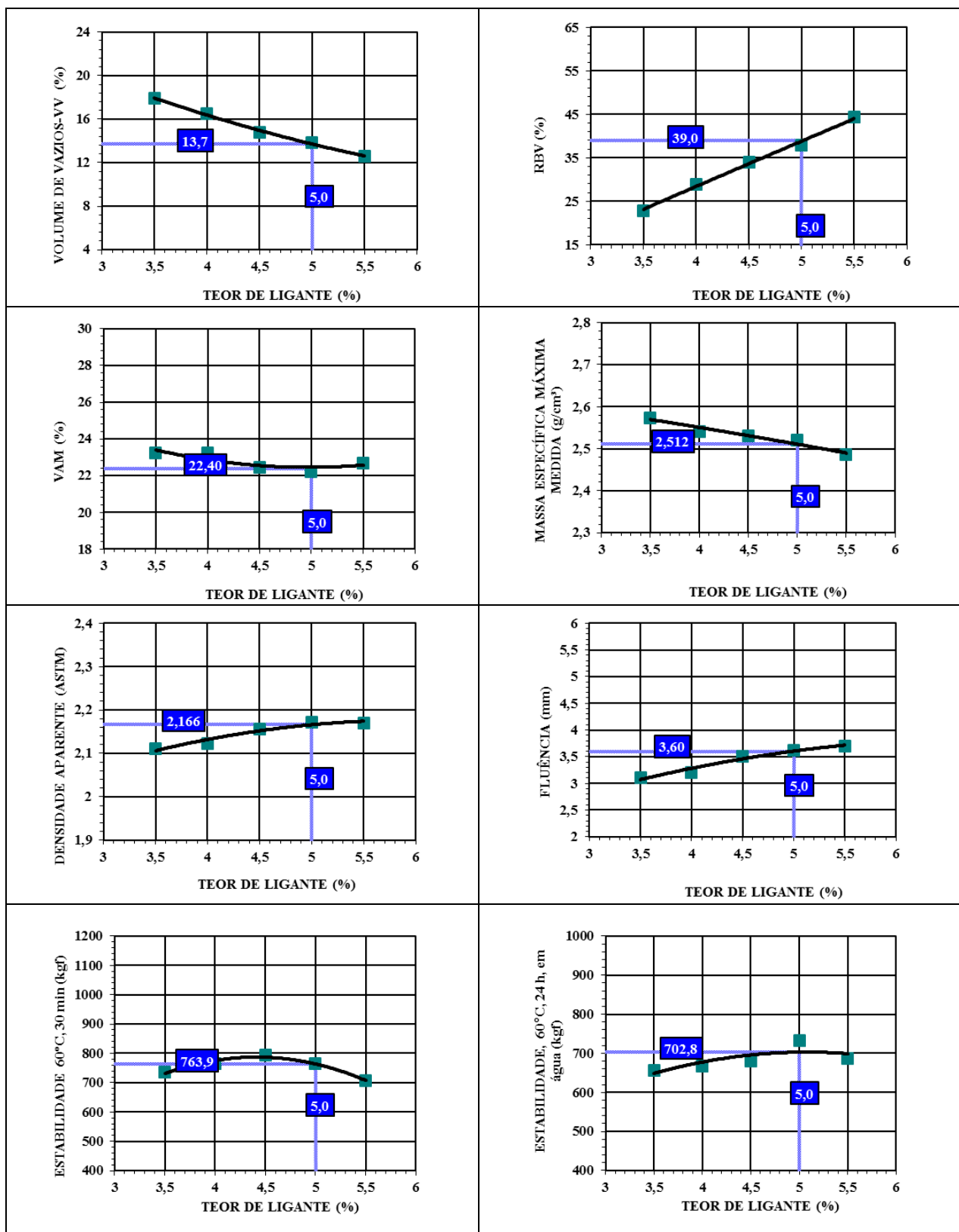


Figura 3.16: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 3 - Pedreira Central, Faixa CALTRANS com CAP 50/70

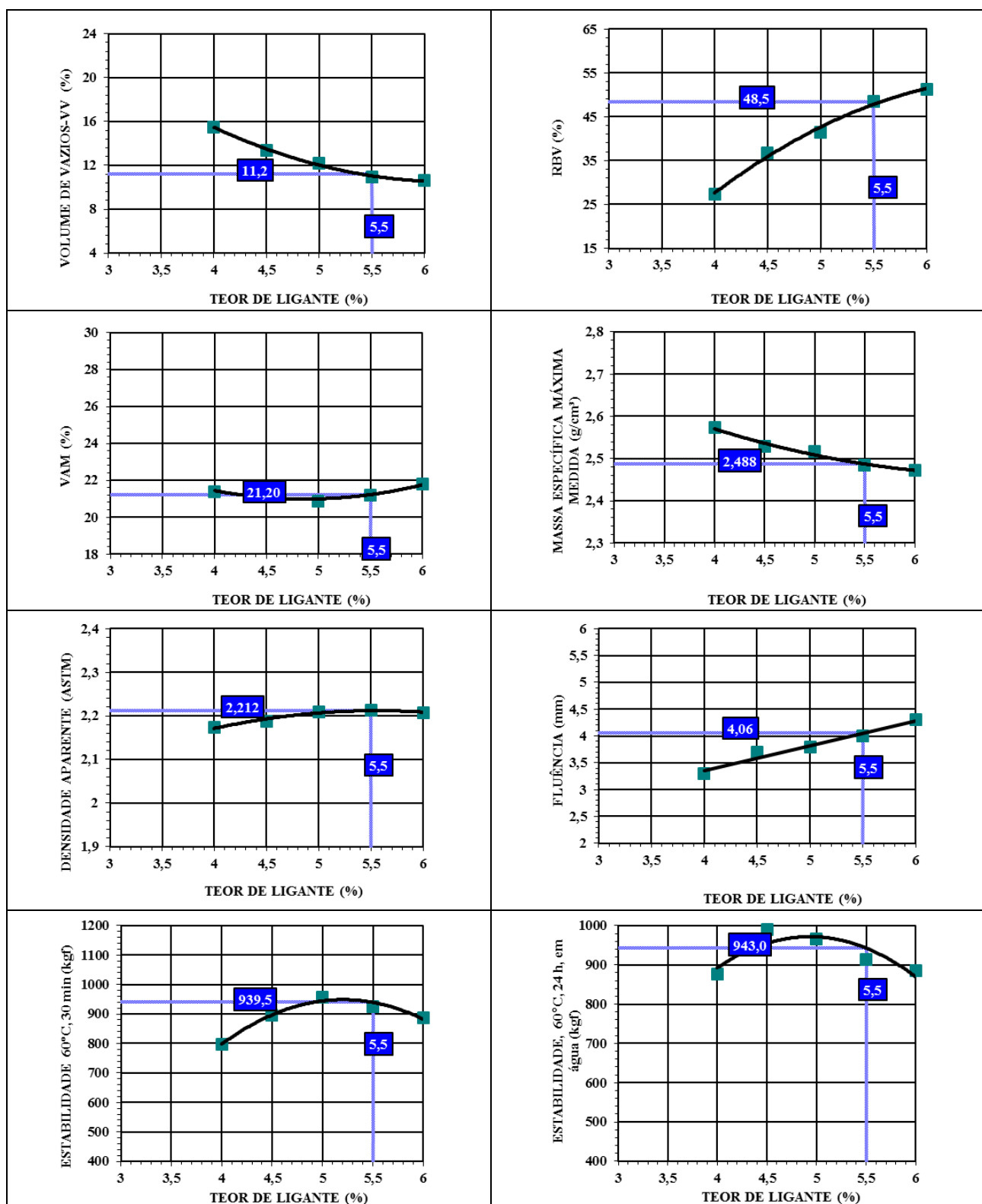


Figura 3.17: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 4 - Pedreira Central, Faixa Tennessee com CAP 50/70

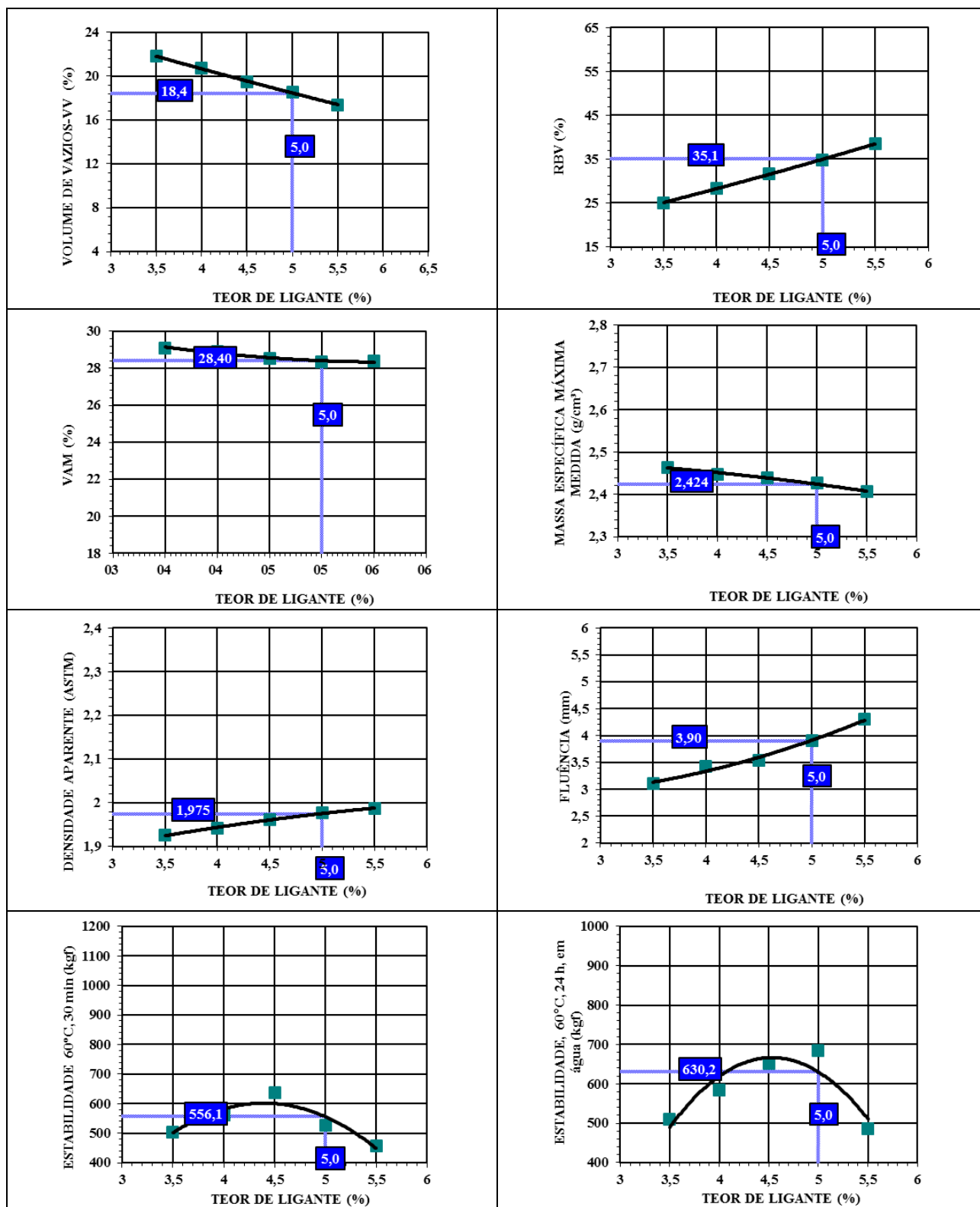


Figura 3.18: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 5 - Pedreira Tibagi, Faixa CALTRANS com CAP 50/70

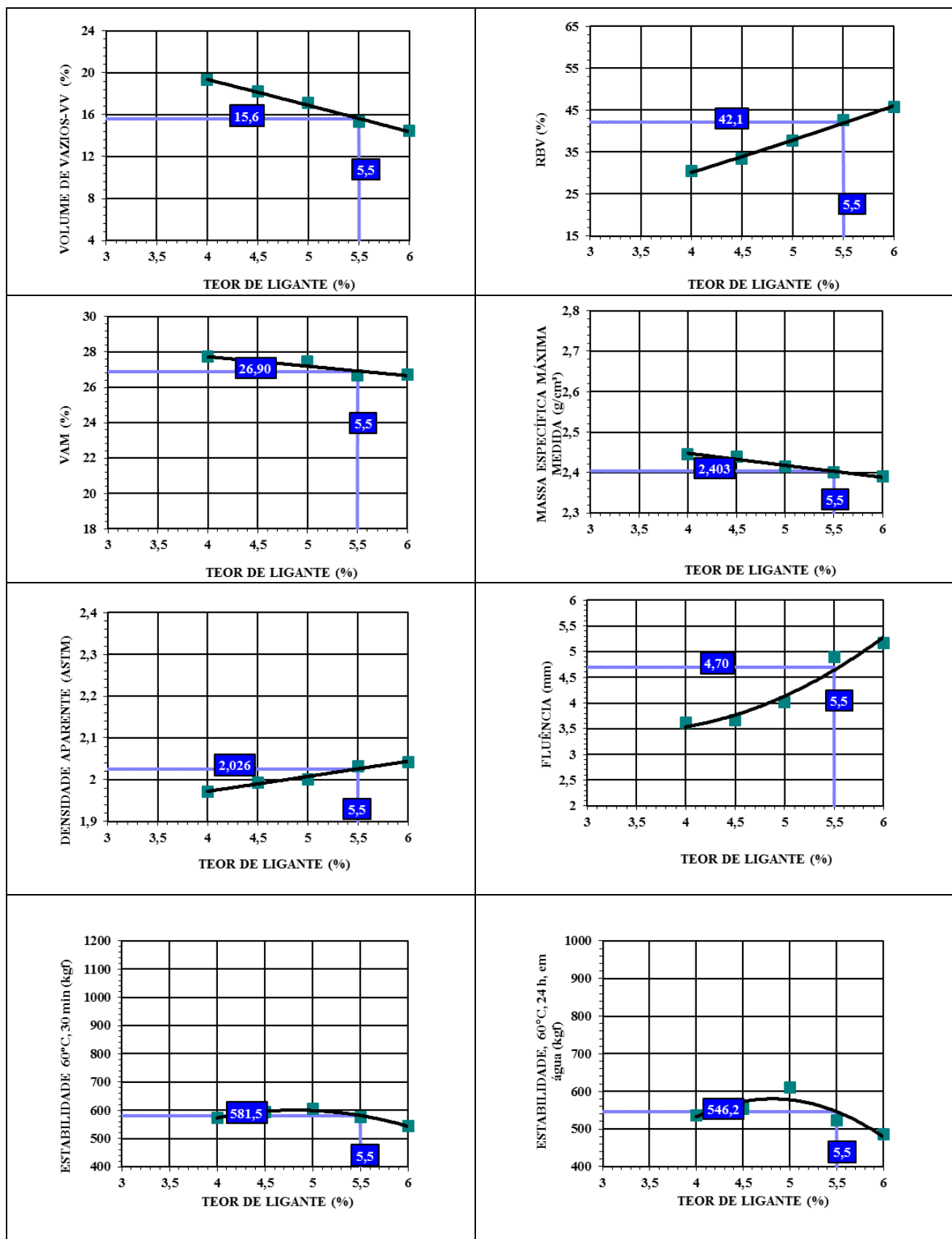


Figura 3.19: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 6 - Pedreira Tibagi, Faixa Tennessee com CAP 50/70

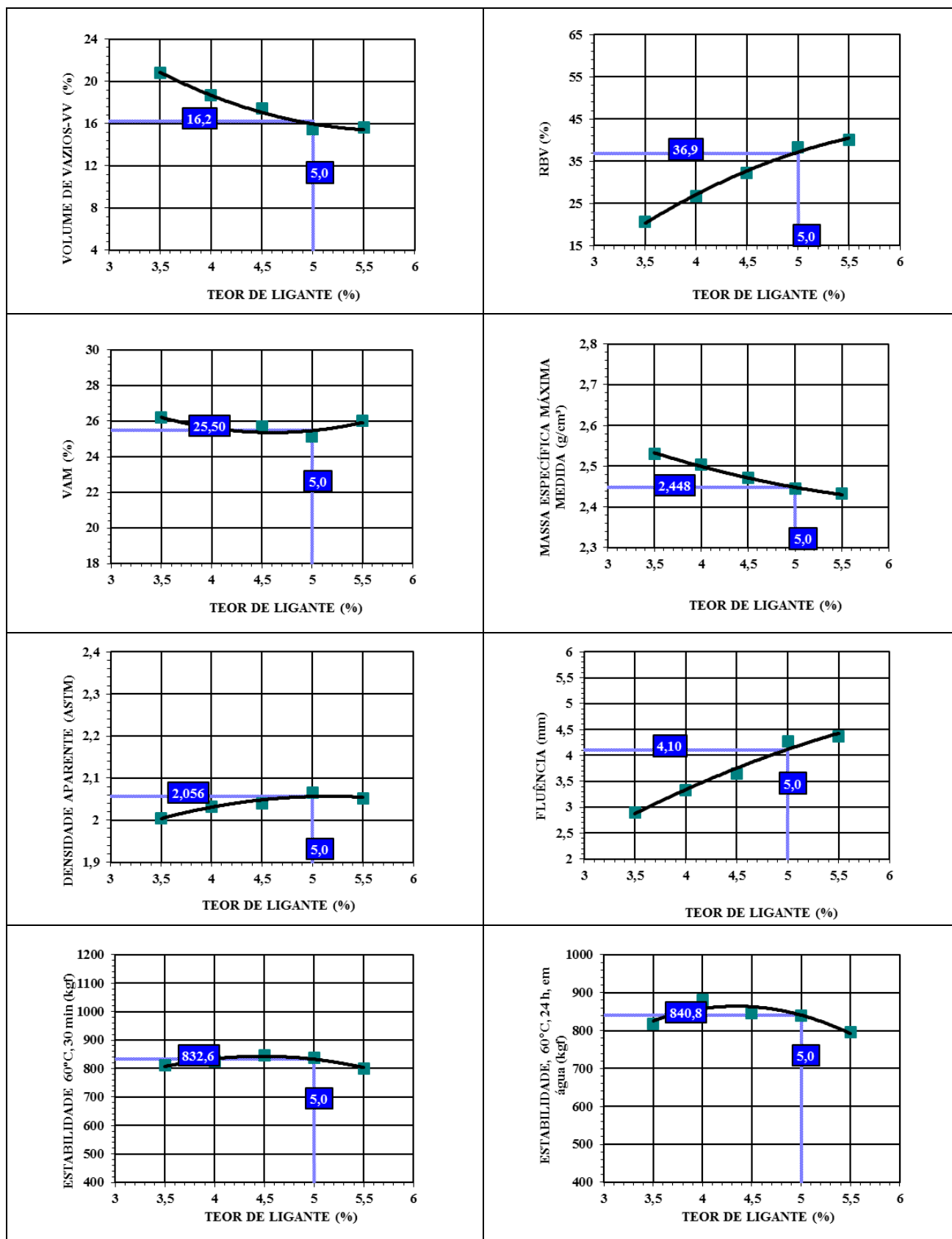


Figura 3.20: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 7 - Pedreira Basalto, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E



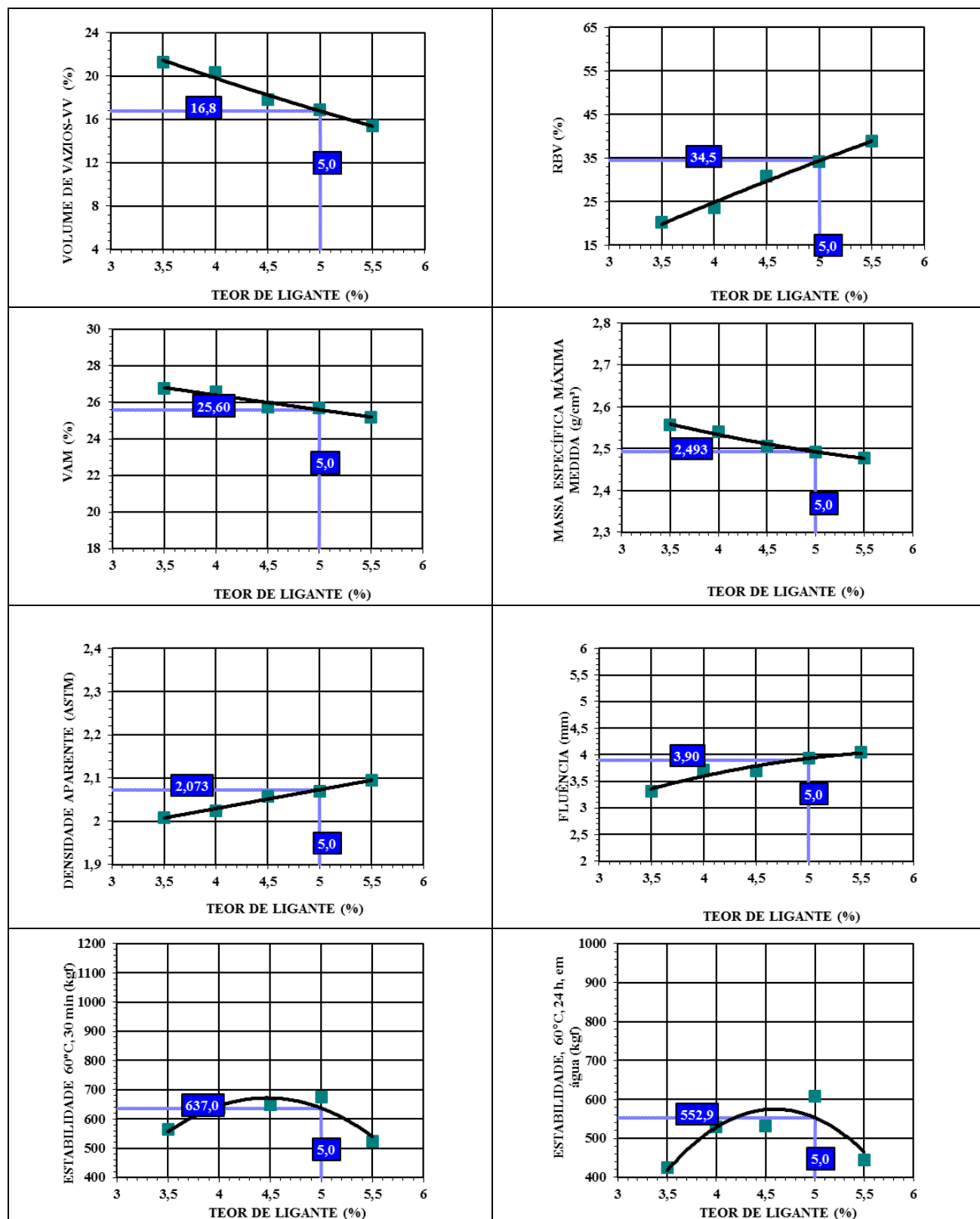


Figura 3.21: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 8 - Pedreira Basalto, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E

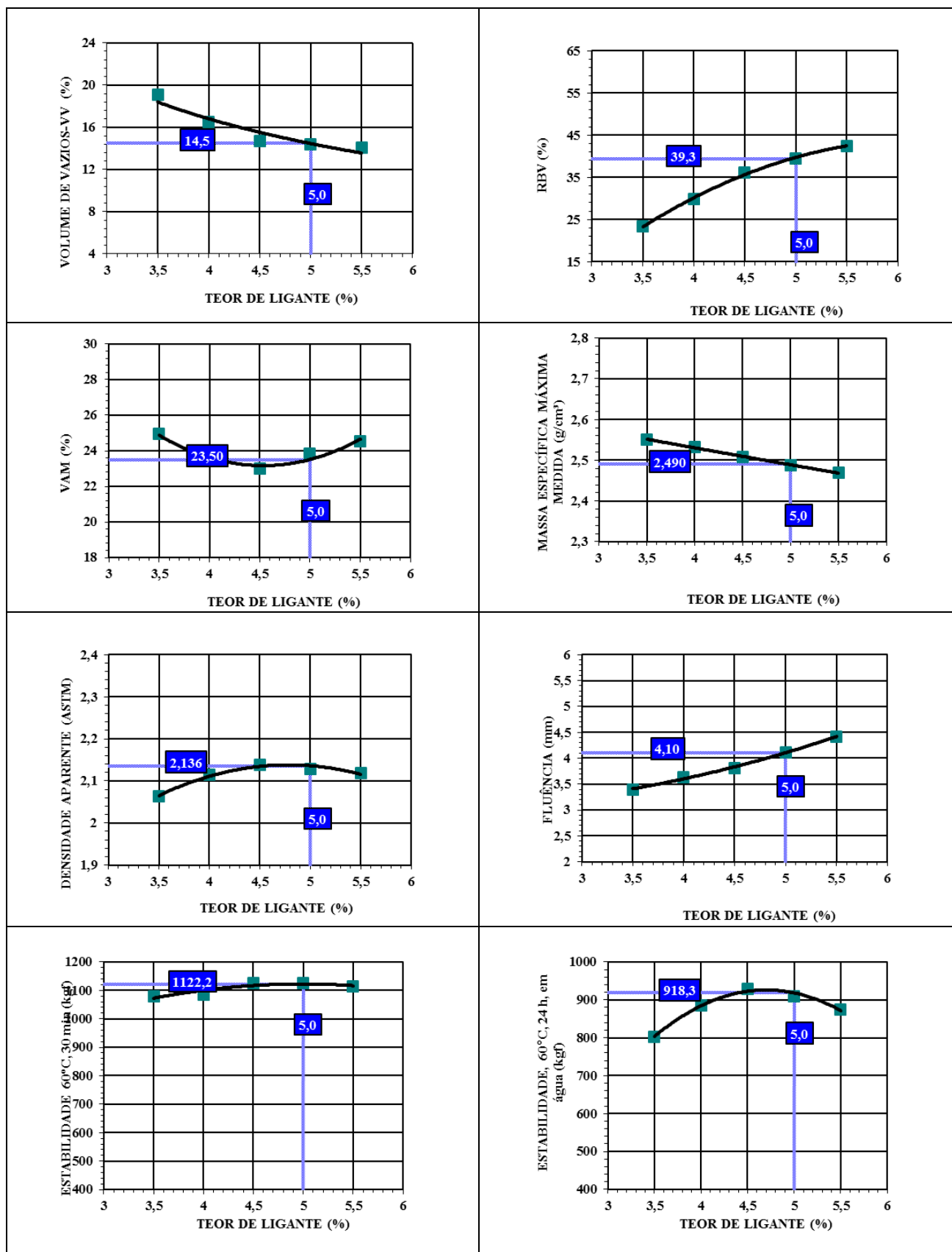


Figura 3.22: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 9 - Pedreira Central, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E

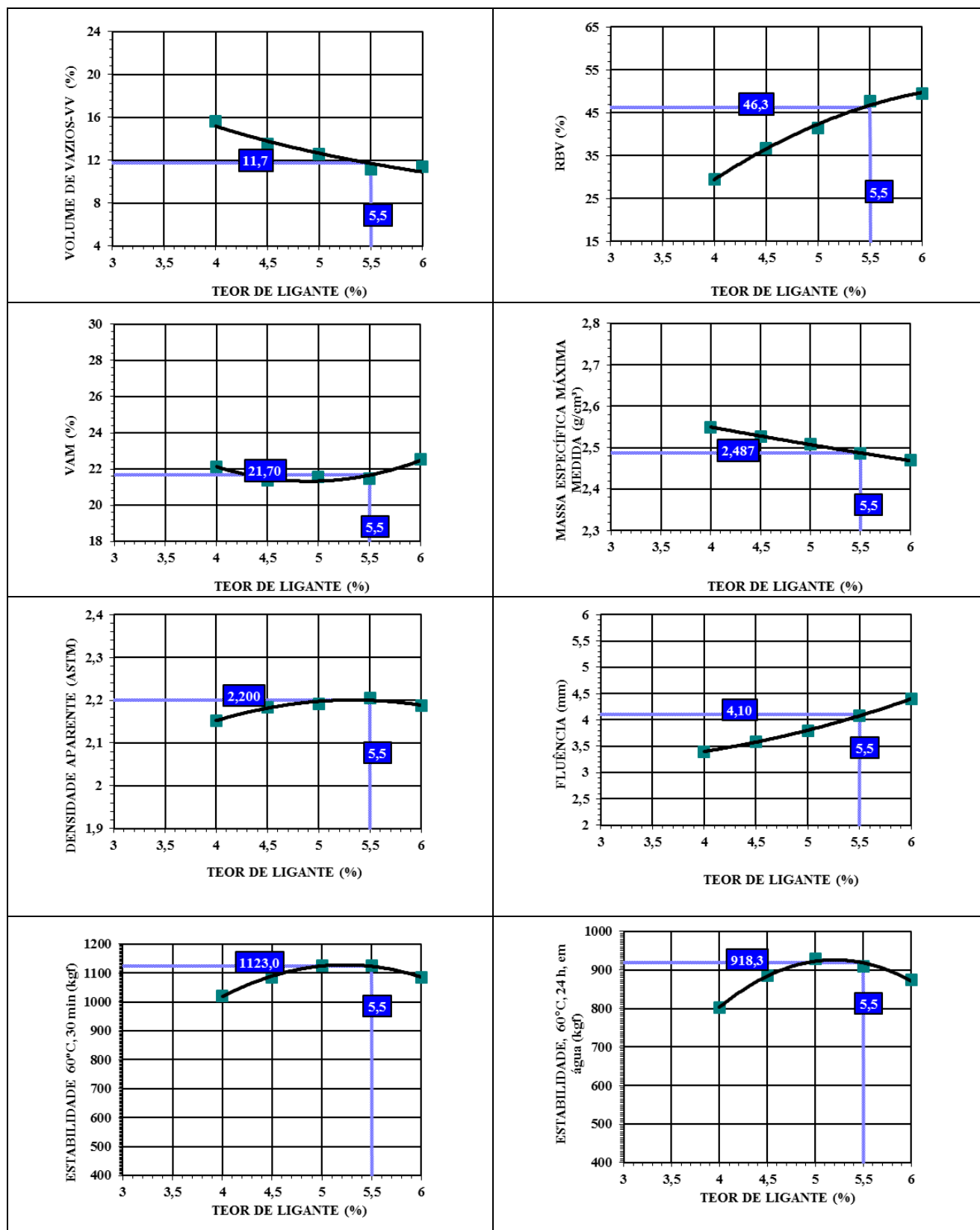


Figura 3.23: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 10 - Pedreira Central, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E

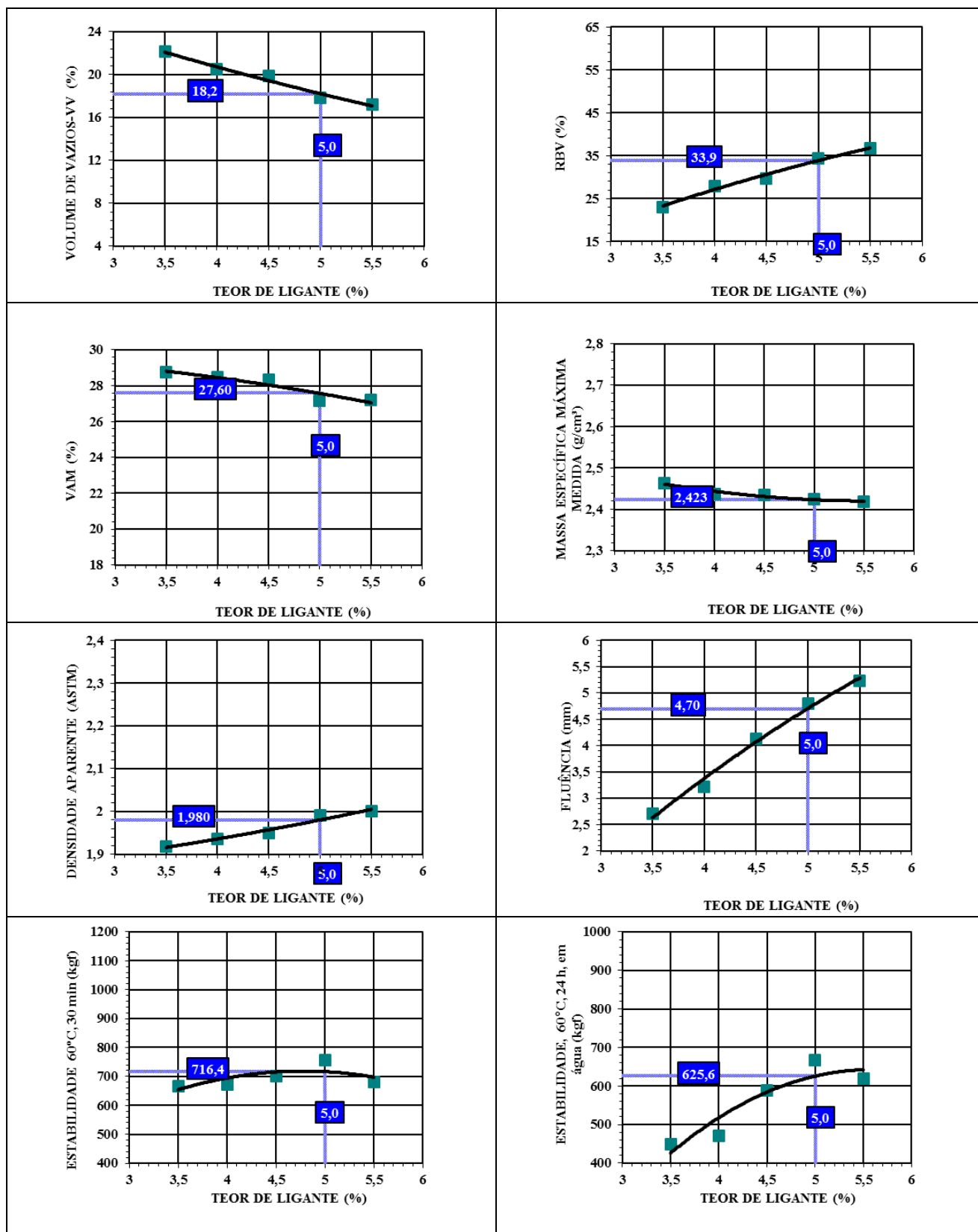


Figura 3.24: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 11 - Pedreira Tibagi, Faixa CALTRANS com AMP 55/75-E

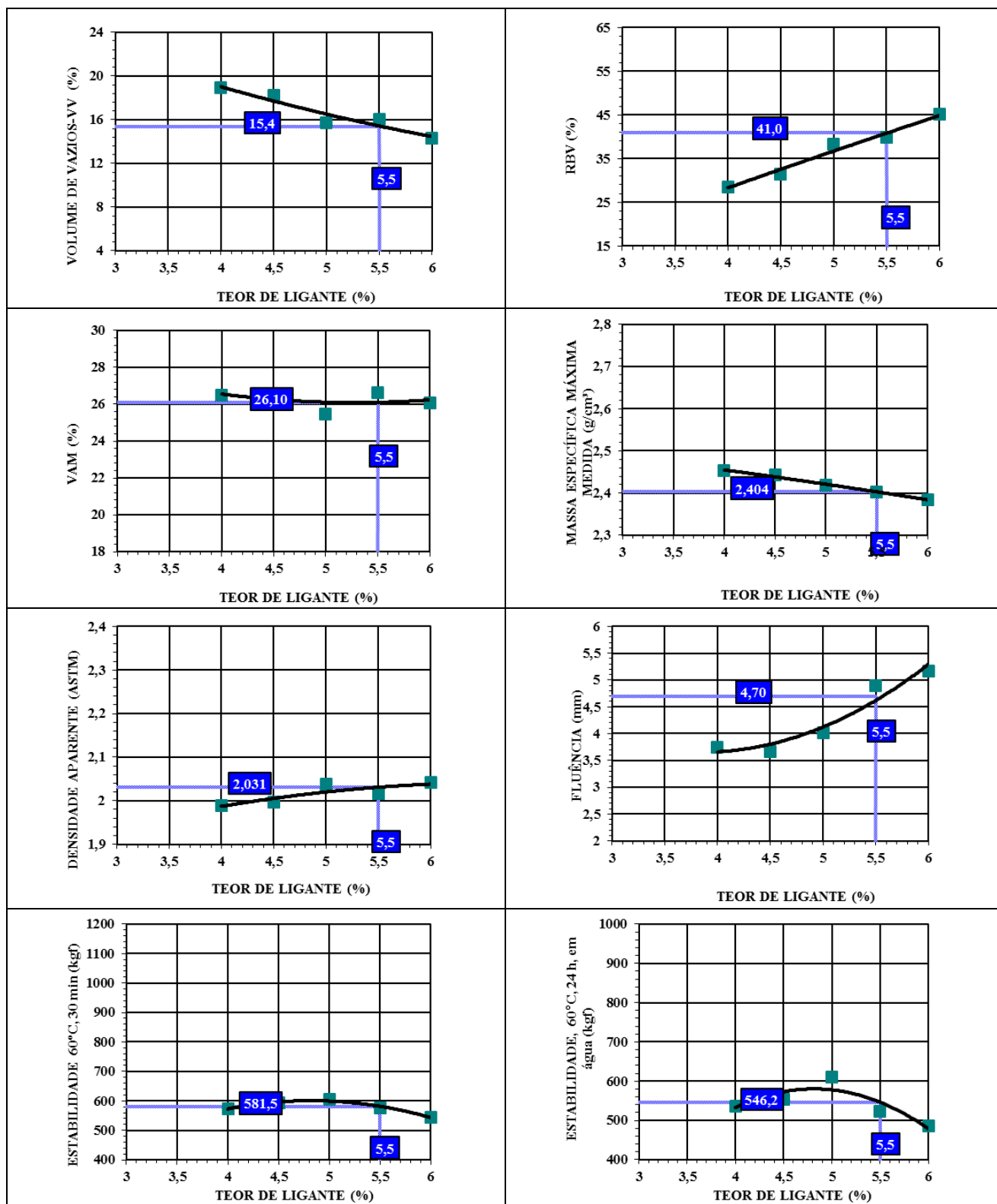


Figura 3.25: Parâmetros mecânicos e volumétricos para o Projeto 12 - Pedreira Tibagi, Faixa Tennessee com AMP 55/75-E

### 3.3.1 Avaliação da existência do contato grão-grão da mistura asfáltica - projetos RAUD

A existência do contato grão-grão das misturas asfálticas estudadas foi verificada nos teores de ligante de projeto do RAUD e obtida pelas expressões 2.1, 2.2 e 2.3. A fração do agregado graúdo ( $P_{CA}$ ) da equação foi definida pela porção relativa à mistura total de agregados retidos na “peneira de quebra”, sendo esta definida como a menor abertura de peneira que retém pelo menos 10% da graduação dos agregados, conforme estabelece a NCHRP (2011), e exemplificada na revisão bibliográfica do tema desta pesquisa (Figura 2.4).

A Tabela 3.23 apresenta os resultados da verificação de existência do contato grão-grão das misturas asfálticas estudadas nos respectivos teores de ligante de projeto do RAUD.

Tabela 3.23: Avaliação da existência do contato grão-grão das misturas asfálticas nos respectivos teores de ligante de projeto do RAUD

<i>Propriedades</i>	<i>Normas</i>	<i>Basalto CALTRANS</i>	<i>Basalto Tennessee</i>	<i>Central CALTRANS</i>	<i>Central Tennessee</i>	<i>Tibagi CALTRANS</i>	<i>Tibagi Tennessee</i>
Ys (g/cm <sup>3</sup> )	DNER- ME 153/97	1,509	1,464	1,498	1,471	1,440	1,413
Yw (g/cm <sup>3</sup> )		0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
Gca (g/cm <sup>3</sup> )	DNER- ME 81	2,664	2,764	2,717	2,758	2,688	2,729
Gmb	DNER- ME 117	2,056	2,134	2,136	2,212	1,98	2,031
Pca (%)		74,90%	71,60%	77,20%	71,10%	75,00%	71,90%
VCA drc (%)		43,23%	46,92%	44,74%	46,55%	46,33%	48,13%
VCA mix (%)		42,20%	44,72%	39,17%	42,97%	44,76%	46,49%
VCA drc – VCA mix (%)		1,03%	2,20%	5,57%	3,58%	1,57%	1,64%

Ys (g/cm<sup>3</sup>): massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado

Yw (g/cm<sup>3</sup>): massa específica da água 25°C: 0,998 g/cm<sup>3</sup>

Gca (g/cm<sup>3</sup>): massa específica aparente da fração graúda

Gmb: massa específica aparente da mistura compactada

Pca%: % da fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura.

VCA drc (%): vazios da fração graúda do agregado compactado seco

$$VCA_{drc} = \frac{(Gca \cdot Yw - Ys)}{Gca \cdot Yw}$$

VCA mix (%): vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada

$$VCA_{mix} = \frac{100 - (Gmb - Pca)}{Gca}$$

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 3.23 verifica-se a existência do contato grão-grão ( $VCAMIX \leq VCADRC$ ) para todas as misturas asfálticas estudadas nos seus respectivos teores de ligante de projeto.

### 3.3.2 Avaliação da sensibilidade ao escorrimento

O ensaio de escorrimento é utilizado para determinar a quantidade de ligante que potencialmente poderá escorrer da mistura asfáltica. É estabelecido um valor máximo admitido no ensaio laboratorial de forma a evitar a perda de ligante no transporte, aplicação e compactação da mistura.

Basicamente, o ensaio consiste em inserir uma amostra de no mínimo 1.200 gramas da mistura asfáltica que se deseja estudar, em um cesto cilíndrico confeccionado com tela metálica, fundo suspenso e afastado do fundo. O conjunto, apoiado sobre um papel filtro, é pesado e inserido dentro de uma estufa regulada na temperatura prevista para a produção da mistura asfáltica durante  $1h \pm 1min$ . Transcorrido o tempo, o conjunto é retirado da estufa e o papel filtro, que poderá conter o ligante escorrido da mistura, é novamente pesado. Esta porcentagem não deve exceder a 0,3%, sendo desejável que seja inferior ou igual a 0,2% (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A avaliação da sensibilidade ao escorrimento do ligante foi realizada segundo as normas ASTM D 6390 (ASTM, 2011c) ou AASHTO T – 305 (AASHTO, 1997), com as seguintes alterações:

- a) a tela metálica de abertura 6,30 mm foi substituída por outra de abertura 2,36 mm (Figura 3.26) em função do tamanho nominal máximo das faixas granulométricas estudadas (6,00 mm);
- b) a temperatura de realização do ensaio foi de 160°C (aproximadamente a máxima prevista para a produção das misturas asfálticas, conforme pode ser observado na Tabela 3.5);
- c) o valor máximo admitido para ensaio foi de 0,1%, conforme recomendações técnicas norte-americanas (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004 e NCHRP, 2011).

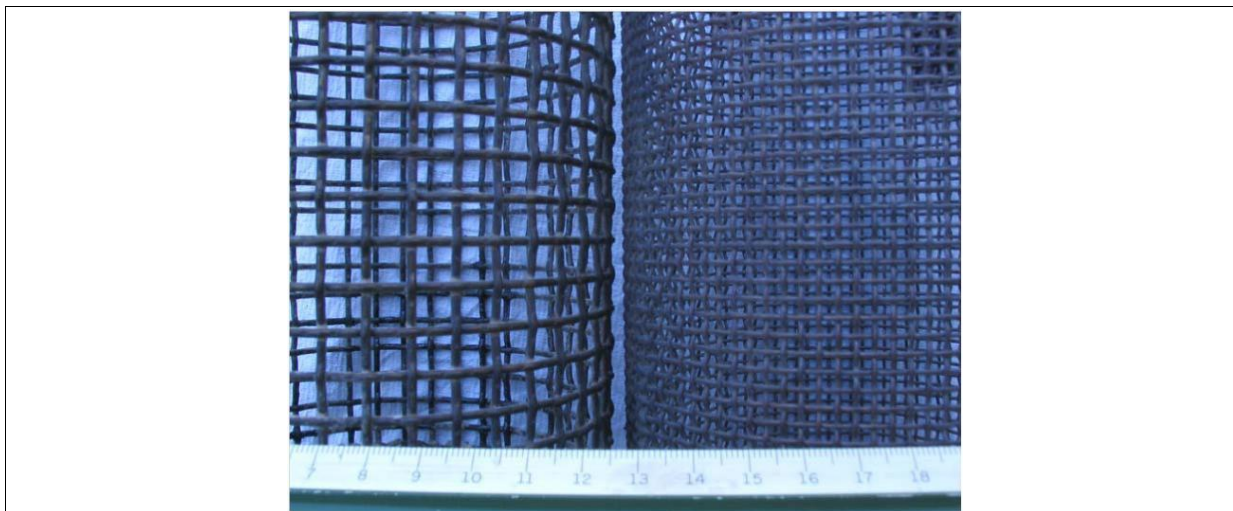


Figura 3.26: Telas metálicas de abertura 6,30 mm e 2,3 mm usadas nas cestas do teste de escorrimento

Para a avaliação da sensibilidade ao escorrimento em função do tipo e teor de ligante (CAP 50/70 e AMP 55/75-E), foram selecionados os projetos de misturas asfálticas dosadas nas faixas CALTRANS e Tennessee, com agregados da pedra Central. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Figuras 3.27 e 3.28.

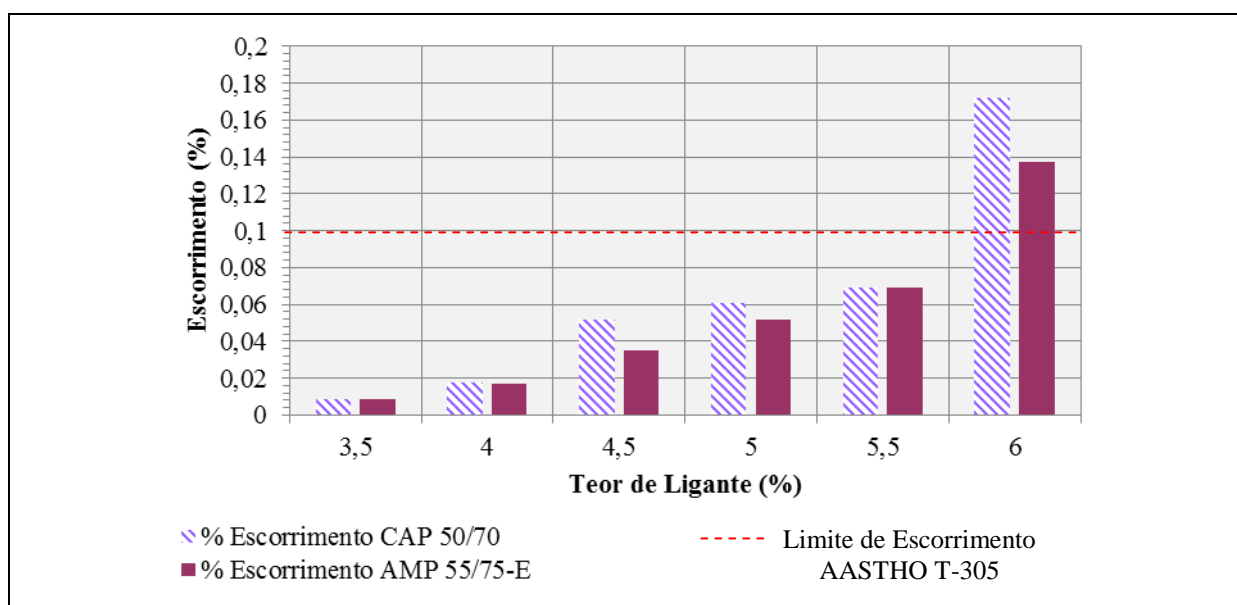


Figura 3.27: Sensibilidade ao escorrimento (%) x teor de ligante (%) – Pedreira Central, Faixa CALTRANS



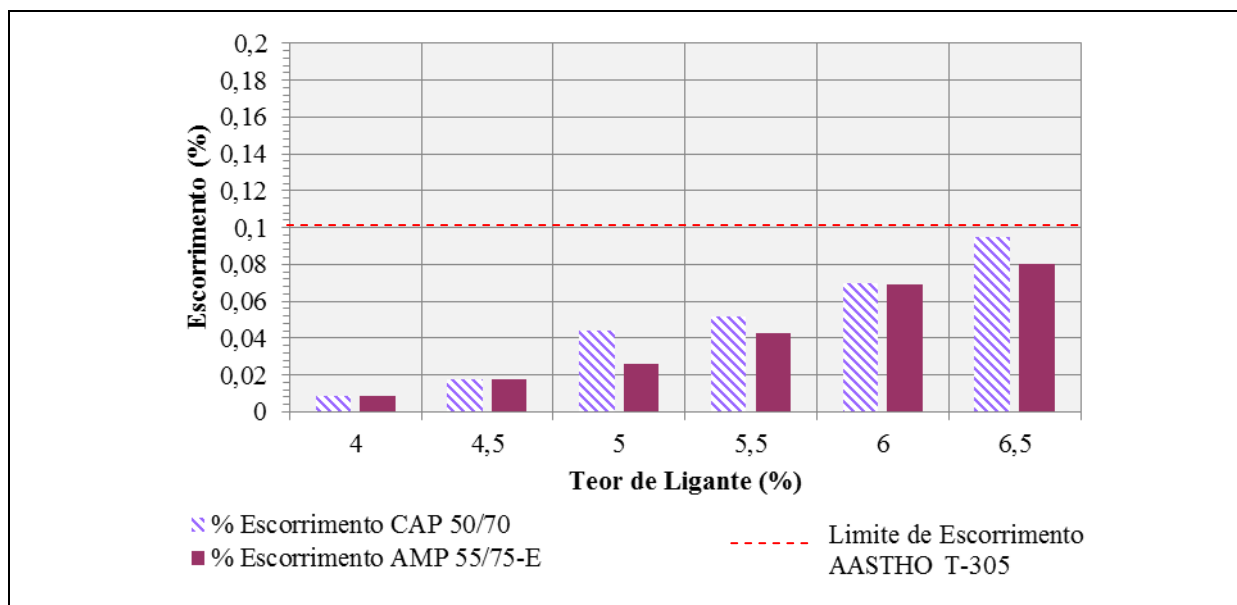


Figura 3.28: Sensibilidade ao escorrimento (%) x teor de ligante (%) – Pedreira Central, Faixa Tennessee

As seguintes considerações podem ser feitas a partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 3.27 e 3.28:

- o escorrimento do ligante aumenta à medida que os teores CAP 50/70 e AMP 55/75-E, das misturas asfálticas dosadas nas faixas CALTRANS e Tennessee, com agregados da pedreira Central são incrementados;
- para os teores de ligantes estudados, as misturas asfálticas formuladas com CAP 50/70 e agregados da pedreira Central, nas faixas CALTRANS e Tennessee, apresentam maior sensibilidade ao escorrimento em relação às formuladas com AMP 55/75-E. A maior tendência ao escorrimento do ligante pode ser atribuída a sua menor consistência (viscosidade);
- em relação às graduações estudadas, é possível inferir que as misturas com CAP 50/70 e AMP 55/75-E e agregados da pedreira Central dosadas na faixa Tennessee apresentam menor sensibilidade ao escorrimento em relação às formuladas na faixa CALTRANS e, portanto, admitem uma maior quantidade de ligante asfáltico.

Para as demais misturas formuladas com CAP 50/70, AMP 55/75-E e agregados das pedreiras Basalto e Tibagi nas Faixas CALTRANS e Tennessee a avaliação de sensibilidade ao

escorrimento foi realizada somente no teor de ligante selecionado para cada estudo de dosagem, conforme pode ser observado na Tabela 3.26.

### 3.3.3 Avaliação mecânica das misturas asfálticas

Este tópico descreve os ensaios, apresenta os resultados e discussões do estudo de comportamento mecânico das misturas asfálticas para a seleção do teor de ligante e complementação dos requisitos técnicos para o projeto de dosagem do RAUD. As seguintes avaliações foram realizadas:

- a) resistência à tração por compressão diametral;
- b) resistência ao dano por umidade induzida;
- c) resistência ao desgaste por abrasão ;
- d) e estabilidade mecânica por simulador LPC.

#### 3.3.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração foi realizado de acordo com a norma NBR 15087 (NBR, 2004c). Os corpos de prova foram moldados e compactados de acordo o ensaio Marshall DNER-ME 043/95 (DNER, 1995)

Basicamente, o ensaio conduzido a 25°C, consistiu em romper um corpo de prova cilíndrico segundo o plano diametral vertical, com a aplicação de uma carga progressiva de compressão a velocidade constante de 0,8 +/- 0,1 mm/s, obtida através da prensa Marshall.

A resistência à tração foi obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (3.1)$$

Onde:

$\sigma_R$  – resistência à tração por compressão diametral, MPa;

F – carga de ruptura, N;

D –diâmetro dos corpos de prova, cm;

H –altura dos corpos de prova, cm.

Para a avaliação da sensibilidade à ação deletéria da água, 360 CPs foram separados em dois grupos: um dos grupos foi submetido a um condicionamento a 60°C, 24 horas em água e outro não. Para este estudo foram moldados 03 CPs para o CAP 50/70 e 03 CPs para o AMP 55/75-E em 05 teores distintos de ligante asfáltico; portanto, 60 CPs foram confeccionados, sendo 30 CPs submetidos ao processo de condicionamento.

Os valores de Volume de vazios – Vv, Relação Betume-Vazios –RBV, Vazios do Agregado Mineral, massa específica máxima medida e densidade aparente foram determinados em função do tipo e teores de ligante asfáltico, conforme mostra a dosagem Marshall (Figuras 3.14 a 3.25). Os resultados de resistência à tração a 25°C referem-se à média dos valores obtidos em 03 CPs para cada teor de ligante asfáltico avaliado.

As Figuras 3.29 a 3.34 apresentam os resultados de resistência à tração a 25°C de CPs não condicionados em função do tipo e teor de ligante, para os projetos de misturas asfálticas dosadas nas graduações CALTRANS e Tennessee, com agregados das pedreiras, Basalto, Central e Tibagi.

As Figuras 3.35 a 3.40 apresentam os resultados de resistência à tração a 25°C de CPs condicionados a 60°C, 24 horas em água em função do tipo e teor de ligante (CAP 50/70 e AMP 55/75-E) para os projetos de misturas asfálticas dosadas nas faixas CALTRANS e Tennessee, com agregados das pedreiras Basalto, Central e Tibagi.

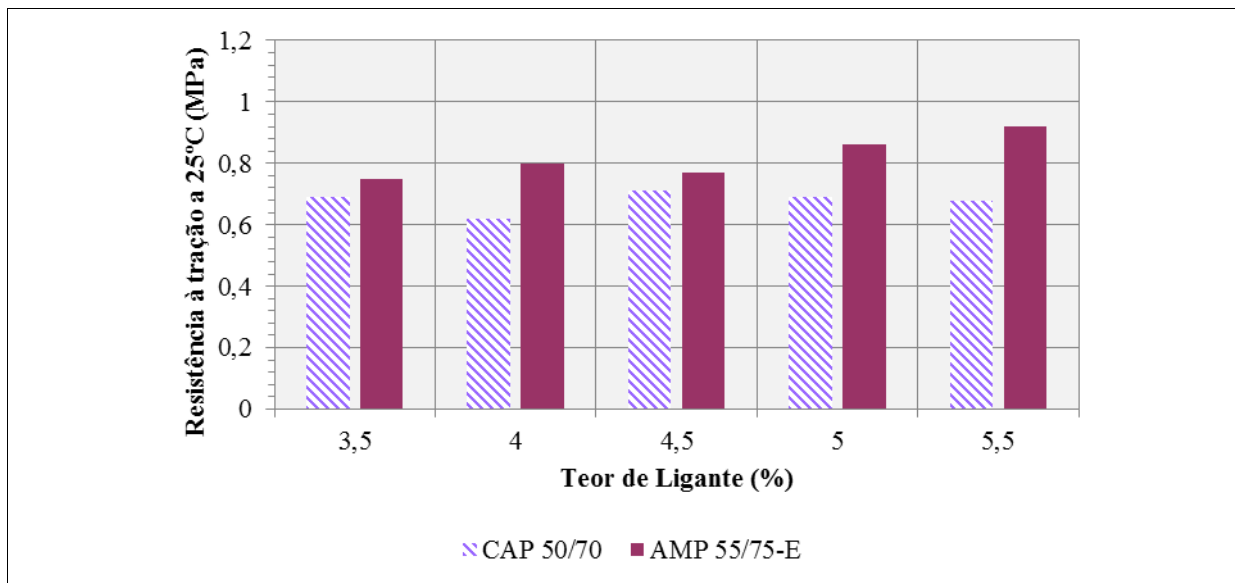


Figura 3.29: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) -Pedreira Basalto, faixa CALTRANS

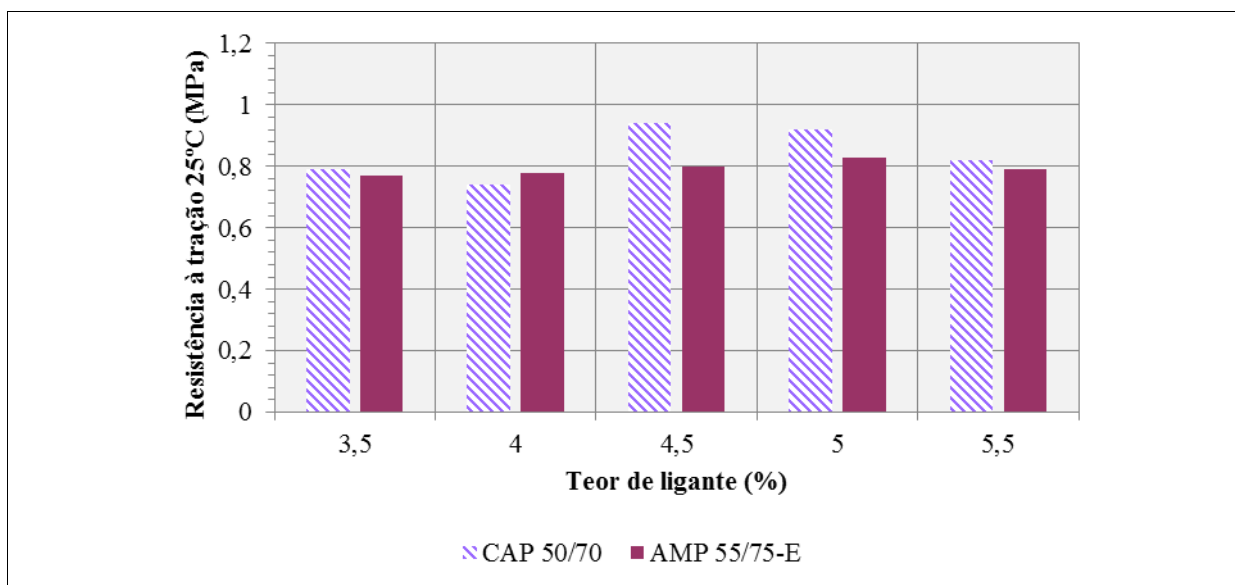


Figura 3.30: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) - Pedreira Basalto, faixa Tennessee

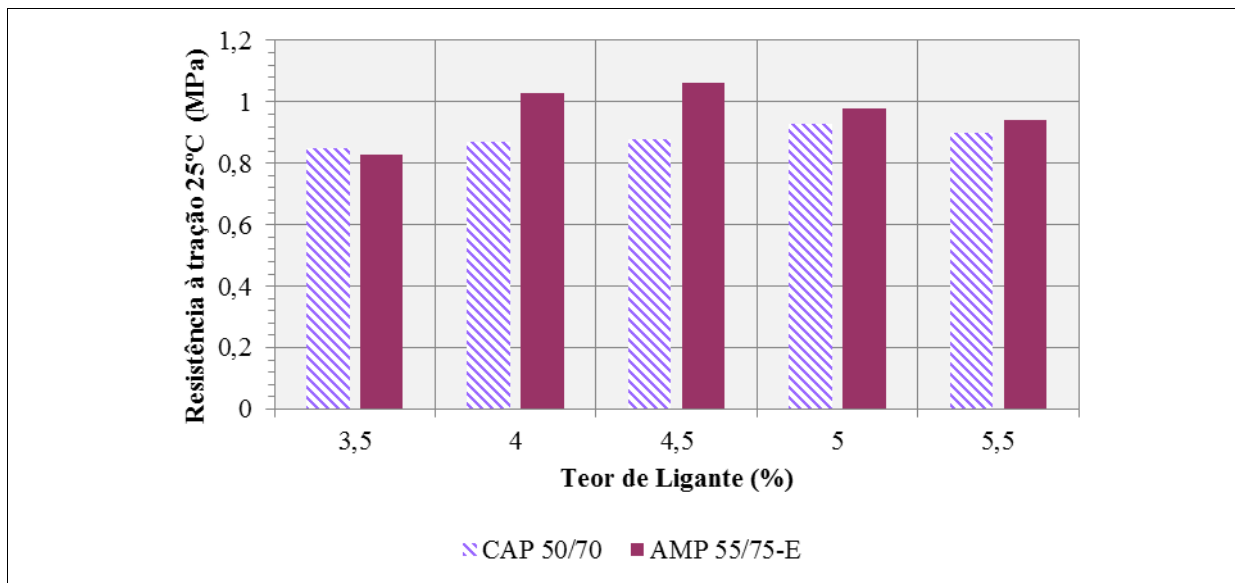


Figura 3.31: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) -Pedreira Central, faixa CALTRANS

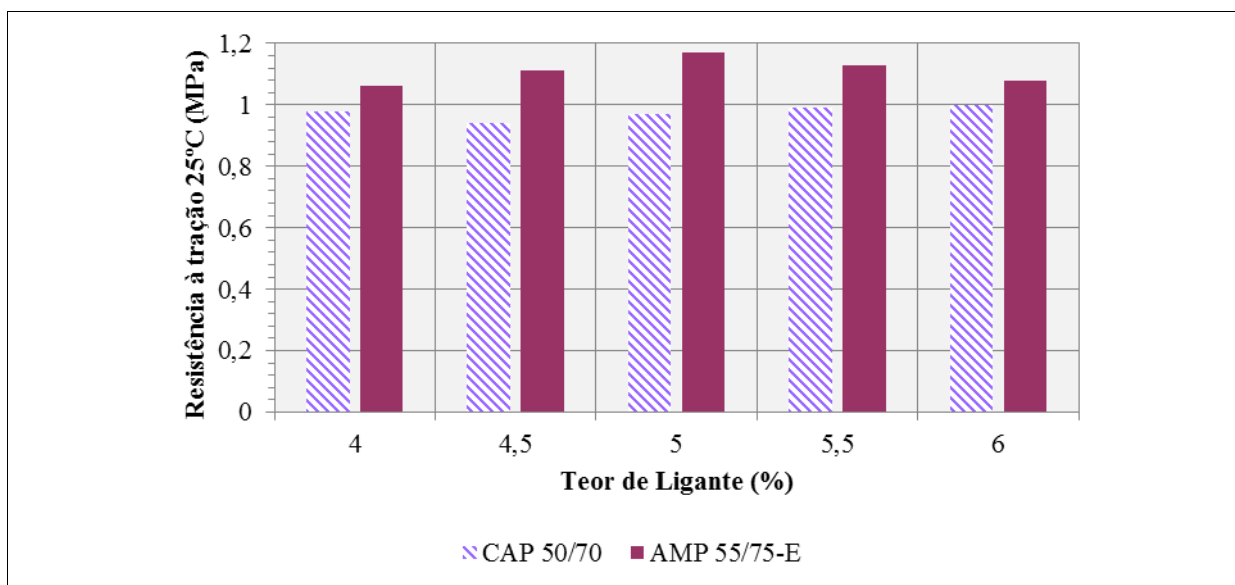


Figura 3.32: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) -Pedreira Central, faixa Tennessee

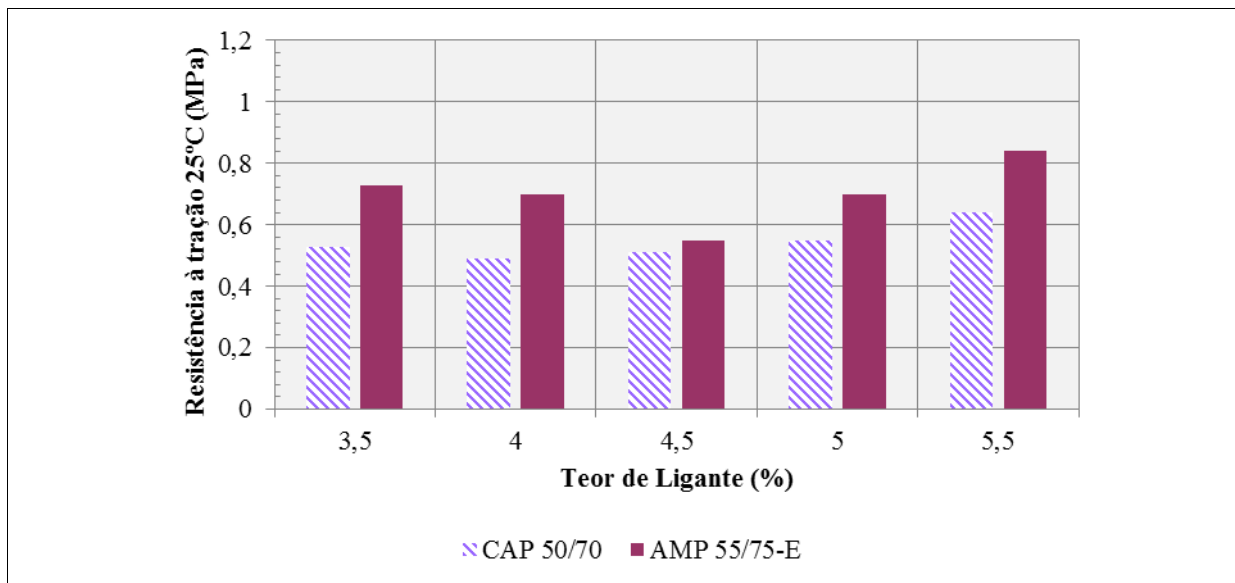


Figura 3.33: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) -Pedreira Tibagi, faixa CALTRANS

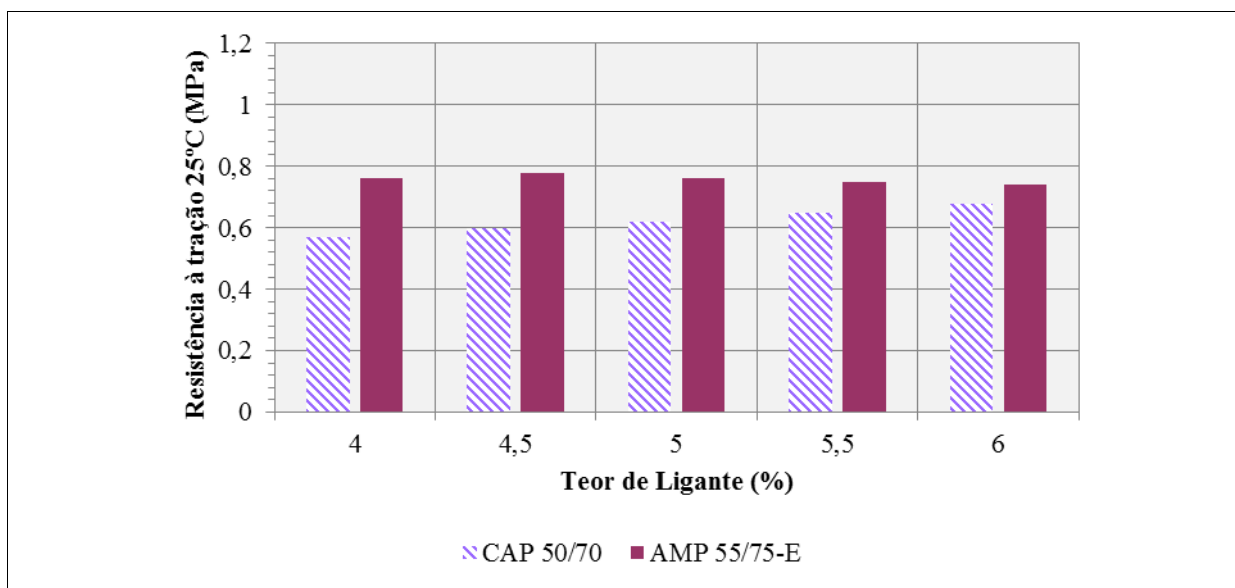


Figura 3.34: Resistência à tração a 25°C (MPa) x teor de ligante (%) -Pedreira Tibagi, faixa Tennessee

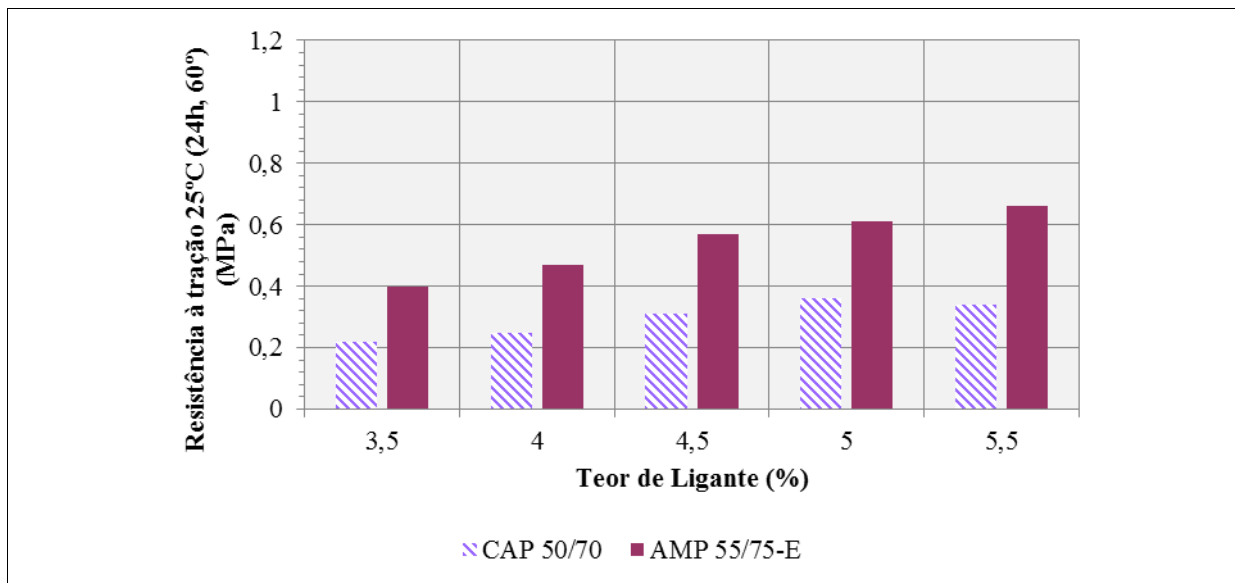


Figura 3.35: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de ligante (%) - Pedreira Basalto, faixa CALTRANS

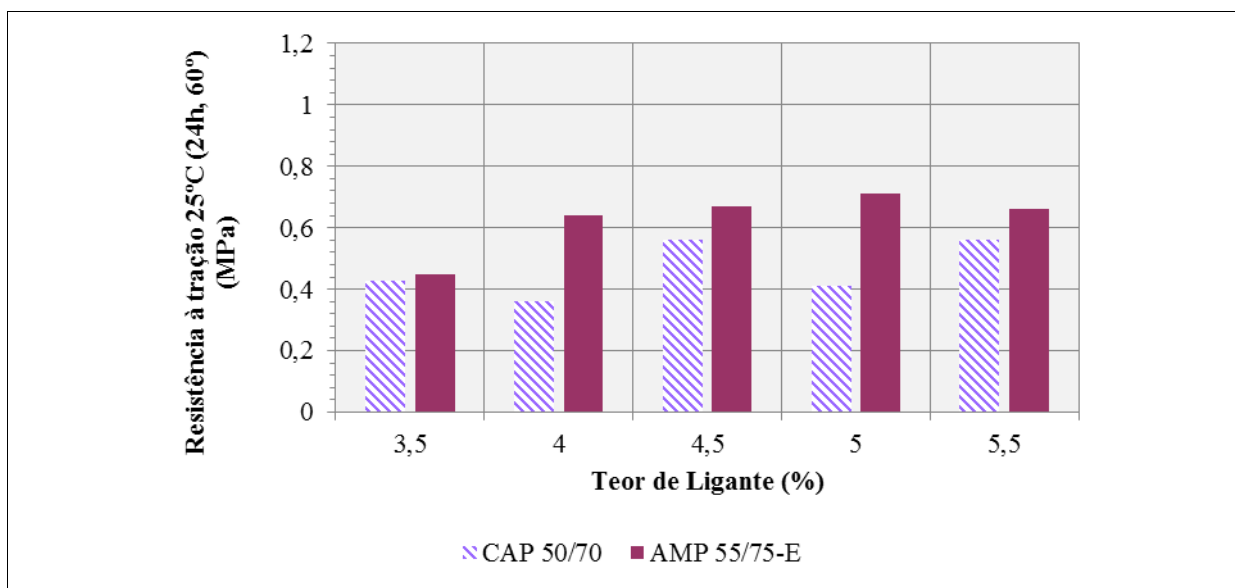


Figura 3.36: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de ligante (%) - Pedreira Basalto, faixa Tennessee

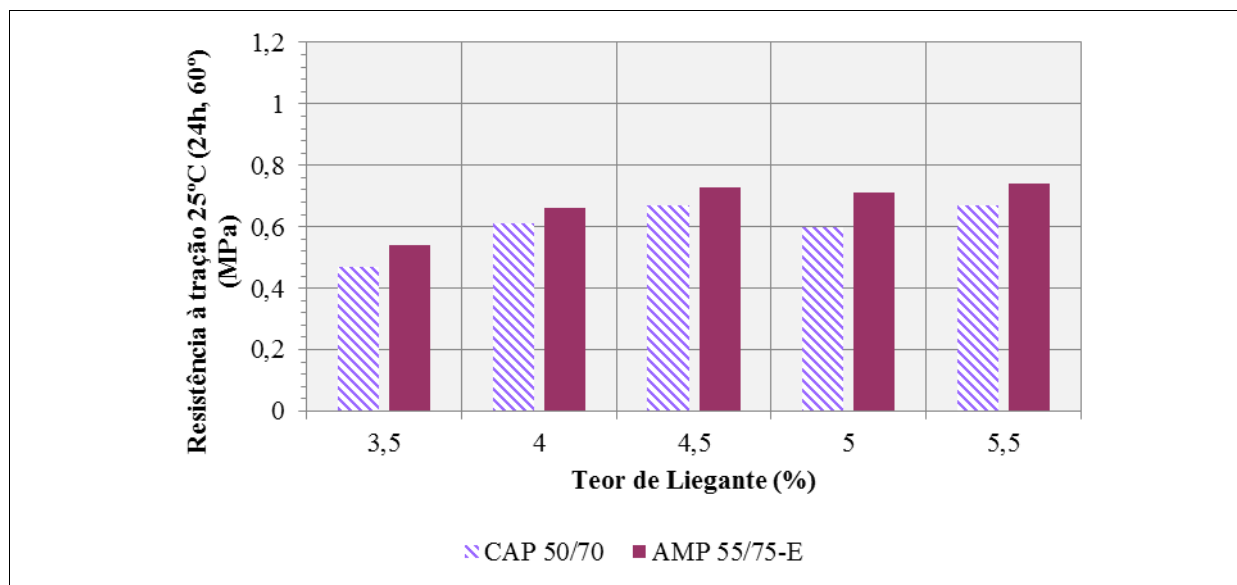


Figura 3.37: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de ligante (%) - Pedreira Central, faixa CALTRANS

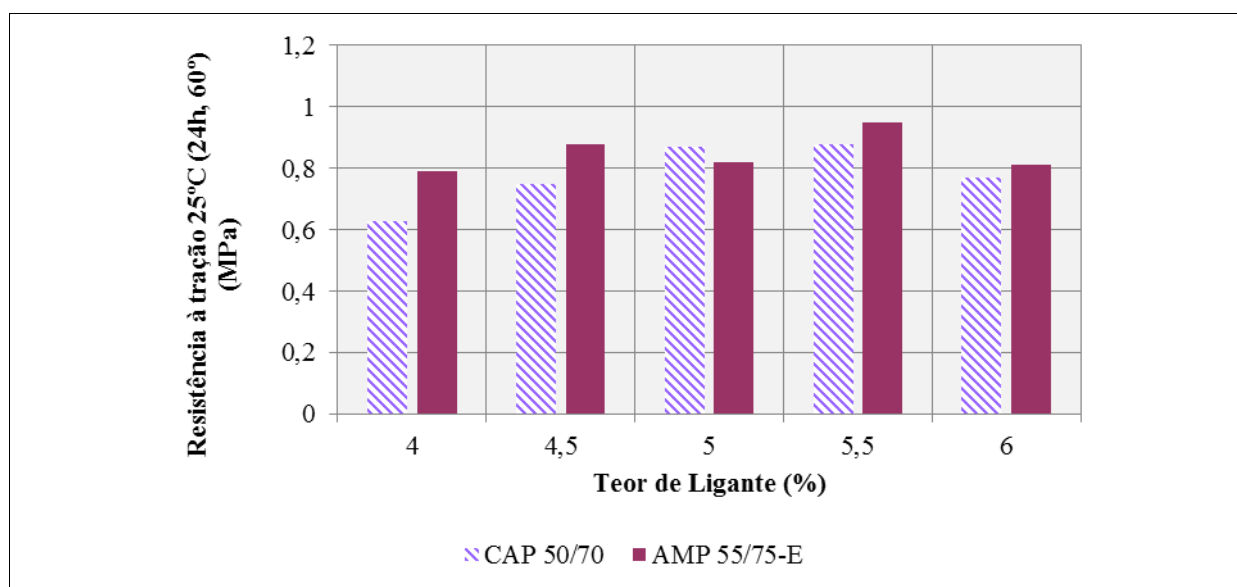


Figura 3.38: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de Ligante (%) - Pedreira Central, faixa Tennessee



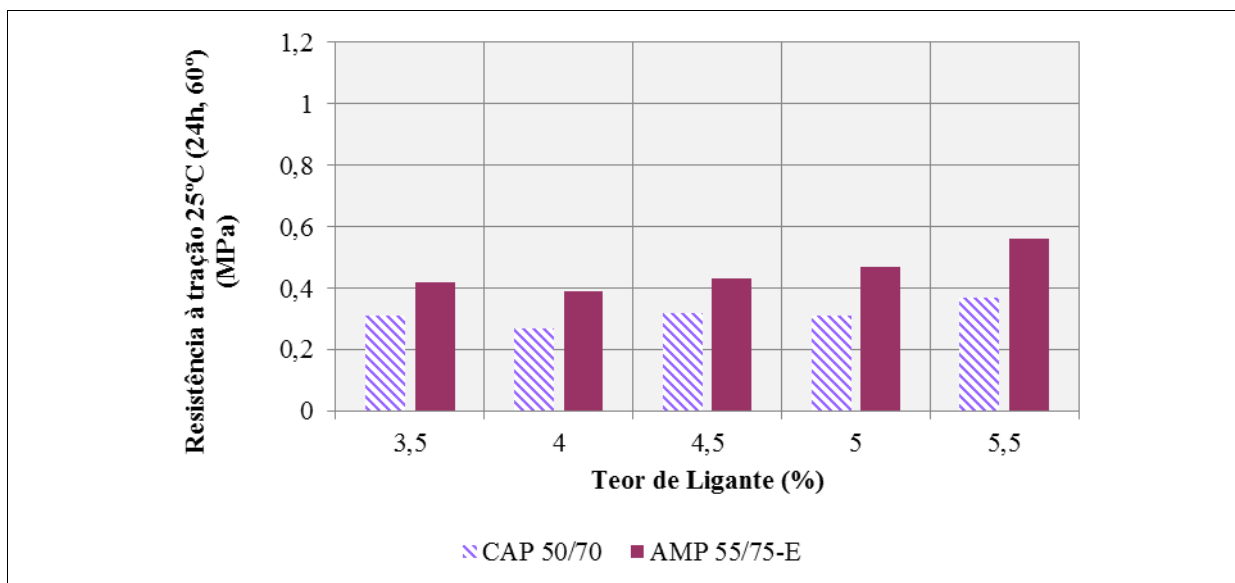


Figura 3.39: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de Ligante (%) - Pedreira Tibagi, faixa CALTRANS

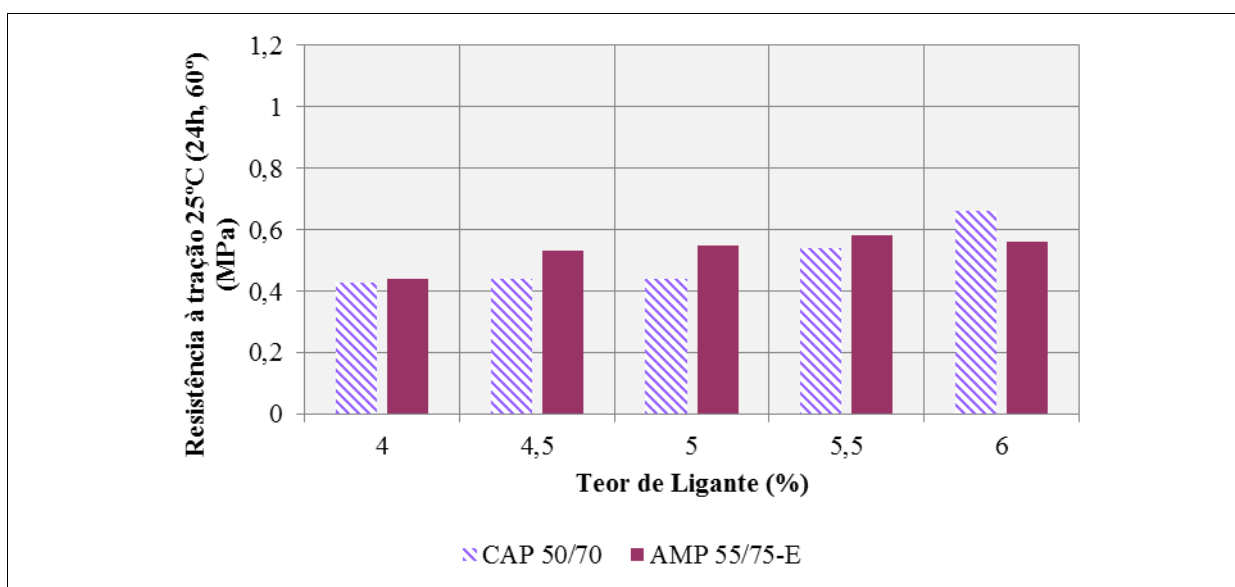


Figura 3.40: Resistência à tração a 25°C (MPa), CPs condicionados a 60°C, 24h em água x teor de Ligante (%) - Pedreira Tibagi, faixa Tennessee

A partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 3.29 a 3.40 pode-se inferir o seguinte:

- a) de modo geral, as misturas asfálticas estudadas, não condicionadas e condicionadas a 60°C, 24 horas em água, com agregados das pedreiras Basalto, Central e Tibagi, tendem a apresentar resultados superiores de resistência à

tração a 25°C quando formuladas na faixa granulométrica Tennessee, e teores de AMP 55/75-E, variando entre 4,5 a 5,5 %.

- b) as misturas asfálticas quando submetidas ao ensaio de maior severidade (condicionadas a 60°C, 24 horas em água), dosadas com agregados das pedreiras Basalto (gnaisse) e Tibagi (Riolito), nas graduações CALTRANS e Tennessee e teores de ligante (CAP 50/70 e AMP 55-75) estudados, tendem a apresentar resultados de resistência à tração inferiores as misturas asfálticas condicionadas em água, com agregados da pedreira Central e teores de AMP 55/75-E variando entre 4,5 a 5,5%, independente da faixa granulométrica selecionada para o projeto.

### 3.3.3.2 Resistência ao dano por umidade induzida

O ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283 ou ASTM D 4867/D4867M/09c), pertencente à atual especificação norte-americana de desempenho de ligantes e misturas asfálticas SUPERPAVE, é empregado para a avaliação do efeito da suscetibilidade à ação da água (adesividade), no teor de ligante selecionado para o projeto de dosagem da mistura.

Em 2008, esse ensaio foi utilizado como referência na elaboração da norma brasileira NBR 15617 (ABNT, 2011), para a avaliação quantitativa da adesividade na interface ligante / agregado em misturas asfálticas de graduação densa ou do tipo SMA.

Segundo estudos comparativos laboratório-campo do Asphalt Institute (1987, 2007), esse procedimento é considerado como um dos mais apropriados para a previsão do dano por umidade, pois considera as propriedades adesivas e coesivas da mistura asfáltica.

O ensaio para a avaliação da suscetibilidade à ação da água das misturas asfálticas estudadas foi realizado segundo a norma NBR 15617 (ABNT, 2011) com as seguintes modificações:

- a) corpos de prova compactados com 50 golpes por face;
- b) não foram estabelecidos valores limites para o teor de vazios;
- c) não foram estabelecidos valores limites para a saturação, porém vácuo de 660 mm de Hg foi aplicado por 10 minutos aos corpos de prova;

d) e os corpos de prova não foram submetidos ao ciclo de congelamento/descongelamento.

O seguinte procedimento foi adotado para o ensaio: seis corpos de prova com teor de ligante asfáltico de projeto foram compactados com 50 golpes por face. Na sequência foi determinada a densidade aparente dos corpos de prova (CPs) e estes separados em dois conjuntos; os três CPs do primeiro conjunto foram submetidos a um condicionamento (simulando a presença de água na mistura e tensões internas induzidas por cargas do tráfego), com saturação de água sob vácuo de 600 mm de Hg por 10 minutos; aquecimento em banho-maria a 60°C durante 24 horas e resfriamento em outro banho a 25°C por 2 a 3 horas.

Depois do condicionamento, os conjuntos de CPs foram ensaiados para a determinação da resistência à tração por compressão diametral conforme a norma NBR 15087 (ABNT, 2004c) e a razão de resistência à tração retida (RRT) entre os CPs condicionados e não condicionados foi determinada.

Em geral, valores mínimos de RRT entre 70 e 80% demonstram um comportamento satisfatório da mistura asfáltica ultra delgada aos danos causados por ação da água (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004 e NCHRP, 2011). Para as misturas densas e descontínuas do tipo SMA, o limite mínimo para a RRT também tem sido adotado 70%, segundo a especificação AASHTO MP 8-01 (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As Figuras 3.41 a 3.46 apresentam os resultados de resistência ao dano por umidade induzida (RRT a 25°C) em função do tipo e teor de ligante (CAP 50/70 e AMP 55/75-E) para os projetos de misturas asfálticas dosadas nas faixas CALTRANS e Tennessee, com agregados das pedreiras, Basalto, Central e Tibagi.

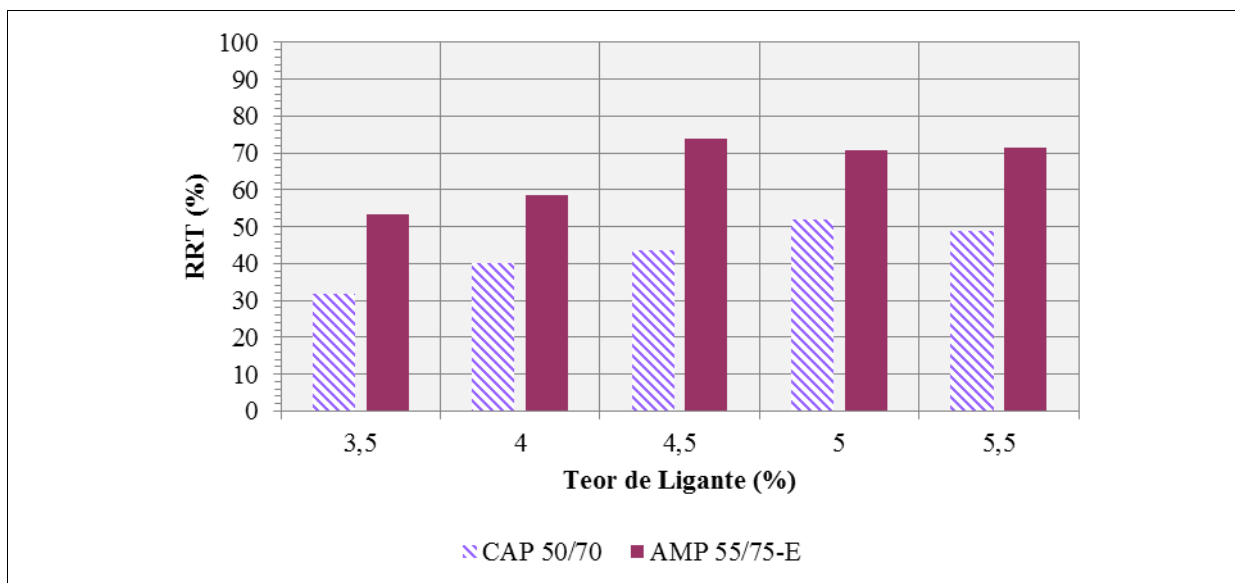


Figura 3.41: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - Pedreira Basalto, faixa CALTRANS

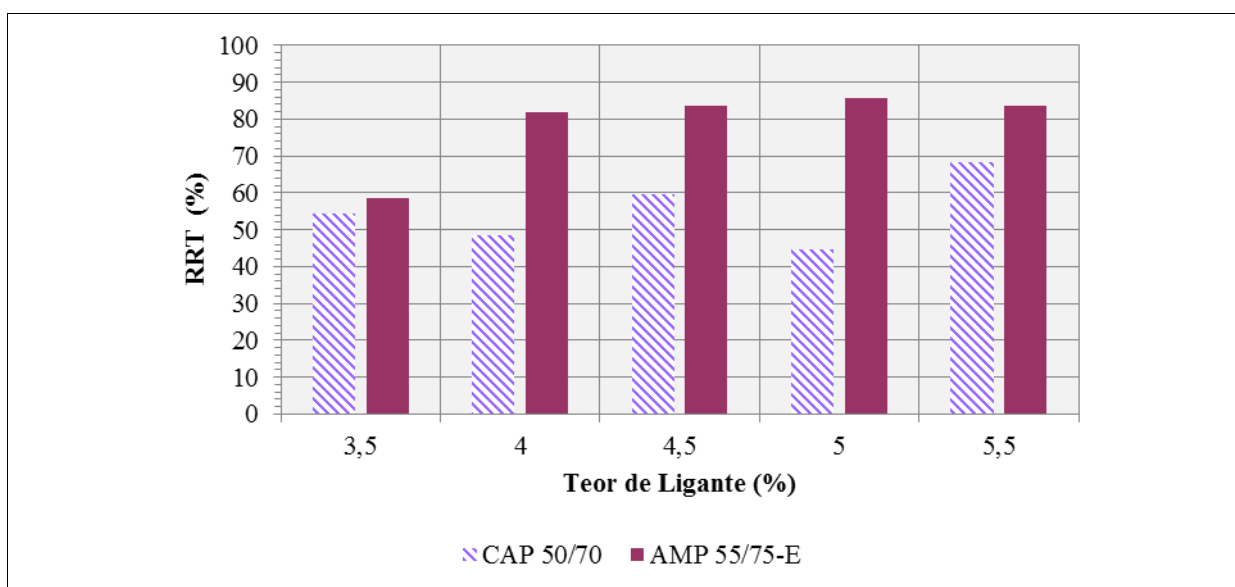


Figura 3.42: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - Pedreira Basalto, faixa Tennessee

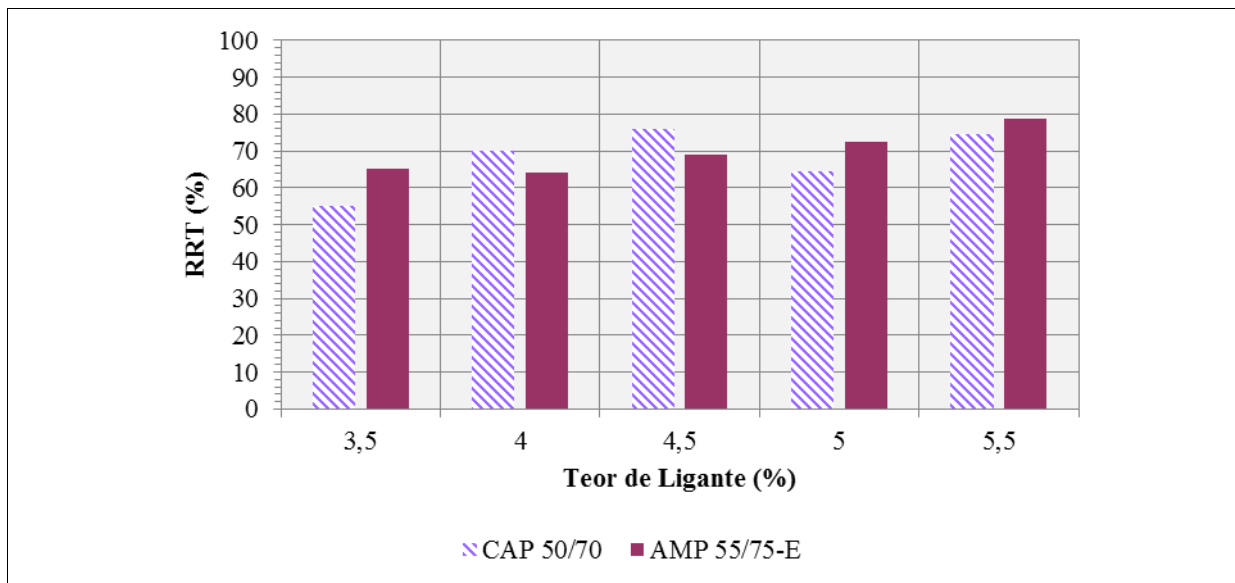


Figura 3.43: Dano por umidade induzida- RRT (%) em função do teor de ligante (%) - Pedreira Central, faixa CALTRANS

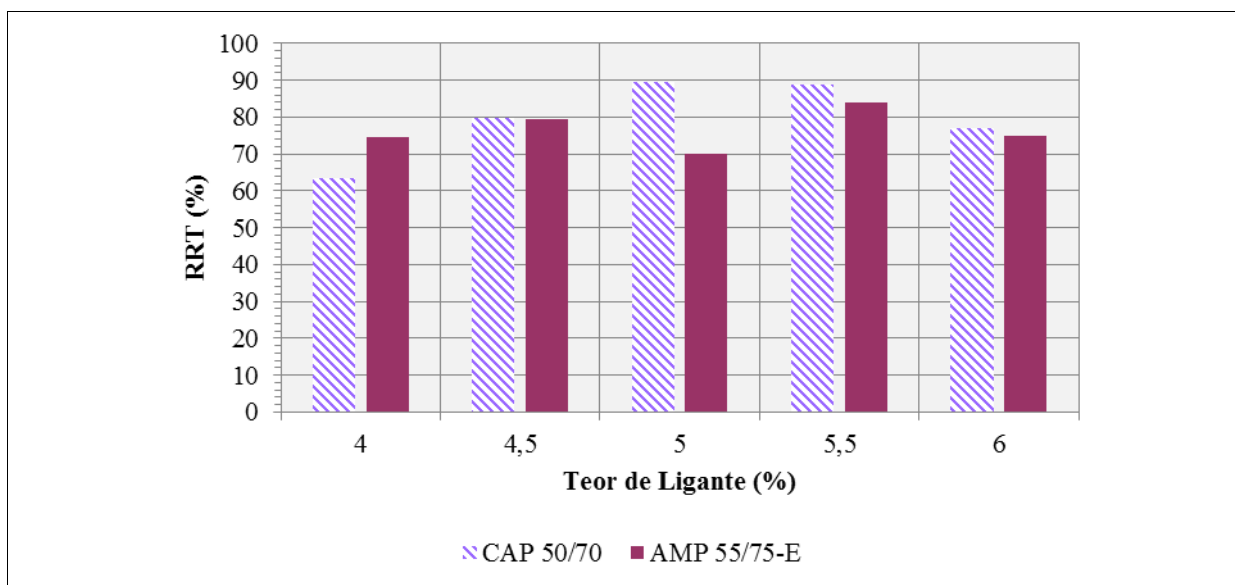


Figura 3.44: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - Pedreira Central, faixa Tennessee

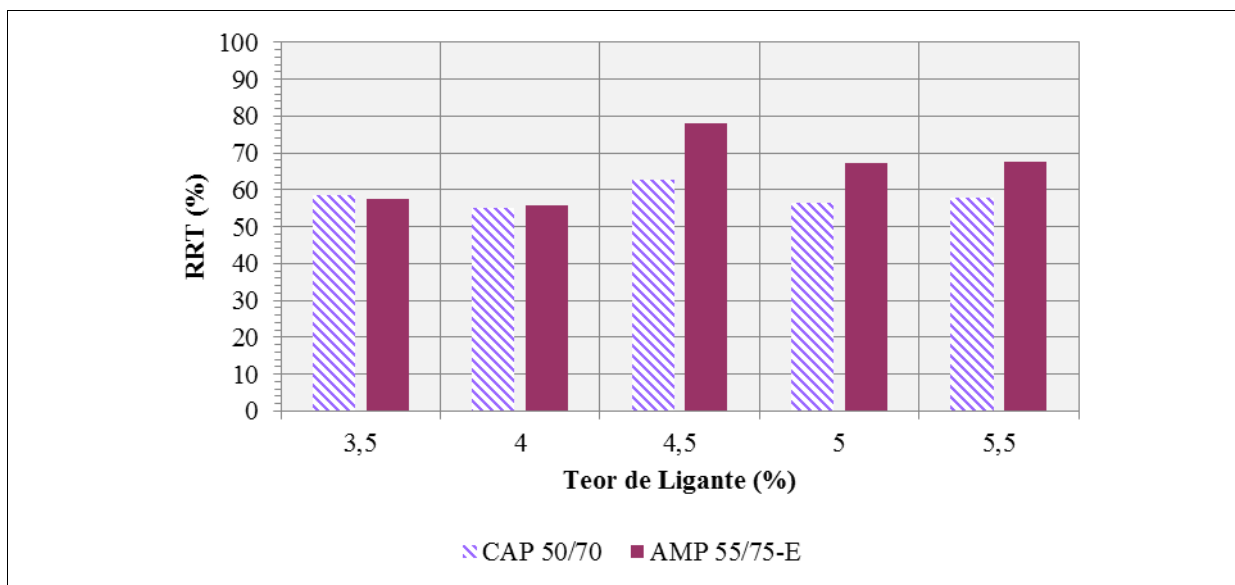


Figura 3.45: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - Pedreira Tibagi, faixa CALTRANS

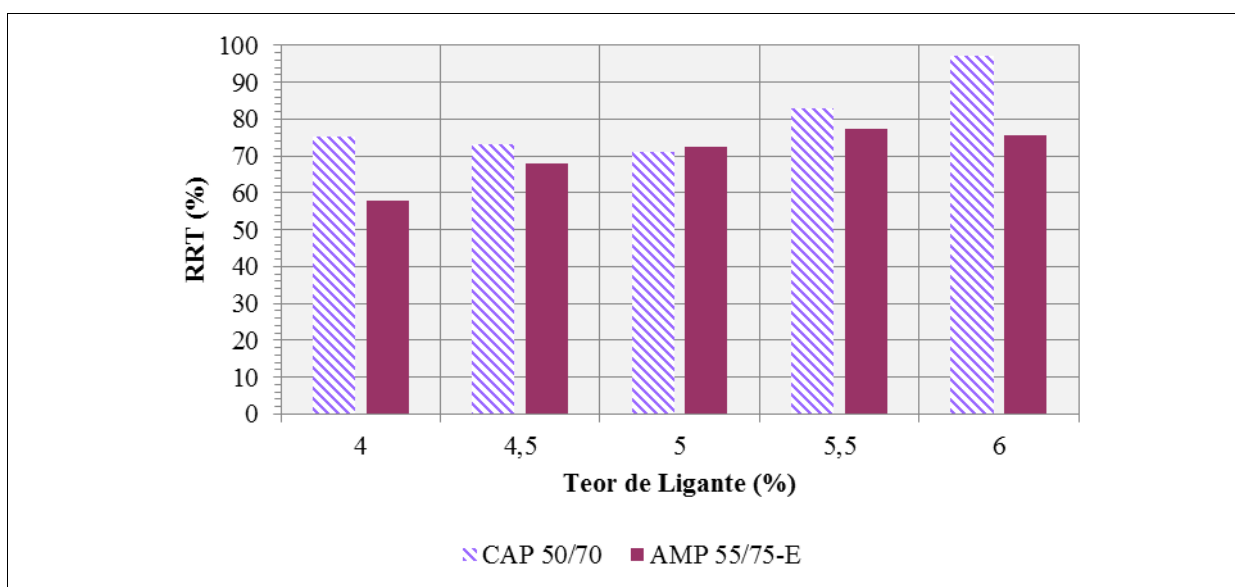


Figura 3.46: Dano por umidade induzida - RRT (%) em função do teor de ligante (%) - Pedreira Tibagi, faixa Tennessee

As seguintes considerações podem ser feitas a partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 3.41 a 3.46:

- a) de modo geral, para os teores de ligantes estudados, as misturas asfálticas com AMP 55/75-E, nas faixas CALTRANS e Tennessee, com materiais das pedreiras, Basalto, Central, Tibagi tendem a apresentar valores de resistência

ao dano por umidade induzida (RRT) superiores às formuladas com CAP 50/70.

- b) observa-se que as misturas asfálticas obtidas com agregados da pedra Basalto (gnaisse), na faixa granulométrica CALTRANS e ligante convencional CAP 50/70 são as mais sensíveis à ação deletéria da água (menor RRT). Essas mesmas misturas quando formuladas com AMP 55/75-E, na faixa Tennessee, apresentaram melhores características de adesão e coesão (maior RRT) em relação à faixa granulométrica da CALTRANS. Constata-se, portanto, que além do emprego da cal e de promotores de adesão, a seleção adequada do tipo de ligante e da faixa granulométrica para o projeto de RAUD poderá mitigar os problemas de adesividade da mistura asfáltica, principalmente com agregados ácidos (altamente silicosos).
- c) as misturas asfálticas formuladas com teores de AMP 55/75-E variando entre 5,0 a 5,5 %, na faixa granulométrica Tennessee e agregados ácidos (suscetíveis à ação da água) das pedreiras, Basalto (gnaisse), Central (granito) e Tibagi (riolito) apresentaram resultados de RRT superiores a 70%, demonstrando um comportamento satisfatório aos danos por umidade induzida, conforme recomendação do CALTRANS (2003a), TDOT (2004), TxDOT (2004) e NCHRP (2011).
- d) considerando o limite mínimo de 80% para os resultados de RRT (excluindo-se o ciclo de congelamento e descongelamento), verifica-se que os agregados da pedra Tibagi (riolito) não atenderam a este critério.

### 3.3.3.3 Resistência ao desgaste por abrasão Cantabro

A resistência à desagregação do revestimento asfáltico por efeito do atrito pneu-pavimento é usualmente avaliada pelo ensaio de desgaste por abrasão Cantabro. O ensaio inicialmente foi desenvolvido na Espanha para a determinação da perda de massa em misturas asfálticas porosas ou abertas submetidas ao desgaste na máquina de abrasão *Los Angeles*. No Brasil, o método foi introduzido pelo DNIT como parâmetro de dosagem da Camada Porosa de Atrito (CPA). Apesar de sua concepção estar relacionada aos revestimentos drenantes, esse ensaio

pode ser empregado para qualquer tipo de mistura asfáltica, sejam porosas ou abertas, descontínuas ou bem graduadas.

A avaliação da resistência ao desgaste da mistura asfáltica ultra delgada teve por objetivo estabelecer um procedimento simples para a determinação do teor mínimo de ligante asfáltico na fase de projeto de dosagem ou durante sua execução em obra.

Apesar da norma NBR 15140 (ABNT, 2004d) estabelecer somente o procedimento via seco, o ensaio também foi realizado em corpos de prova (CPs) previamente submersos em água por 24 h a 60°C (procedimento via úmida). O ensaio realizado em CPs condicionados em água é mais severo que a metodologia via seco e visa avaliar o efeito combinado do desgaste (perda da coesão) e da suscetibilidade da mistura asfáltica à ação da água (adesividade).

O fenômeno da adesividade é preponderantemente químico e inerente à compatibilidade entre o ligante asfáltico e o agregado. Um determinado ligante pode apresentar excelente resistência à ação da água com um agregado e um péssimo comportamento com outro de natureza mineralógica distinta, sendo a recíproca também verdadeira para ligantes de natureza físico-química ou de procedências distintas. A avaliação da adesividade deve ser realizada com os agregados e ligantes asfálticos coletados na obra e sempre que houver mudança na procedência ou composição dos materiais.

O procedimento de ensaio Cantabro, via úmida, foi realizado de acordo com a norma espanhola NLT 362/92. Para avaliação do desgaste por abrasão foram moldados corpos de prova Marshall (CPs) e compactados com 50 golpes em cada face, com teores distintos de ligante asfáltico (CAP 50-70 e AMP 55/75-E) para os projetos de misturas asfálticas dosadas nas faixas CALTRANS e Tennessee, com agregados das pedreiras, Basalto, Central e Tibagi.

Após a pesagem inicial dos CPs, o procedimento de laboratório consistiu na divisão dos CPs em dois lotes. O primeiro lote foi colocado em uma câmara de climatização durante 24 horas a 25°C. O segundo lote foi submetido ao condicionamento em água durante 24 horas a 60°C e após levado a câmara de climatização a 25°C durante 24 horas. Na sequência, cada CP, dos dois lotes, foram inseridos, individualmente, no tambor da máquina *Los Angeles* (sem as esferas) e submetidos a 300 revoluções.

A perda de massa dos CPs foi determinada segundo a equação 3.2.



$$A = \left[ \left( \frac{M - M'}{M} \right) \right] \cdot 100$$

(3.2)

Onde

A: perda de massa por abrasão (%);

M: massa do corpo de prova antes do ensaio (g);

M': massa do corpo de prova depois do ensaio (g);

As Figuras numeradas de 3.47 a 3.58 apresentam a perda por desgaste Cantabro via seco e via úmida em função do tipo e teor de ligante (CAP 50/70 e AMP 55/75-E) para os projetos de misturas asfálticas dosadas nas faixas CALTRANS e Tennessee, com agregados das pedreiras, Basalto, Central e Tibagi.

Os resultados de desgaste por abrasão apresentados referem-se à média dos valores obtidos em 03 CPs para cada teor de ligante asfáltico avaliado.

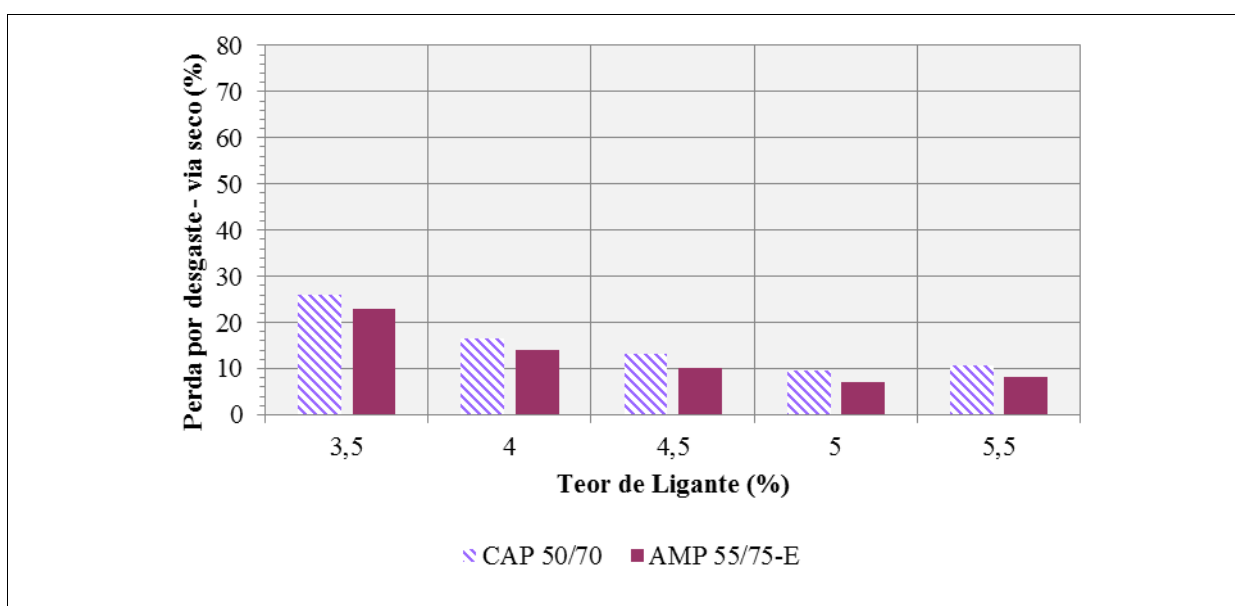


Figura 3.47: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Basalto – faixa 9,5mm CALTRANS

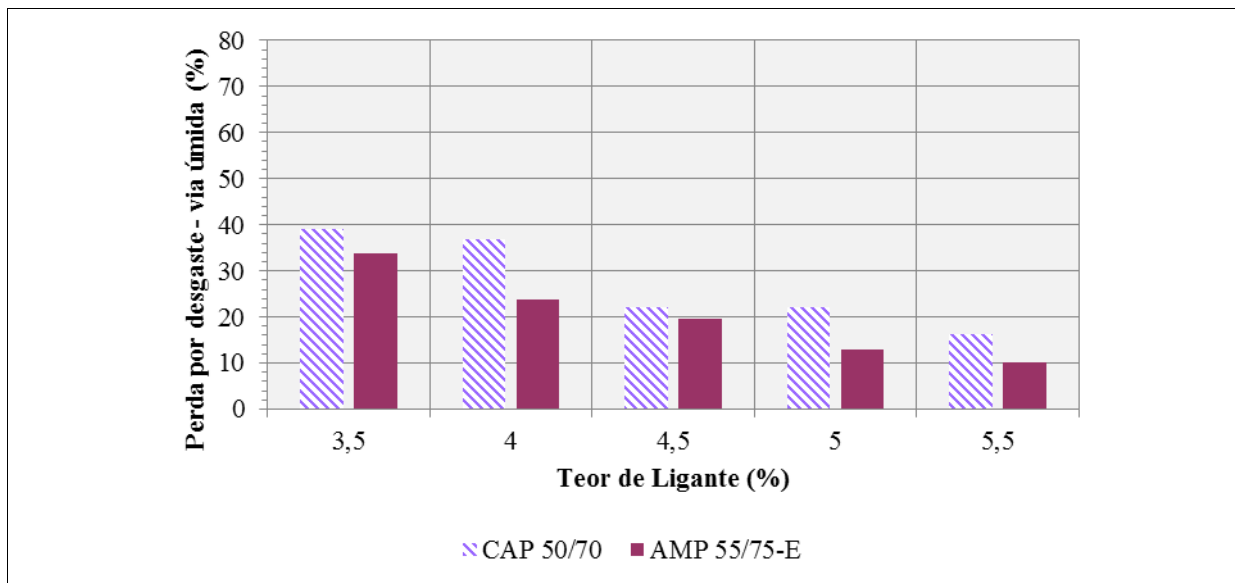


Figura 3.48: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Basalto – faixa 9,5mm CALTRANS

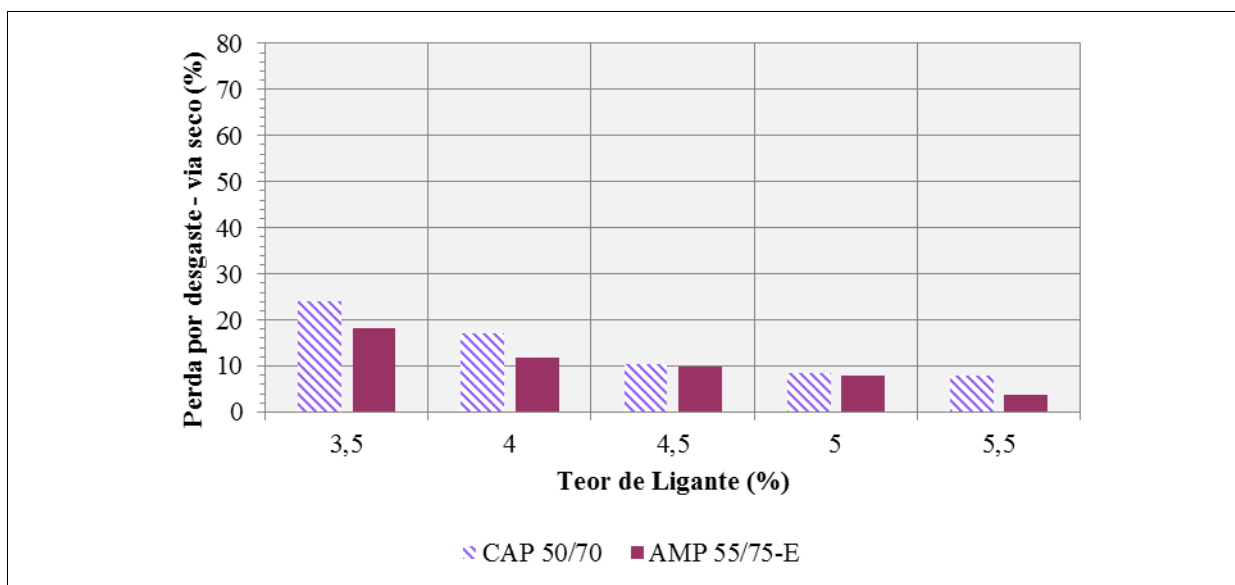


Figura 3.49: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Basalto – faixa 1/4" tipo "A" Tennessee

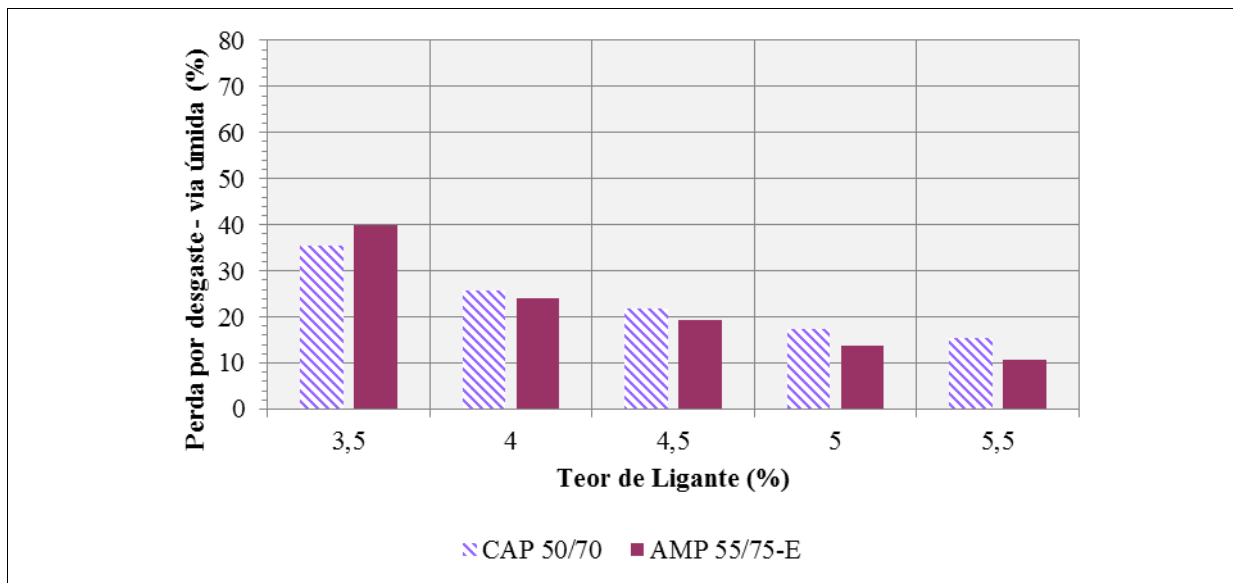


Figura 3.50: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Basalto – faixa 1/4” tipo “A” Tennessee

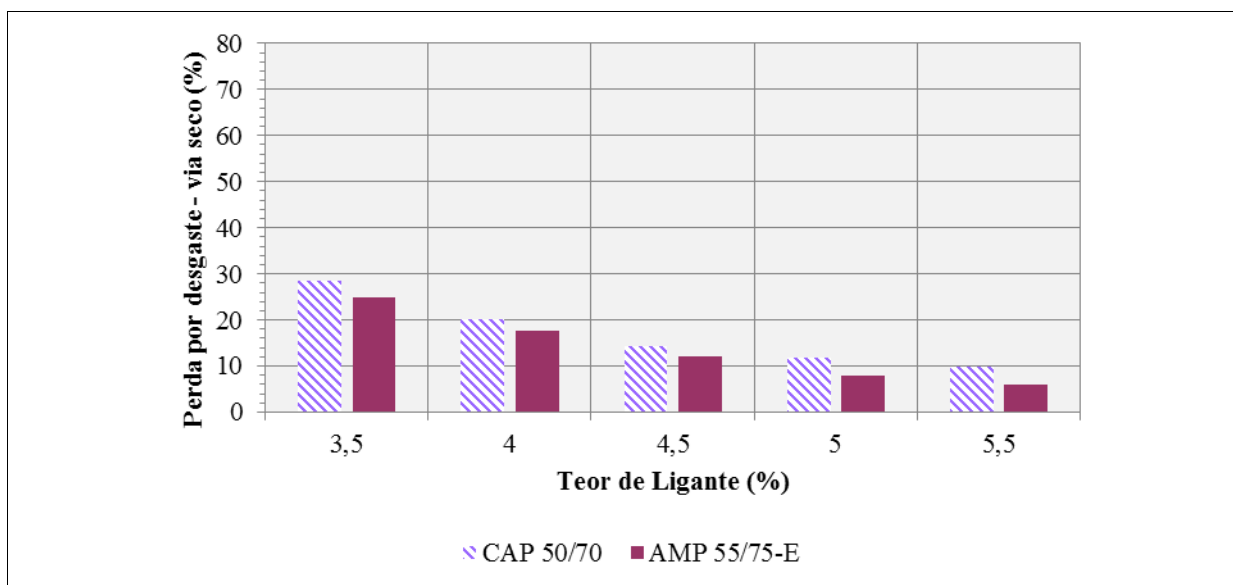


Figura 3.51: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Central – faixa 9,5mm CALTRANS

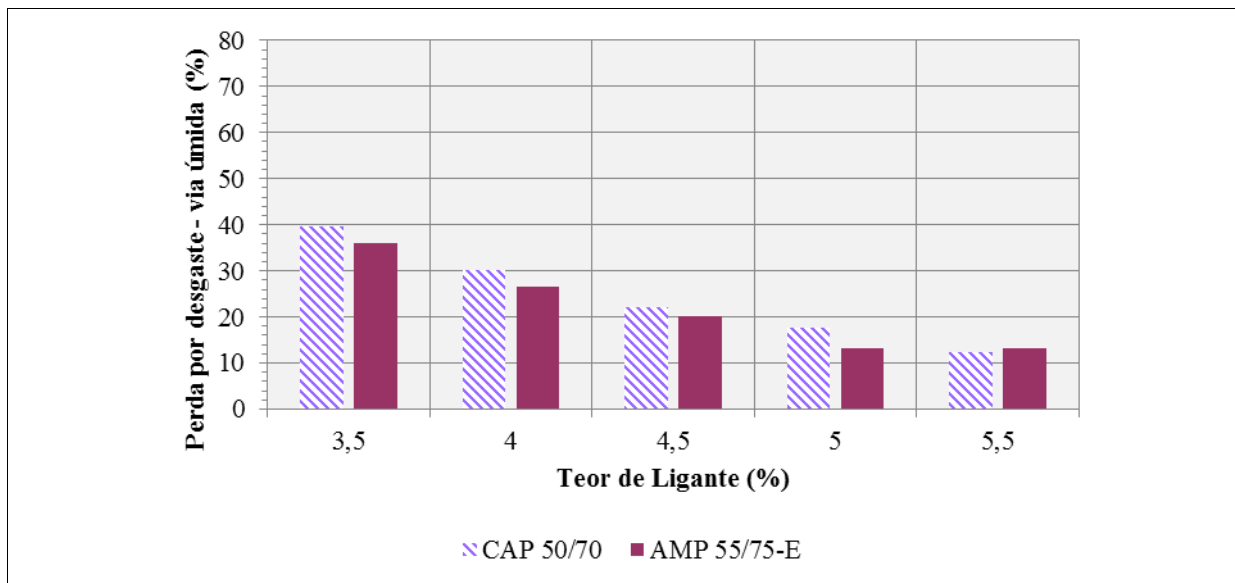


Figura 3.52: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Central – faixa 9,5mm CALTRANS

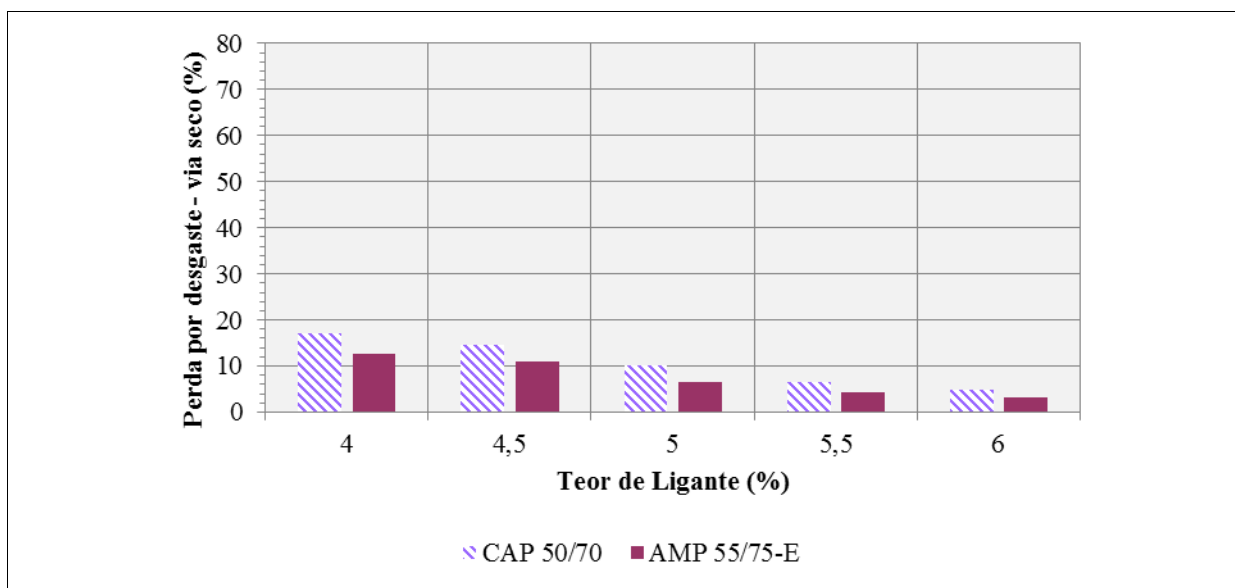


Figura 3.53: Desgaste Cantabro via seco- Pedreira Central – faixa 1/4" tipo "A" Tennessee

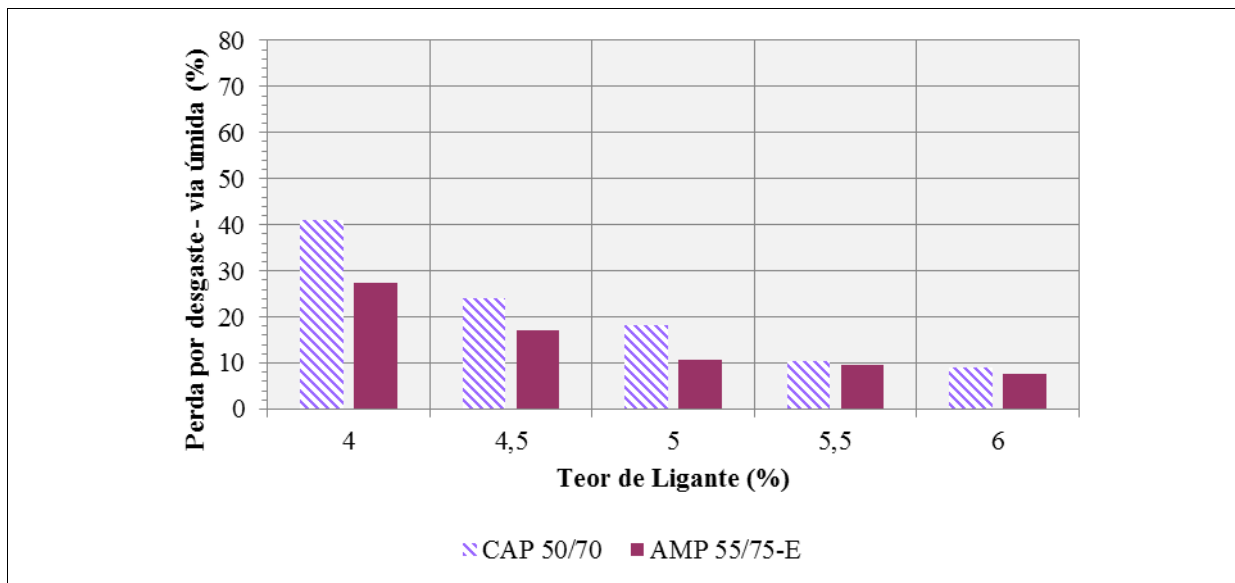


Figura 3.54: Desgaste Cantabro via úmida- Pedreira Central – faixa 1/4” tipo “A” Tennessee

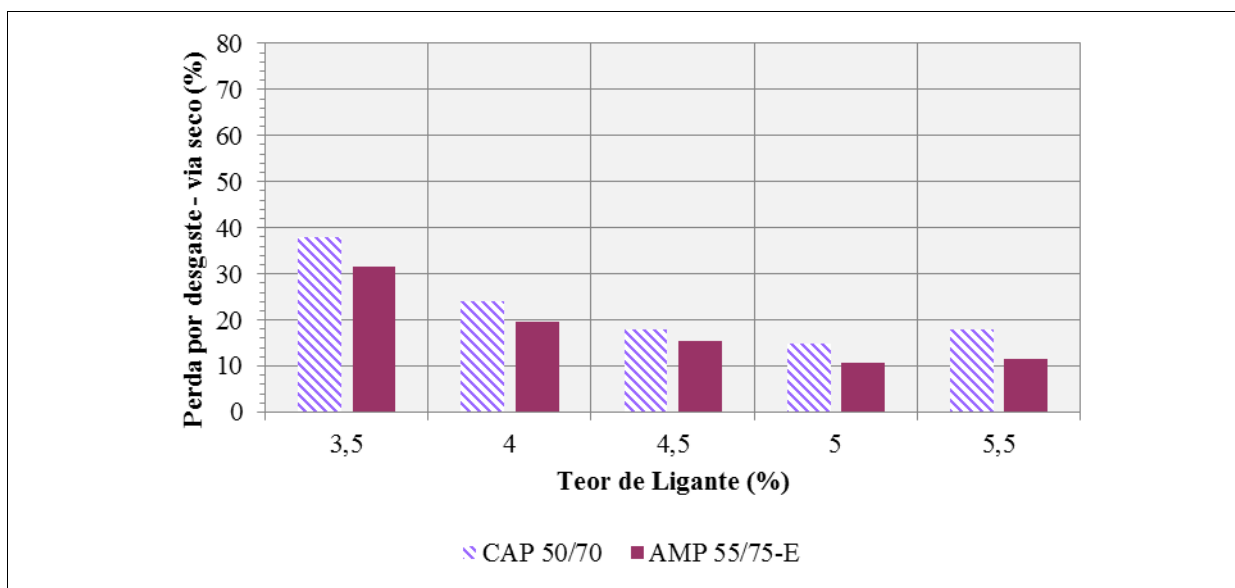


Figura 3.55: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Tibagi – faixa 9,5mm CALTRANS

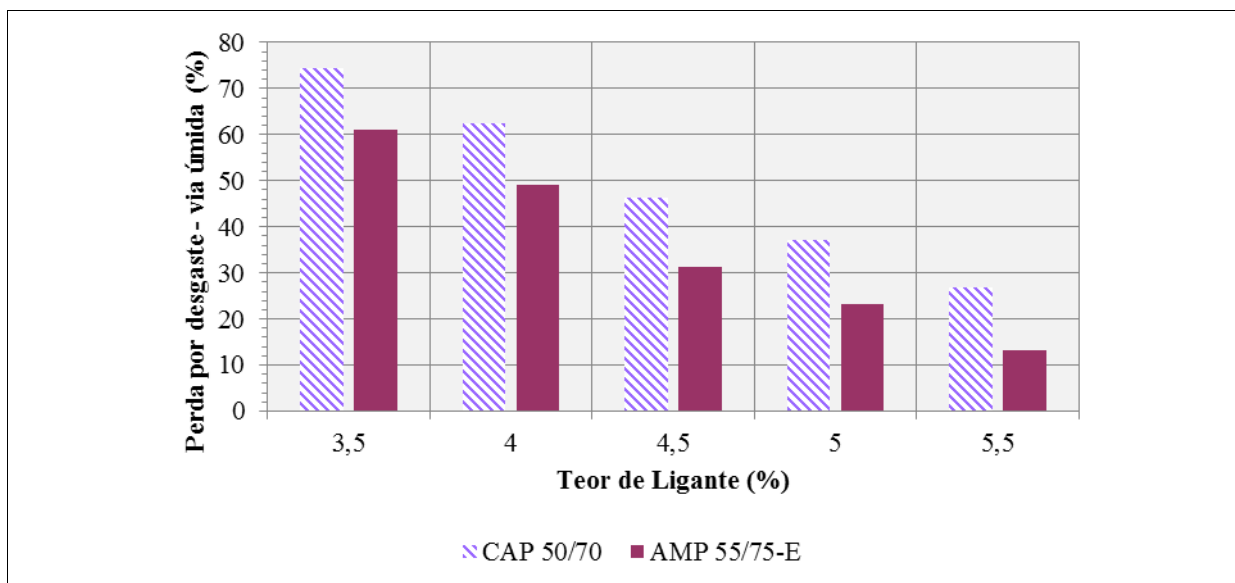


Figura 3.56: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Tibagi - faixa 9,5mm CALTRANS

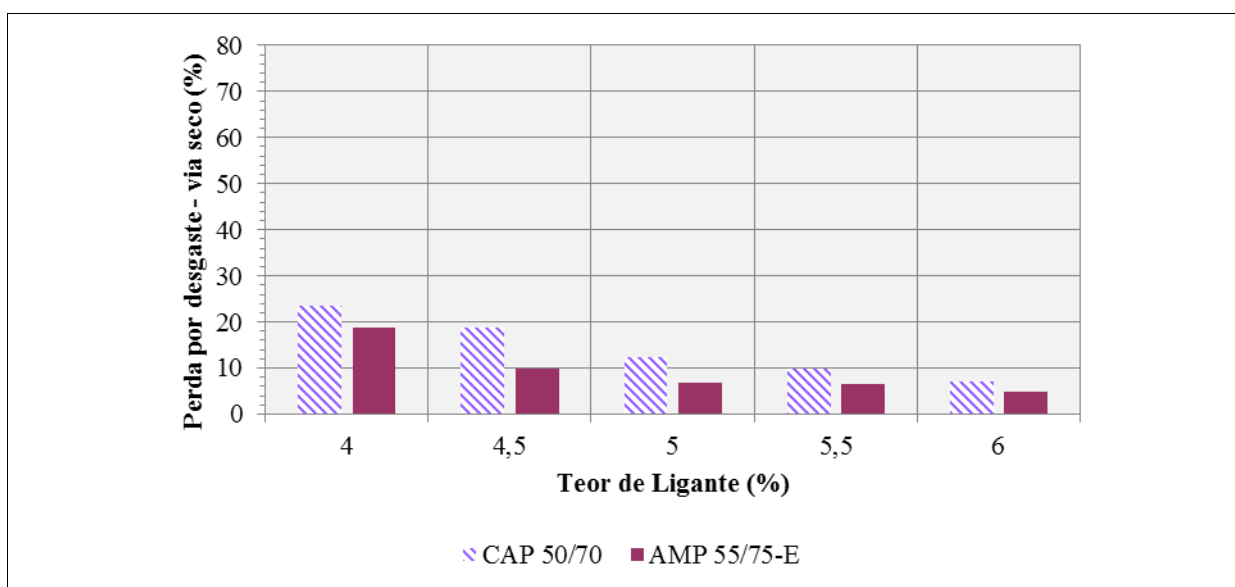


Figura 3.57: Desgaste Cantabro via seco - Pedreira Tibagi - faixa 1/4" tipo "A" Tennessee

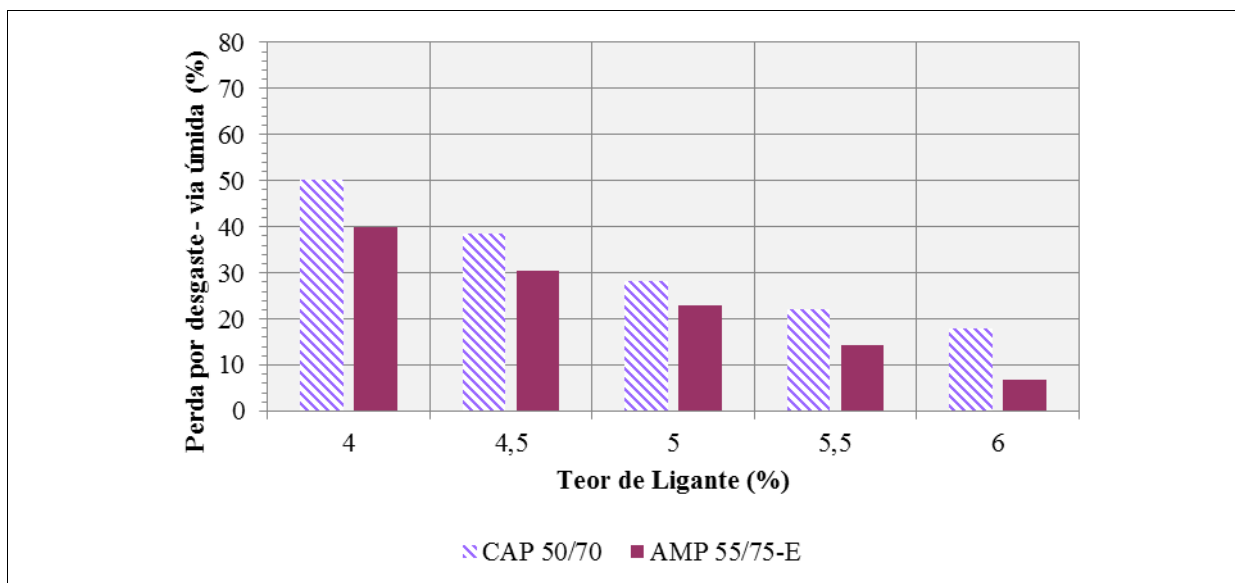


Figura 3.58: Desgaste Cantabro via úmida - Pedreira Tibagi - faixa 1/4" tipo "A" Tennessee

As seguintes considerações podem ser feitas a partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 3.47 a 3.58:

- a) de modo geral, a perda por desgaste é maior à medida que decrescem os teores de ligante (CAP 50/70 e AMP 55/75-E) e para as misturas que foram previamente condicionadas (via úmida) em relação às não condicionadas (via seca), demonstrando sua maior sensibilidade à ação da água, mesmo contendo cal e aditivo promotor de adesão (CAP 50/70);
- b) para os teores de ligantes estudados, as misturas asfálticas dosadas nas Faixas CALTRANS e Tennessee, com materiais das pedreiras, Basalto, Central, Tibagi e ligante AMP 55/75-E tendem a apresentar maior resistência ao desgaste (ambas via seca e via úmida) em relação às formuladas com CAP 50/70;
- c) as misturas asfálticas formuladas com AMP 55/75-E, em teores iguais ou superiores a 5,0% e agregados ácidos (altamente silicosos e suscetíveis à ação da água) das pedreiras, Basalto (gnaisse), Central (granito) e Tibagi (riolito), dosadas nas Faixas CALTRANS e Tennessee, apresentaram resultados de perda por desgaste Cantabro via seca inferiores a 15%, e de Cantabro via úmida inferiores a 25%, atendendo as recomendações técnicas norte-americanas para o RAUD (CALTRANS, 2003-a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004

e NCHRP, 2011) e argentina, elaborada pela *Comisión Permanente del Asfalto* (2010) com base nas especificações espanholas, para micro concretos asfálticos a quente de granulometria descontínua.

#### 3.3.3.4 Estabilidade mecânica por simulador LPC

Em função dos melhores resultados combinados de resistência à tração e ao desgaste por abrasão Cantabro apresentados pelas misturas asfálticas (não condicionadas e condicionadas a 60°C, 24 horas em água), bem como de resistência ao dano por umidade induzida (RRT), foi selecionado o estudo de dosagem experimental, denominado projeto n° 10 (Tabelas 3.1 e 3.7), composto por agregados da pedra Central, faixa ¼” Tennessee e AMP 55/75-E para a avaliação da estabilidade mecânica através do ensaio de deformação permanente em trilha de roda no simulador de tráfego LPC.

A descrição/composição dos materiais, as temperaturas de usinagem e de compactação da mistura e demais dados referentes ao projeto foram fornecidos ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP para a realização do ensaio. A Tabela 3.24 apresenta a composição dos materiais para a mistura asfáltica ultra delgada.

Tabela 3.24: Composição da mistura asfáltica ultra delgada

<i>Material</i>	<i>Pedreira Central</i>
	% na composição
Pedrisco 3/8”	60
3/16” ao fundo	39
Cal CH-I	1
<i>Ensaio</i>	<i>Teor de ligante asfáltico (%)</i>
Deformação permanente em trilha de roda	5,5
	-0-

O seguinte procedimento foi estabelecido para o processo de usinagem da mistura asfáltica: pesagem de cada material já quente na quantidade exata do traço. Após pesagem das frações que compõem o traço, os agregados retornaram à estufa até atingir a temperatura requerida para a mistura. Adicionou-se o ligante asfáltico na quantidade e temperatura de usinagem estabelecidas na dosagem Marshall e os materiais foram misturados por um período em torno



de 5 minutos. Finalmente foram armazenados em estufa por 2 horas, na temperatura estabelecida para a compactação da mistura, visando à adequada absorção do ligante.

Os ensaios de Deformação Permanente nas trilhas de roda foram realizados no simulador de tráfego tipo LPC francês (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*), instalado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP. Para a mistura asfáltica foram moldadas duas placas com 500 mm de comprimento, 180 mm de largura e 50 mm de espessura, conforme procedimento da norma francesa NF P 98-253-1 “*Déformation Permanente Mélanges Hydrocarbonés*” (AFNOR, 1991a).

As placas de mistura asfáltica foram compactadas por amassamento, simulando a compactação de campo, por meio de um equipamento “mesa compactadora tipo LPC” (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*) – Figura 3.59, conforme especificação francesa NF P 98-250-2 “*Preparation Mélanges Hydrocarbonés*” (AFNOR, 1991b).



Figura 3.59: Mesa compactadora tipo LPC (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*)

A mistura asfáltica apresentou baixa estabilidade à compactação, provavelmente em função da espessura do molde (50 mm) não corresponder a real (15 a 25 mm). Conforme o pneu da mesa compactadora passava em um dos lados da placa a outra parte da mistura era expulsa para fora do molde perdendo a condição de compactação. A utilização de uma superfície metálica de apoio para recobrir toda área superficial permitiu uma compactação uniforme e a densidade obtida foi semelhante à densidade do Marshall, com todo o material usinado acondicionado no molde.

Em geral, os ensaios de deformação permanente em trilhas de roda são conduzidos a 60°C até 30.000 ciclos, sob condições controladas de pressão do pneu (6 psi) e carga do eixo (5.000 N). Porém, a norma francesa NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001) estabelece valores máximos de 15 a 20%, determinados a 3000 ciclos, para a porcentagem de deformação permanente em trilha de roda dos revestimentos delgados tipo BBTM classe 1 0/10 (teor de vazios entre 10 a 18%) e BBTM 0/6 (teor de vazios entre 12 a 20%), respectivamente, conforme Tabela 2.15.

A finalidade principal do ensaio (conduzido até 3.000 ciclos), não é propriamente o de avaliar a deformação permanente em trilha de roda, mas verificar se a estabilidade mecânica do revestimento delgado não compromete suas características de desempenho funcional (“fechamento” da macrotextura superficial em função do tráfego).

As passagens da roda sobre as placas são feitas em ciclos de ida e volta do pneu na frequência de 1 Hz. As medidas de afundamento são realizadas em 15 pontos distintos da trilha de roda (Figura 3.60).

Ainda segundo a norma NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001) a avaliação da macrotextura superficial deve ser realizada somente “in situ” através do ensaio da mancha de areia (HS) segundo a norma NF EN 13036-1 (AFNOR, 2002a). Os valores mínimos de HS devem ser 0,7 e 0,9 mm para o BBTM 0/6 e 0/10, respectivamente.



Figura 3.60: Simulador de tráfego tipo LPC (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*)

A Figura 3.61 mostra o aspecto final de uma das placas após a verificação da sua estabilidade mecânica a 60°C, com agregados da pedra Central na composição e teor de ligante de

projeto estabelecido pelo estudo de dosagem experimental (5,5% de AMP 55/75-E), apresentados na Tabela 3.24.



Figura 3.61: Placa da mistura experimental tipo RAUD – Pedreira Central

A Tabela 3.25, mostra os resultados de deformação permanente após 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos de aplicação da carga do simulador de tráfego LPC. A representação gráfica dos resultados dos ensaios laboratoriais com os respectivos ciclos de carga e porcentagens de afundamento em trilha de roda é apresentada na Figura 3.62.

A partir da análise dos resultados mostrados na Tabela 3.25 e Figura 3.62, verifica-se que o valor de 3,85% referente a deformação permanente a 60°C, 3.000 ciclos, para a mistura composta por agregados da pedreira Central, Faixa ¼” Tennessee e teor de projeto de 5,5% de AMP 55/75-E, é inferior ao limite máximo de 15% determinado para o revestimento delgado do tipo BBTM, segundo a norma francesa NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001).

Observa-se também que a mistura asfáltica usinada com agregados da pedreira Central, no teor de ligante asfáltico de 5,5%, apresentou o valor de 5,46% referente à deformação permanente em trilha de roda a 60°C, 30.000 ciclos. Esse valor de deformação permanente determinado para a mistura ultra delgada é muito próximo ao limite máximo de 5,0%, estabelecido pelas diretrizes de dimensionamento europeias do Grupo COST 333, para as misturas asfálticas densas sob tráfego pesado (*fort*) - acima de 2000 veículos comerciais diários, com eixo traseiro carregado de no mínimo 5 toneladas, e também usualmente adotado no Brasil.

Ressalta-se que os resultados de deformação permanente foram determinados em placas moldadas em laboratório com 50 mm de espessura. o que, conforme já observado, não corresponde exatamente ao executado na prática. A mistura asfáltica tipo BBUM é aplicada em espessuras ultra delgadas, entre 15 a 25 mm, sobre uma superfície previamente selada com emulsão asfáltica elastomérica. Parte do ligante asfáltico residual da emulsão migra para dentro da mistura preenchendo a terça parte dos vazios do esqueleto mineral formando uma membrana elástica e coesiva responsável pela adesão entre o revestimento e a camada subjacente. Portanto, uma vez que essas camadas trabalham na estrutura do pavimento de forma consolidada, pode-se inferir que no campo a mistura em estudo deve apresentar um desempenho mecânico ligeiramente superior ao verificado em laboratório.

Tabela 3.25: Valores de deformação permanente para 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos

Pedreira	Teores (%)	% deformação permanente em trilha de roda			
		No. De ciclos de simulação de tráfego			
		1000	3000	10000	30000
Central	5,5	3,26	3,85	4,62	5,46

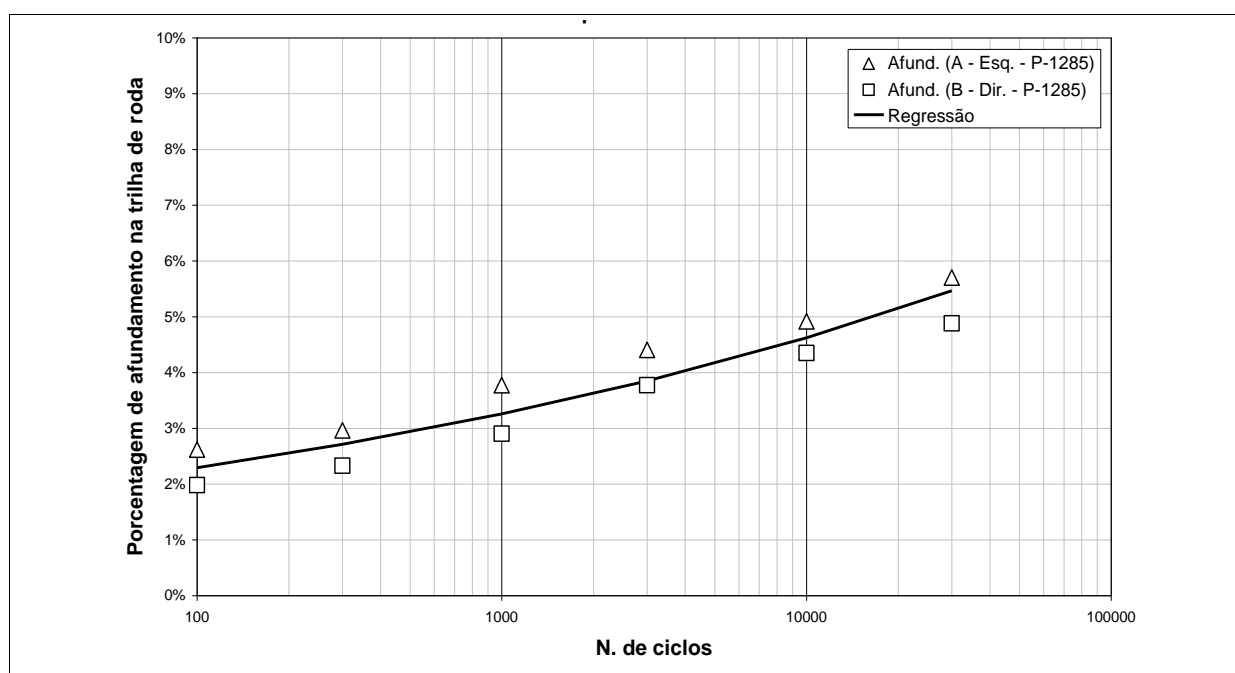


Figura 3.62: Deformação permanente - n° de ciclos x afundamento (%) – Pedreira Central –AMP 55/75-E – teor 5,5% - temp. de ensaio = 60°C

### 3.4 RESULTADOS FINAIS E DISCUSSÕES DO ESTUDO DE DOSAGEM

A Tabela 3.26 apresenta os valores limites para os requisitos técnicos de dosagem da mistura asfáltica, sugeridos pelo autor com base na revisão bibliográfica da pesquisa. Também são apresentados os resultados dos ensaios referentes aos 12 projetos de dosagem que foram desenvolvidos para o estudo de laboratório do RAUD, segundo a combinação de materiais e faixas granulométricas discriminadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.26: Resultados dos estudos de dosagem das misturas asfálticas

Métodos	Ensaios	Valores Especificados		Resultados											
		Mín	Max	Projetos											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DNER ME 043	Teor de ligante de projeto – Pb (%)	-	-	5,0	5,0	5,0	5,5	5,0	5,5	5,0	5,0	5,0	5,5	5,0	5,5
Equação 2.6	Espessura do filme de ligante (µm)	9,0	-	9,9	9,9	9,6	9,9	10,5	11,8	9,9	10,0	9,7	10,0	11,0	12,3
DNER ME 043	Volume de vazios - VV	-	-	17,0	14,0	13,7	11,2	18,4	15,6	16,2	16,8	14,5	11,7	18,2	15,4
DNER ME 043	Relação betume/vazios – RBV (%)	-	-	33,1	38,3	39,0	48,5	35,1	42,1	36,9	34,5	39,3	46,3	33,9	41,00
DNER ME 043	Vazios do agregado mineral - VAM (%)	-	-	25,4	22,6	22,4	21,2	28,4	26,9	25,5	25,6	23,5	21,7	27,6	26,1
NBR-15619	Massa específica máxima medida (RICE) (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	2,476	2,482	2,512	2,488	2,424	2,403	2,448	2,493	2,490	2,487	2,423	2,404
NBR-15573	Densidade aparente	-	-	2,057	2,134	2,166	2,212	1,975	2,026	2,056	2,073	2,136	2,200	1,980	2,301
-	Relação fíler/ligante asfáltico	-	-	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	0,9	0,9
NBR-15087	Resistência à tração 25°C (MPa)	0,65 <sup>3</sup>	-	0,69	0,92	0,93	0,99	0,55	0,65	0,86	0,83	0,98	1,13	0,70	0,75

Investigação de campo e laboratório sobre revestimento asfáltico ultra delgado

Tabela 3.26: Resultados dos estudos de dosagem das misturas

Métodos	Ensaios	Valores Especificados		Resultados											
		Mín	Max	Projetos											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NBR-15087	Resistência à tração 60°C, 24h, em água (MPa)	-	-	0,36	0,41	0,60	0,88	0,31	0,54	0,61	0,71	0,71	0,95	0,51	0,58
NBR-15617	Dano por induzida -RRT (%)	70,0 <sup>1</sup>	-	52,17	44,57	64,52	88,89	56,36	83,08	70,93	85,54	72,45	84,07	72,86	77,33
NBR-15140	Desgaste por abrasão Cantabro via seca (%)	-	-	9,71	8,39	11,95	6,65	14,72	9,95	7,13	7,93	7,91	4,26	10,59	6,48
NBR-15140	Desgaste por abrasão Cantabro via úmida (%)	-	-	22,00	17,29	17,60	10,47	37,22	22,09	13,05	13,69	13,12	9,68	23,30	14,19
ASTM D 6390 ou AASTHO T-305	Sensibilidade ao escorrimento (%)	-	0,10 <sup>1</sup>	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
NF P 98-253-1	Afundamento em trilha de roda, 60°C, 3.000 ciclos - simulador LCPC (%)	-	15,0 <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,85	-	-

<sup>1</sup> Valores limites estabelecidos nas normas norte-americanas pela CALTRANS (2003-a); TDOT (2004); TxDOT(2004) e NCHRP(2011) para o RAUD.

<sup>2</sup> Valor limite estabelecido na norma francesa XP P 98-137 (2001) para o revestimento delgado do tipo BBTM.

<sup>3</sup> Valor limite estabelecido na norma brasileira DNIT 031/2006 – ES para o concreto asfáltico.

As seguintes considerações podem ser feitas a partir da análise dos resultados do estudo de dosagem do RAUD, apresentados na Tabela 3.26:

- a) o teor de ligante de cada projeto de dosagem (Pb) foi selecionado de modo a assegurar a espessura mínima do filme de asfalto (9,0  $\mu\text{m}$ ), determinada através da Equação 2.9, e atender aos valores limites experimentais, estabelecidos neste estudo, para a resistência à tração por compressão diametral e de resistência ao dano por umidade induzida (RRT);
- b) para os projetos n<sup>os</sup> 1, 2, 3 e 5, verifica-se que os valores de resistência ao dano por umidade induzida (RRT) não atendem ao valor mínimo de 70% recomendado pelas normas norte-americanas para o RAUD, devido principalmente às características do ligante asfáltico selecionado para o estudo (CAP 50/70). A aplicação de vácuo de 660 mm de Hg por 10 minutos durante o procedimento do ensaio pode ter contribuído para os baixos valores de RRT determinados para estes projetos;
- c) as densidades aparentes, massas específicas máximas medidas e os parâmetros volumétricos Marshall – Volume de vazios (Vv), Relação betume-vazios (RBV) e Vazios do agregado mineral (VAM), foram obtidos para o teor de ligante de projeto, conforme a representação gráfica dos estudos de dosagem apresentada na sequência de Figuras 3.14 a 3.25;
- d) as seguintes faixas de valores foram determinadas para os parâmetros volumétricos referentes ao estudo Marshall das misturas asfálticas:  
(11 %  $\leq$  Vv  $\leq$  18 %), (33 %  $\leq$  RBV  $\leq$  48 %) e (21 %  $\leq$  VAM  $\leq$  27 %)
- e) a seguinte faixa de valores foi obtida para a relação filer-ligante asfáltico das misturas estudadas: (0,9 a 1,1);
- f) a avaliação da sensibilidade ao escorrimento, realizada no teor de ligante de projeto, apresentou resultados satisfatórios para todas as misturas estudadas (inferior a 0,1%);
- g) em função dos bons resultados obtidos para a combinação dos valores de resistência à tração, ao desgaste por abrasão Cantabro das misturas asfálticas (não condicionadas e condicionadas), e de resistência ao dano por umidade



induzida (RRT) foi selecionado o estudo de dosagem (projeto n° 10), composto por agregados da pedreira Central, Faixa ¼” Tennessee AMP 55/75-E para a avaliação da estabilidade mecânica através do ensaio de deformação permanente em trilha de roda, apresentado no item 3.3.3.4.

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CAMPO

Este capítulo aborda os seguintes tópicos:

- a) descrição e planejamento do programa de campo;
- b) características do trecho experimental;
- c) seleção e caracterização dos materiais;
- d) projetos de dosagem das misturas asfálticas;
- e) processo construtivo do RAUD;
- f) controles tecnológicos;
- g) monitoramento do trecho experimental;
- h) resultados e discussões do programa de campo.

### 4.1. DESCRIÇÃO E PLANEJAMENTO DO PROGRAMA DE CAMPO

Com o objetivo de avaliar as características construtivas e funcionais da superfície de rolamento, foi selecionado com base no critério de deflexão e condições superficiais semelhantes, um trecho experimental, com 1200 metros de extensão, na obra de restauração da rodovia de alto tráfego no Estado do Paraná -PR-092, localizado no trecho Wenceslau Braz -Jaguariaíva, sob administração do DER-PR.

No local, foram construídas duas seções para monitoramento e análise comparativa; uma seção-teste constituída por um revestimento asfáltico ultra delgado – RAUD de 20 mm e outra de referência em concreto asfáltico – CA de 30 mm de espessura acabada.

O trecho experimental apresentava-se em boa condição estrutural (nível deflectométrico) e superficial.

Cada seção, (teste e de controle), foi de 600 metros de extensão por 7 metros de largura e construídas em maio de 2009 pela empresa Compasa do Brasil – Asfaltos e Serviços, com

ligante asfáltico modificado (AMP55/75-E), agregados de mesma natureza mineralógica e procedentes da mesma central de britagem.

A Figura 4.1 mostra o mapa de localização do trecho experimental. A Figura 4.2(a) e (b) apresenta as seções do trecho experimental com detalhe das distintas camadas do pavimento e suas respectivas superfícies de rolamento.

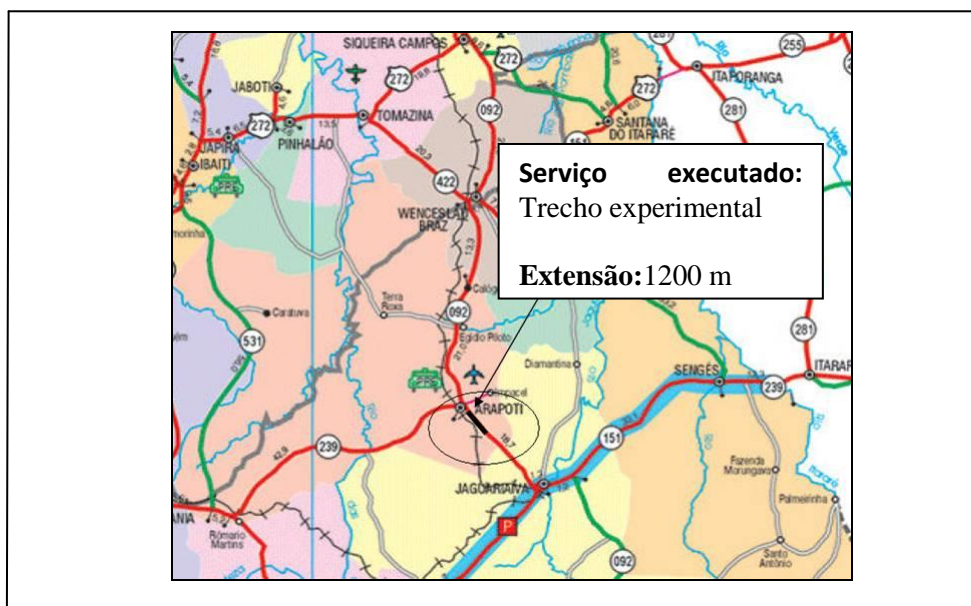
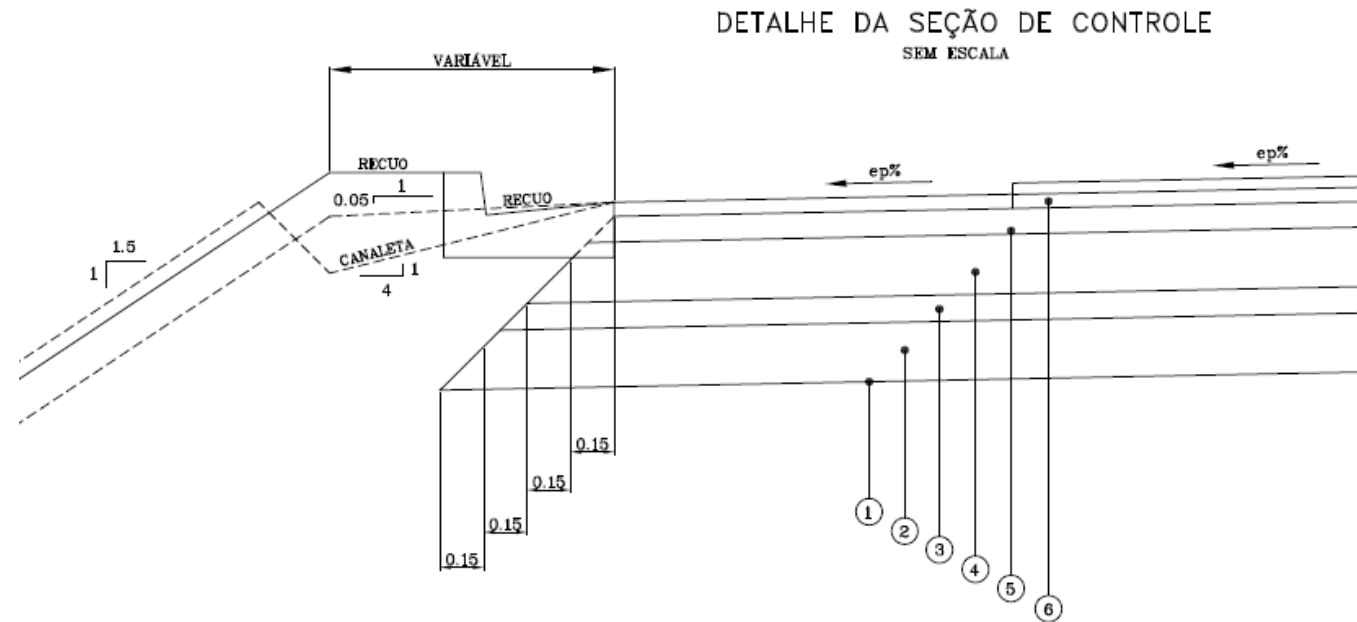
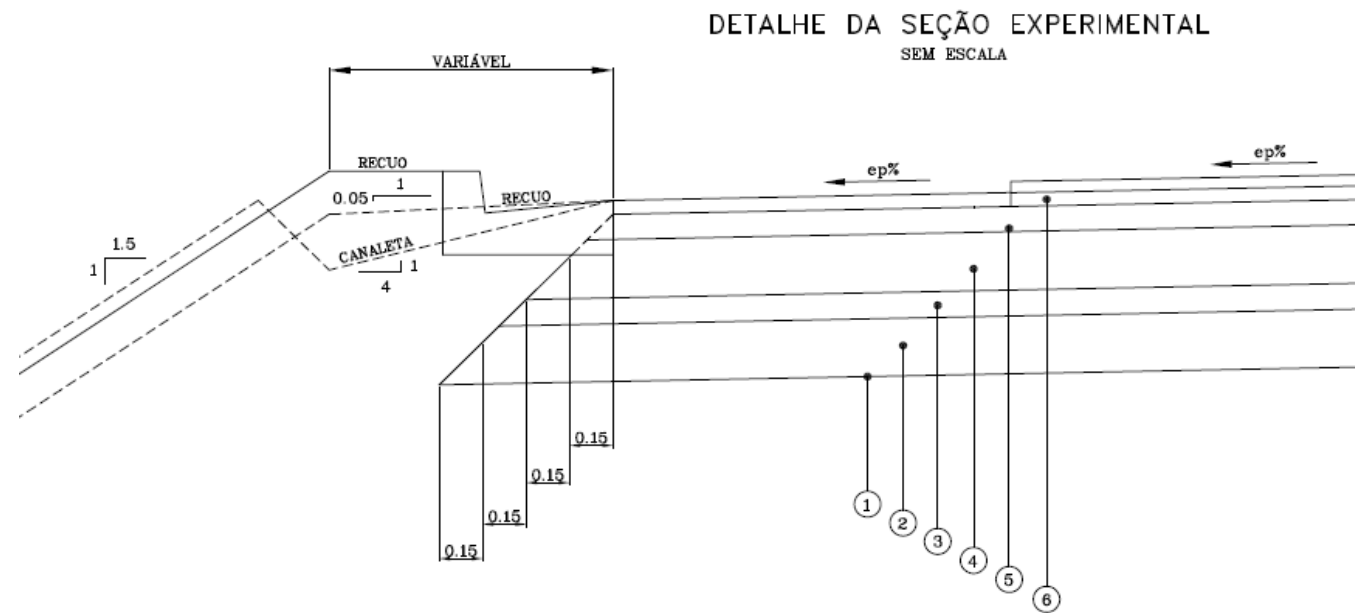


Figura 4.1. Mapa de localização do trecho experimental desta pesquisa



LEGENDA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)
1	REGULARIZAÇÃO DO SUB-LEITO	-*-*
2	BASE BRITA GRADUADA SIMPLES	15.00
3	REVESTIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO	4.00
4	REFORÇO DE PRÉ MISTURADO À FRIO	9.00
5	REVESTIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO (CA)	4.00
6	REVESTIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO (CA) - MAIO 2009	3.00

Figura 4.2a. Detalhes das seções-tipo do trecho experimental com suas respectivas espessuras - sessão de controle



LEGENDA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)
1	REGULARIZAÇÃO DO SUB-LEITO	-*-*-
2	BASE BRITA GRADUADA SIMPLES	15.00
3	REVESTIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO	4.00
4	REFORÇO DE PRÉ MISTURADO À FRIO	9.00
5	REVESTIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO (CA)	4.00
6	REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO (RAUD)	2.00

Figura 4.2b. Detalhes das seções-tipo do trecho experimental com suas respectivas espessuras - sessão experimental

O desempenho funcional entre as seções do revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD) e de referência em concreto asfáltico (CA) sob condições similares de clima, tráfego e suporte da estrutura do pavimento foi avaliado em escala real durante 29 meses, contados a partir da data de sua execução, através de levantamentos de campo e de medições periódicas das características relacionadas à segurança do usuário e a redução do ruído ambiental, a saber:

- a) tráfego atuante através de contagens manuais segundo o tipo de veículo e VDM total e classificado por intervalos horários, segundo metodologia adotada pelo DER-PR;
- b) condições climáticas através do monitoramento das temperaturas ambiente, do pavimento e dos índices pluviométricos;
- c) deflexões antes e após a execução do trecho experimental, medidas com viga Benkelman (DNER-ME 024/94);
- d) inventário do estado da superfície através de avaliação visual (DNIT 006/2003-PRO e DNIT 007/2003-PRO);
- e) atrito superficial (microtextura dos agregados) através do pêndulo britânico SRT –*Skid Resistance Tester* - ASTM E 303/93 (ASTM, 1998);
- f) macrotextura através do ensaio de mancha de areia - ASTM E 965/96 (ASTM, 2001c);
- g) drenabilidade superficial, avaliação da capacidade da macrotextura em drenar a água da chuva através da superfície do pavimento
- h) cálculo dos valores de IFI (*International Friction Index*) cujo procedimento está descrito na norma ASTM E 1960/98 (ASTM, 200c);
- i) e medição do ruído através da metodologia ISO 11819-1 - *Statistical Pass-By Index* – (ISO, 1997).

A partir da análise dos resultados obtidos no monitoramento do trecho experimental, à luz da expectativa de desempenho funcional do RAUD obtida na França e EUA, o presente estudo teve por objetivo a obtenção das diretrizes de utilização dessa nova tecnologia no Brasil,

principalmente para a melhoria das condições de segurança dos pavimentos rodoviários sob tráfego pesado, intenso e rápido.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EXPERIMENTAL

Conforme estudos do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER-PR, 2009), no período 2004-2008 houve 201 acidentes, com 106 feridos e 9 mortos, demonstrando a necessidade de melhorias nas condições de segurança da rodovia PR-092. A opção por um revestimento asfáltico de melhor aderência pneu-pavimento deverá contribuir para a redução do número de acidentes da rodovia PR-092.

A Tabela 4.1 apresenta a projeção do volume de tráfego da rodovia referente ao período de projeto 2009-2016. Para o ano de 2011, o estudo de tráfego estabeleceu um número  $N = 3,99 \times 10^6$  com VDM = 4794, constituído por 2335 veículos de passeio, 139 coletivos e 2320 veículos de carga. Em 2011 foi realizada uma nova contagem de tráfego mostrando um VDM = 5665, constituído por 2509 veículos de passeio, 129 coletivos e 3027 veículos de carga com  $N = 1,02 \times 10^7$ .

Observa-se, portanto que o número (N) equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas (80 kN) real superou em aproximadamente 150% a projeção do estudo para o ano de 2011, evidenciando as condições de tráfego intenso/pesado que está sendo submetido o trecho experimental.

Tabela 4.1. Projeção do número equivalente de operações do eixo padrão. Fonte: (DER-PR, 2009)

Ano	Número N	
	Anual	Acumulado
2009	$3,71 \times 10^6$	$3,71 \times 10^6$
2010	$3,85 \times 10^6$	$7,56 \times 10^6$
2011	$3,99 \times 10^6$	$1,15 \times 10^7$
2012	$4,15 \times 10^6$	$1,57 \times 10^7$
2013	$0,43 \times 10^7$	$2,00 \times 10^7$
2014	$0,44 \times 10^7$	$2,44 \times 10^7$
2015	$0,46 \times 10^7$	$2,90 \times 10^7$
2016	$0,48 \times 10^7$	$3,38 \times 10^7$

Com relação às condições climáticas, a Figura 4.3 apresenta as temperaturas mensais do ar (máxima, mínima e média), medidas pela estação meteorológica de Jaguariaíva (a mais próxima da cidade de Arapoti), do Instituto Tecnológico SIMEPAR - Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – UFPR. A mesma Figura também apresenta os dados de precipitação pluviométrica, fornecidos pela Cooperativa Agropecuária Arapoti Ltda – CAPAL, referentes ao período entre maio de 2009, (data da construção do trecho experimental), a junho de 2011.

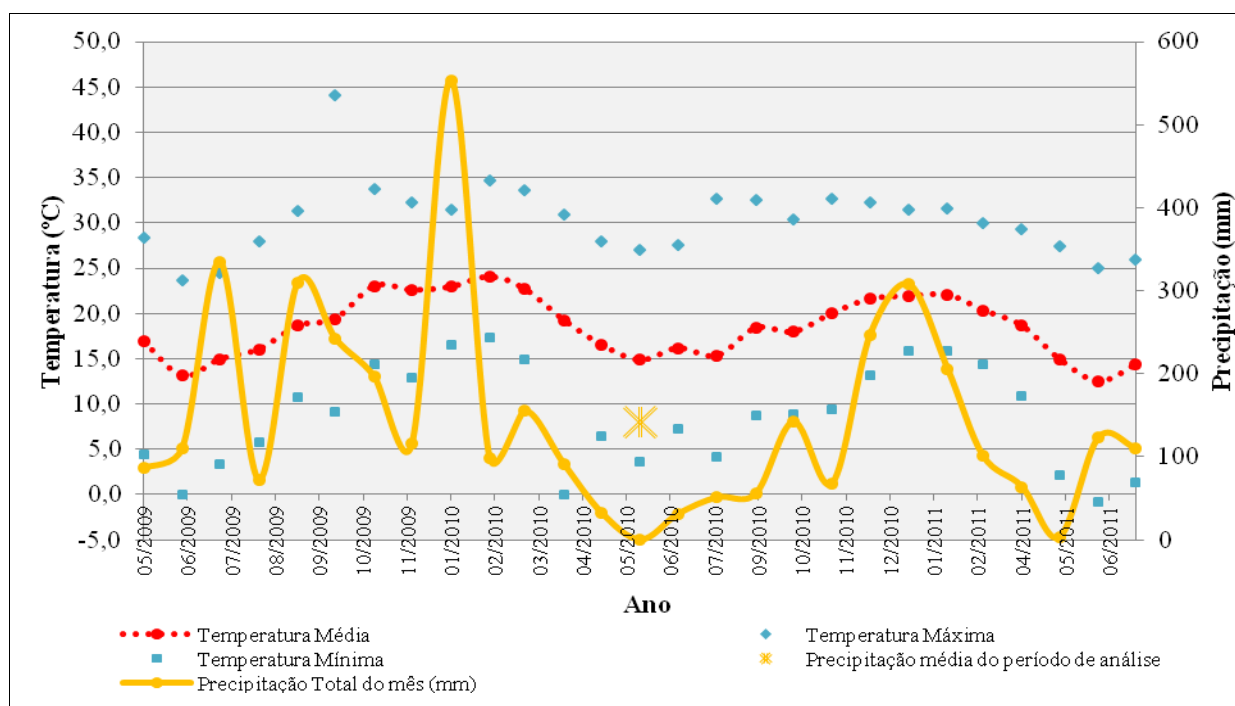


Figura 4.3. Condições climáticas – temperaturas do ar e índices pluviométricos do trecho experimental

Segundo o programa de pesquisa norte-americano *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que resultou em nova proposição de metodologia (SUPERPAVE®) para a avaliação dos ligantes e dosagem de misturas asfálticas, os asfaltos são classificados em graus de temperatura máxima e mínima que apresentam determinadas propriedades, estabelecidos como “grau de desempenho”. Assim os ligantes são classificados em PG x-y, sendo x a temperatura máxima de campo na profundidade 20 mm ( $T_{\text{máx } 20\text{mm}}$ ) e y (incluindo o sinal negativo) a temperatura mínima que atua no pavimento no dia mais frio do ano (BERNUCCI *et al.*, 2008).



Baseando-se na fórmula para cálculo da  $T_{\text{máx } 20\text{mm}}$ , foram estimadas as temperaturas máximas na profundidade de 20 mm do pavimento para cada mês, durante o período de monitoramento do trecho experimental. A Equação 4.1 usada foi (Instituto do Asfalto, 2001, *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008):

$$T_{\text{máx } 20\text{mm}} = (T_{\text{máx ar}} - 0,00618 \cdot \text{Lat}^2 + 0,2289 \cdot \text{Lat} + 42,2) \cdot (0,9545) - 17,78 \quad (4.1)$$

Onde:

$T_{\text{máx } 20\text{mm}}$  = temperatura máxima de projeto do revestimento asfáltico à profundidade de 20 mm abaixo da superfície, °C

$T_{\text{máx ar}}$  = média das temperaturas do ar nos sete dias consecutivos mais quentes do ano, °C

Lat = latitude geográfica do local do projeto em graus

Também foi feito o cálculo da temperatura mínima para cada mês do projeto de pesquisa; para isso utilizou-se a seguinte expressão (Instituto do Asfalto, 1997):

$$T_{\text{min}} = 0,859 \cdot T_{\text{ar}} + 1,7 \quad (4.2)$$

Onde:

$T_{\text{min}}$  = temperatura mínima da superfície asfáltica do projeto experimental no dia mais frio do ano

$T_{\text{ar}}$  = temperatura mínima do ar dia mais frio do ano

A Figura 4.4 apresenta os resultados das temperaturas máximas ( $T_{\text{máx } 20\text{mm}}$ ) e mínimas do pavimento ( $T_{\text{min}}$ ) calculados para o local do trecho experimental, segundo as equações 4.1 e 4.2 para as temperaturas máximas ( $T_{\text{máx ar}}$ ) e mínimas ( $T_{\text{ar}}$ ) fornecidas pelo SIMEPAR, respectivamente, referentes ao período entre maio de 2009 (data da construção do trecho experimental) a junho de 2011.

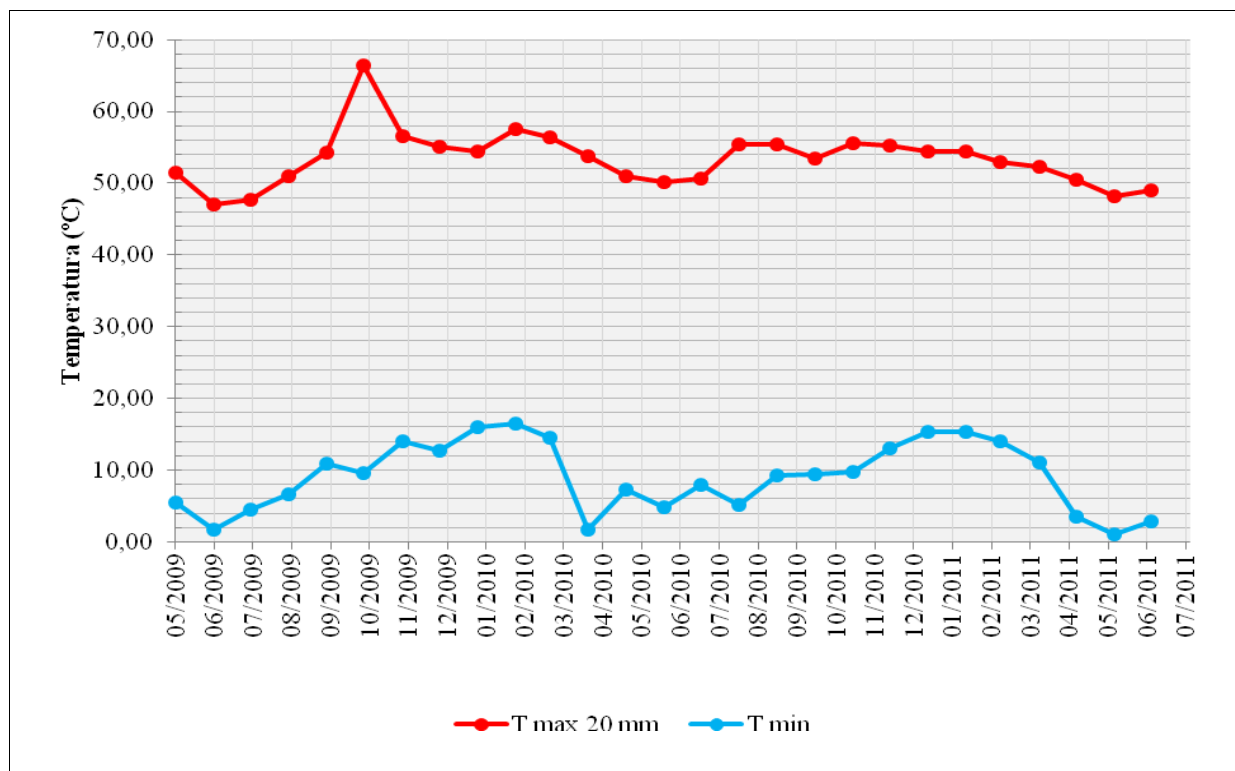


Figura 4.4. Temperaturas máximas e mínimas do pavimento do trecho experimental

A partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, observa-se que durante o período de análise do projeto experimental, a média mensal de precipitação pluviométrica variou entre 100 a 200 mm, atingindo o índice máximo de 550 mm em janeiro/2010. Já as temperaturas máximas e mínimas do pavimento corresponderam a 66°C e 0°C, respectivamente.

Com base nas temperaturas máxima (66°C) e mínima (0°C) do pavimento do trecho experimental, a seleção do ligante asfáltico para o projeto, não levando em conta o nível de tráfego, corresponde ao grau mínimo de desempenho PG 70-10 da especificação norte-americana SUPERPAVE®. Em relação às especificações brasileiras, o asfalto modificado por polímero elastomérico (AMP) tipo 55/75-E deve apresentar características de desempenho similares ao PG 70/10, de acordo com experiências anteriores do autor.

## 4.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.3.1 Seleção dos agregados minerais

Amostras representativas de agregados de natureza mineralógica diabásica, proveniente da pedreira comercial Calógeras, localizada no município de Arapoti no Estado do Paraná, foram selecionadas para os projetos de dosagem das misturas asfálticas do trecho experimental desta pesquisa.

### 4.3.2 Seleção do material de enchimento – fíler mineral

O material de enchimento ou fíler mineral utilizado para ambos os projetos de dosagem do trecho experimental (RAUD e CA) foi a cal calcítica tipo CH-I. O material é homogêneo, não plástico, passando 100% na peneira de 0,42 mm (# 40) e no mínimo 65% na peneira de 0,075 mm (#200) conforme análise granulométrica (DNER 083/98), seco e livre de grumos provenientes de agregações de partículas finas.

### 4.3.3 Seleção dos ligantes asfálticos

Para aumentar a resistência e a durabilidade da camada de rolamento foram utilizados ligantes modificados por polímeros elastoméricos para os projetos de dosagem do trecho experimental e execução da membrana de ligação do RAUD sobre o suporte.

Os seguintes materiais asfálticos, procedentes da empresa distribuidora de produtos derivados de petróleo - Compasa do Brasil – Asfaltos e Serviços, foram selecionados:

- a) cimento asfáltico de petróleo modificado por polímeros elastoméricos Compaflex 55/75-E (nesta pesquisa denominado AMP 55/75-E) para os projetos de dosagem do RAUD e do CA, caracterizado na Tabela 3.3;
- b) e emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos – Compaflex RR1C-E (nesta pesquisa denominada RR1C-E) para a membrana de ligação do RAUD, caracterizada na Tabela 3.4.

#### 4.3.4 Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial

A Tabela 4.2 relaciona a procedência e a natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial para os projetos de dosagem da seção-teste do RAUD e a de referência em CA.

Tabela 4.2: Procedência e natureza mineralógica dos agregados e do fíler industrial das misturas asfálticas do trecho experimental desta pesquisa

<i>Projetos</i>	<i>Procedência</i>	<i>Natureza</i>	<i>Materiais</i>
<b>CA</b>	Pedreira Calógeras	Diabásio	Brita 3/4"
	Pedreira Calógeras	Diabásio	Pedrisco 3/8"
	Pedreira Calógeras	Diabásio	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1
<b>RAUD</b>	Pedreira Calógeras	Diabásio	Brita 3/8"
	Pedreira Calógeras	Diabásio	3/16" ao fundo
	Comercial	Calcítica	CAL CH-1

#### 4.3.5 Caracterização e densidade da mistura dos agregados

A Tabela 4.3 apresenta a caracterização dos agregados utilizados para compor os traços das misturas asfálticas. Os valores limites especificados foram baseados nas recomendações dos Departamentos de Transportes norte-americanos da Califórnia (CALTRANS) e do Tennessee (TDOT) para o RAUD.

A Tabela 4.4 apresenta a densidade da mistura de agregados, absorções e teor de ligante efetivo determinados nos projetos de dosagem do RAUD e do CA.

Tabela 4.3: Caracterização dos agregados do trecho experimental desta pesquisa

<i>Métodos</i>	<i>Ensaios</i>	<i>Valores especificados</i>		<i>Resultados</i>
		<i>Mín</i>	<i>Máx</i>	
DNER ME 035	Abrasão Los Angeles (s)	-	35,0	17,5
DNER ME 054	Equivalente de areia, em peso (%)	45,0	-	64,0
ASTM D471	Partículas chatas e alongadas 3:1 (%)	-	25,0	18,0
ASTM C1552	Angularidade de agregado miúdo (%)	40,0	-	44,8
AASHTO TP58	Micro Deval agregado miúdo (%)	-	18,0	8,5
DNER ME089	Durabilidade do agregado sulfato de sódio (%)	-	12,0	<12,0
NBR14949	Reatividade ao azul de metileno (m/g)	-	10,0	2,5

Tabela 4.3: Caracterização dos agregados do trecho experimental desta pesquisa

Métodos	Ensaio	Valores especificados		Resultados
		Mín	Máx	
ASTM C-127	Densidade do agregado seco-Gsa	-	-	3,017
	Densidade do agregado graúdo saturado-Gsb	-	-	2,931
	Absorção de água do agregado graúdo (%)	-	-	1,00
ASTM C-128	Densidade do agregado miúdo seco-Gsa	-	-	2,809
	Densidade do agregado miúdo saturado-Gsb	-	-	2,753
	Absorção de água do agregado miúdo (%)	-	-	1,60
DNER ME 089	Durabilidade do material graúdo (%)	-	12,0	<12,0
DNER ME 089	Durabilidade do material miúdo (%)	-	15,0	<15,0

Tabela 4.4: Densidade da mistura de agregados para o RAUD e CA do trecho experimental

Ensaio	Normas	RAUD	CA
Densidade real-Gsa	ASTM C-127 e ASTM C-128	2,917	2,958
Densidade aparente-Gsb		2,808	2,892
Densidade efetiva-Gse		2,863	2,925
Densidade efetiva (RICE)-Gse		2,913	2,899
Absorção de água		1,288	1,214
Absorção de ligante-Pba <sup>1</sup>		0,684	0,390
Ligante efetivo-Pbe <sup>2</sup>		4,551	4,228

<sup>1</sup> absorção de ligante em peso de mistura de agregados

<sup>2</sup> conteúdo efetivo de ligante em peso de mistura asfáltica

#### 4.3.6 Composição e graduação da mistura de agregados

Para melhorar o desempenho funcional da mistura descontínua no que se refere às condições de atrito, textura superficial, conforto ao rolamento e redução do ruído ambiental foram selecionados o tamanho máximo do agregado de 9,5 mm (Brita 3/8”) e a Faixa ¼” tipo “A” Tennessee, cujo bom comportamento mecânico foi verificado no programa experimental de laboratório desta pesquisa. Para a seção de referência foi estabelecida a Faixa D do DER/PR, conforme a especificação de serviço para concreto asfáltico com asfalto polímero - ES-P 15/2005.

A Tabela 4.5 apresenta a composição, graduação, faixa de trabalho e as tolerâncias admitidas para a composição granulométrica de agregados do projeto RAUD. A representação gráfica correspondente é mostrada na Figura 4.5.

Investigação de campo e laboratório sobre revestimento asfáltico ultra delgado

A Tabela 4.6 apresenta a composição, graduação, faixa de trabalho e as tolerâncias admitidas para a composição granulométrica de agregados do projeto CA. A representação gráfica correspondente é mostrada na Figura 4.6.

Tabela 4.5: Composição e graduação da mistura de agregados – projeto RAUD

Composição da mistura seca (%)								
Brita 3/4"		Pedrisco 3/8"		3/16" ao fundo		CAL CH-1		
--		64		35		1		
Peneira		Graduação da Mistura (%)	Faixa 1/4 TIPO "A" TENNESSEE (%)		Faixa de Trabalho (%)		Tolerância (%)	
Nº	Abertura		Limite Min.	Limite Máx.	Limite Min.	Limite Máx.	Limite Min.	Limite Máx.
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	48,00	40,00	55,00	43,00	53,00	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	26,70	22,00	32,00	22,70	30,70	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	19,00	15,00	25,00	15,00	23,00	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	14,50	10,00	18,00	10,50	18,00	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	11,00	8,00	13,00	8,00	13,00	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	8,40	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	6,10	4,00	7,00	5,10	7,00	-1,00%	1,00%

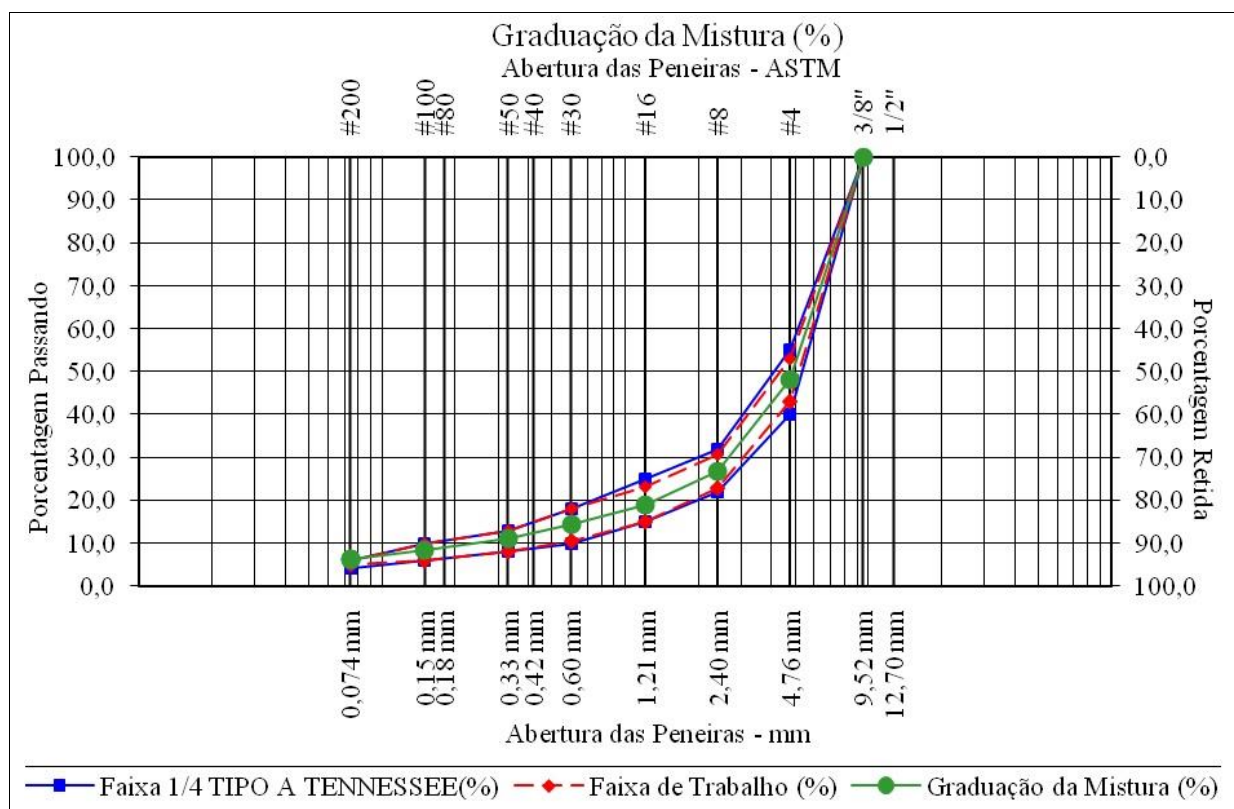


Figura 4.5: Composição e graduação da mistura de agregados – Projeto Calógeras RAUD – trecho experimental

Tabela 4.6: Graduação da mistura de agregados – projeto CA

Composição da mistura seca (%)								
Brita 3/4"			Pedrisco 3/8"		3/16" ao fundo		CAL CH-1	
23			26		50		1	
Peneira		Graduação da Mistura (%)	Faixa D DER/PR ES-P 15/05 (%)		Faixa de Trabalho (%)		Tolerância (%)	
Nº	Abertura		Limite Min.	Limite Máx.	Limite Min.	Limite Máx.	Limite Min.	Limite Máx.
¾"	19,10 mm	100,00	100,0	100,0	100,0	100,0	-7,0%	7,0%
½"	12,70 mm	83,30	80,0	100,0	80,0	90,3	-7,0%	7,0%
3/8"	9,52 mm	77,70	70,0	90,0	70,7	84,7	-7,0%	7,0%
#4	4,76 mm	55,20	50,0	70,0	50,2	60,2	-5,0%	5,0%
#10	2,00 mm	36,50	33,0	48,0	33,0	41,5	-5,0%	5,0%
#40	0,42 mm	18,60	15,0	25,0	15,0	23,6	-5,0%	5,0%
#80	0,18 mm	12,30	8,0	17,0	9,3	15,3	-3,0%	3,0%
#200	0,07 mm	7,40	4,0	10,0	5,4	9,4	-2,0%	2,0%

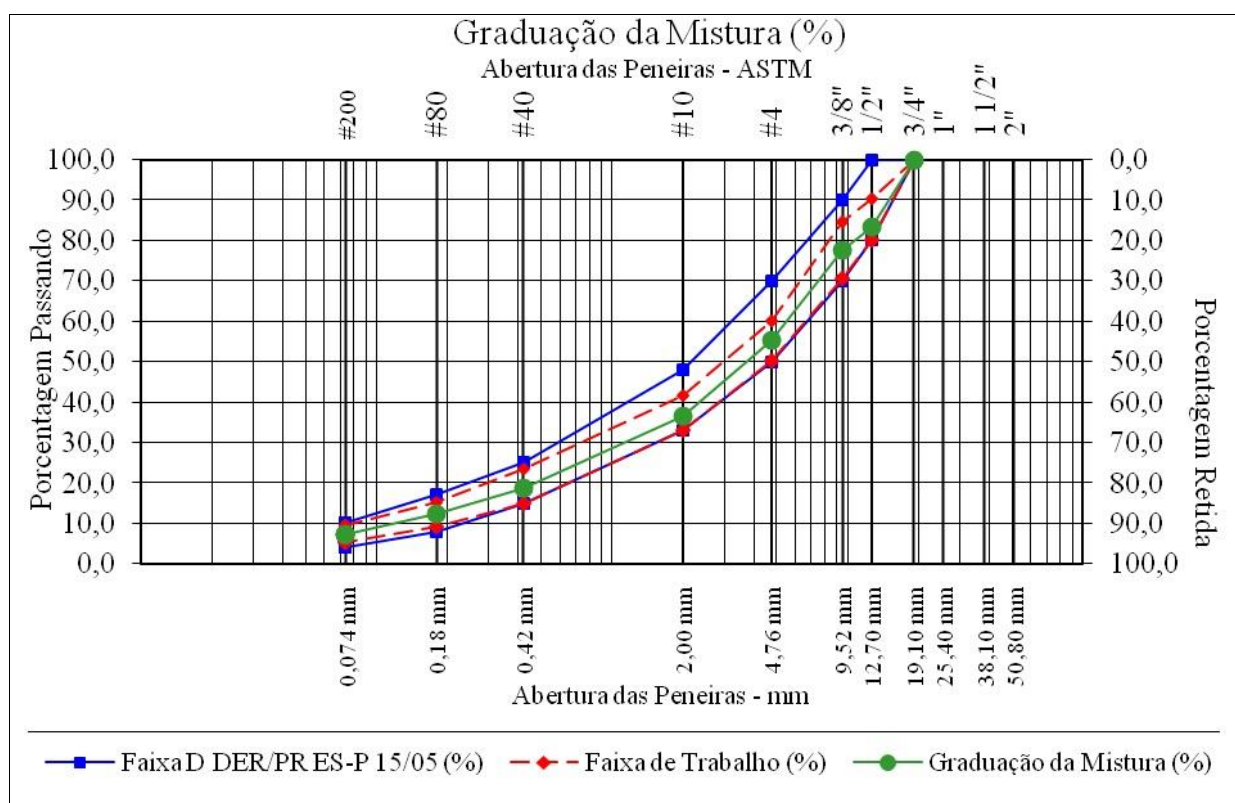


Figura 4.6: Graduação da mistura de agregados – Projeto Calógeras CA– trecho experimental

#### 4.4 PROJETOS DE DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para a dosagem das misturas asfálticas foi adotado o procedimento do ensaio Marshall (DNER ME – 043/95), sendo a compactação dos corpos de prova (CPs) realizada com 75 golpes por face para o projeto CA. Para o projeto RAUD foram adotados 50 golpes por face a fim de evitar a quebra excessiva de agregados, conforme recomenda a metodologia norte-americana para esse tipo de mistura. As temperaturas de mistura e compactação do CPs foram determinadas para o AMP 55/75-E, conforme apresentados na Tabela 3.5 e Figura 3.1b. Os CPs foram armazenados previamente em estufa por 2 horas, na temperatura estabelecida para a compactação das misturas de CA e do RAUD, visando à adequada absorção do ligante.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram a representação gráfica dos parâmetros do estudo Marshall em função de cinco teores de ligante predefinidos, bem como os teores de ligante asfáltico selecionados para ambos os projetos (RAUD e CA). A seleção do teor de ligante de projeto para o RAUD (5,2%) foi baseada no estudo de dosagem descrito no item 3.3 desta Tese.



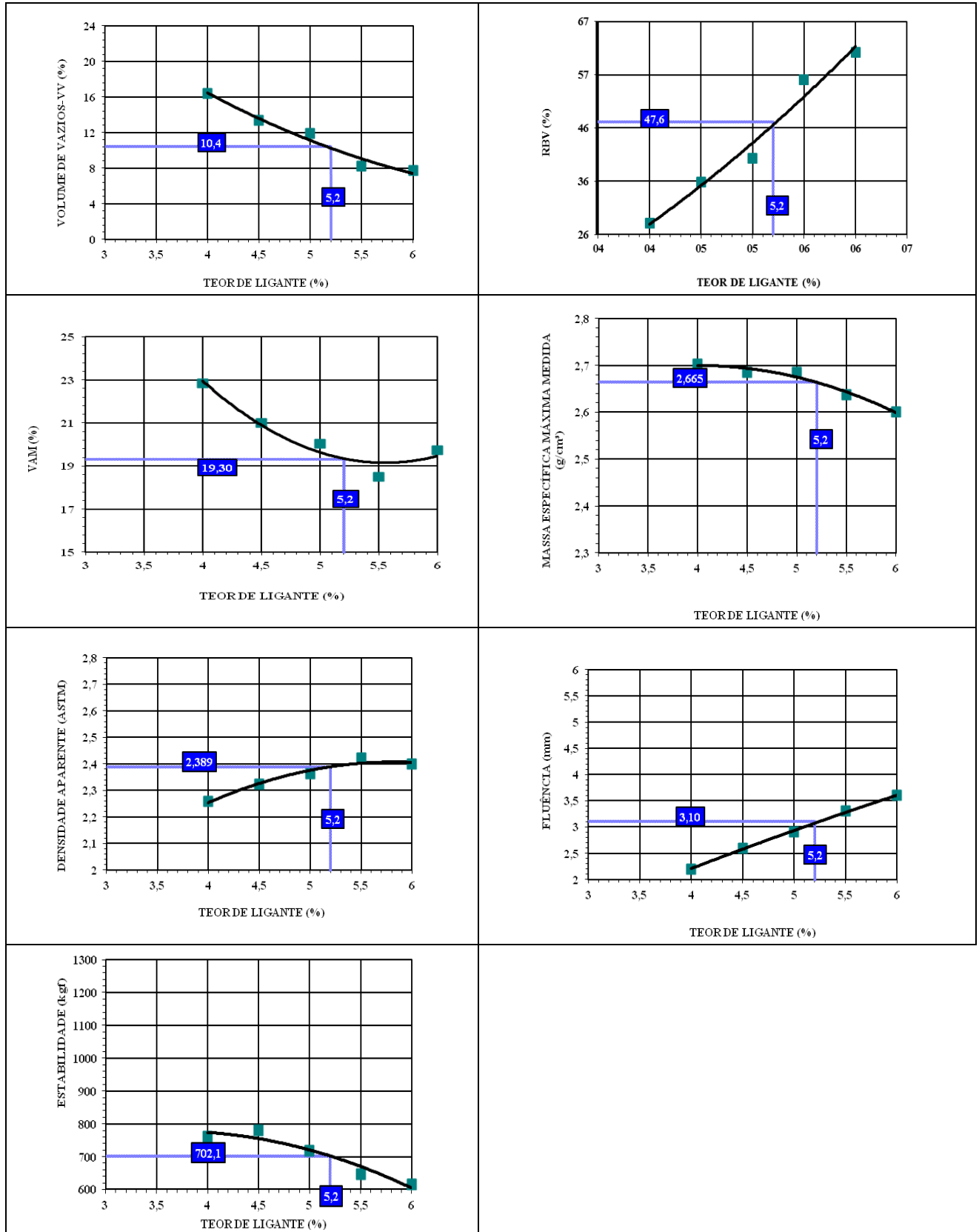


Figura 4.7: Parâmetros do estudo Marshall – Projeto Calógeras RAUD – trecho experimental

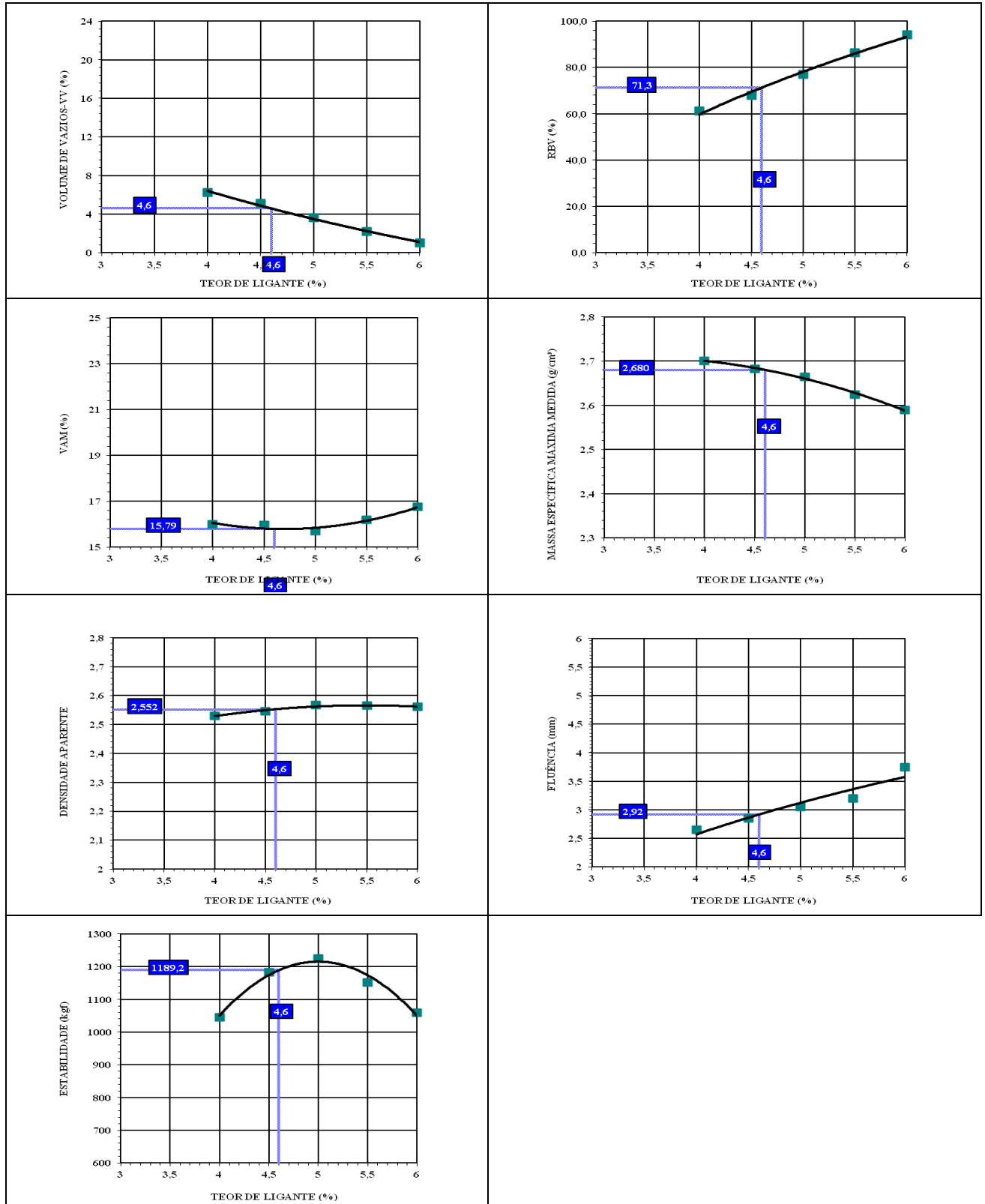


Figura 4.8: Parâmetros do estudo Marshall – Projeto Calógeras CA – trecho experimental

#### 4.4.1 Avaliação da existência do contato grão-grão da mistura

A existência do contato grão - grão da mistura asfáltica da Pedreira Calógeras foi verificada no teor de ligante de projeto (5,2%) do RAUD e obtida pelas expressões 2.1, 2.2 e 2.3. A fração do agregado graúdo ( $P_{CA}$ ) da equação foi definida pela porção relativa à mistura total de agregados retidos na “peneira de quebra”, sendo esta definida como a menor abertura de peneira que retém pelo menos 10% da graduação dos agregados, conforme estabelece a NCHRP (2011), exemplificada na revisão bibliográfica deste estudo (Figura 2.4).

A Tabela 4.7 apresenta os resultados da verificação de existência do contato grão-grão da mistura asfáltica no teor de ligante de projeto (5,2%) referente ao RAUD – Pedreira Calógeras.

Tabela 4.7: Verificação do contato grão-grão da mistura asfáltica no teor de ligante de projeto (5,2%) do RAUD - Pedreira Calógeras

	<i>Normas</i>	<i>Calógeras Tennessee</i>
Ys (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 153/97	1,649
Yw (g/cm <sup>3</sup> )		0,998
Gca (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 81	2,885
Gmb	DNER-ME 117	2,389
Pca (%)		73,30%
VCA drc (%)		42,73%
VCA mix (%)		39,30%
VCA drc - VCA mix (%)		3,43%

Legenda:

Ys (g/cm<sup>3</sup>): massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado

Yw (g/cm<sup>3</sup>): massa específica da água 25°C: 0,998 g/cm<sup>3</sup>

Gca (g/cm<sup>3</sup>): massa específica aparente da fração graúda

Gmb: massa específica aparente da mistura compactada

Pca%: % da fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura.

VCA drc (%): vazios da fração graúda do agregado compactado seco

$$VCA_{drc} = \frac{(Gca \cdot Yw - Ys)}{Gca \cdot Yw}$$

VCA mix (%): vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada

$$VCA_{mix} = \frac{100 - (Gmb - Pca)}{Gca}$$

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.7 verifica-se a existência do contato grão-grão ( $VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC}$ ) para as misturas asfáltica estudada no teor de ligante de projeto (5,2%) do RAUD – Pedreira Calógeras.

#### 4.4.2 Avaliação da sensibilidade ao escorrimento

A Figura 4.9 apresenta os resultados da avaliação da sensibilidade ao escorrimento do ligante para o projeto RAUD. O procedimento foi realizado segundo as normas ASTM D 6390 ou AASHTO T 305/97 com as alterações descritas no item 3.3.2 do programa experimental de laboratório da pesquisa. O valor máximo admitido para ensaio foi de 0,1%, conforme recomendações técnicas norte-americanas (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004 e NCHRP, 2011).

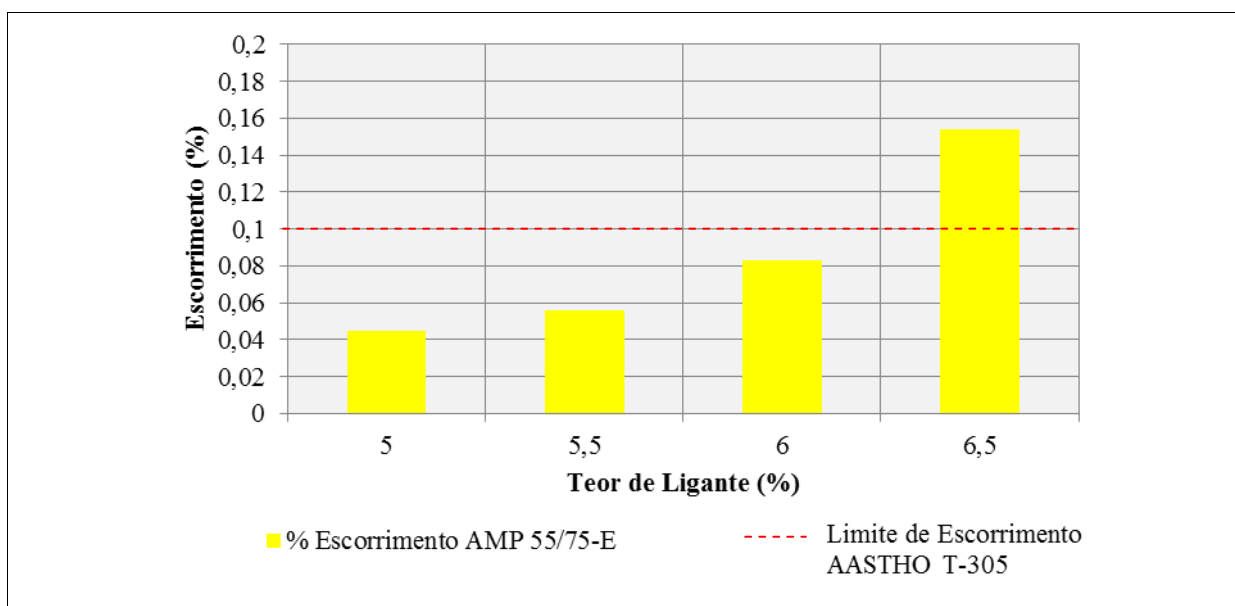


Figura 4.9: Sensibilidade ao escorrimento (%) x teor de ligante (%) – projeto RAUD do trecho experimental

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 4.9, verifica-se que o escorrimento do ligante aumenta à medida que os teores de AMP 55/75-E são incrementados. Portanto, o teor máximo de ligante admitido para o projeto RAUD foi de 6,0%.

### 4.4.3 Avaliação mecânica das misturas asfálticas

Este tópico apresenta os resultados e discussões do comportamento mecânico das misturas asfálticas para os projetos de dosagem da seção-teste em RAUD e da seção de referência em CA. As seguintes avaliações foram realizadas:

- e) resistência à tração por compressão diametral e ao dano por umidade induzida;
- f) resistência ao desgaste por abrasão Cantabro;
- g) e estabilidade mecânica por simulador LPC.

#### 4.4.3.1 Resistência à tração por compressão diametral e ao dano por umidade induzida

O ensaio de resistência à tração foi realizado com base na norma NBR 15087 (ABNT, 2004c). Para a avaliação da sensibilidade à ação deletéria da água, os CPs foram separados em dois grupos; um dos grupos foi submetido a um condicionamento a 60°C, 24 horas em água e outro não. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15617 (ABNT, 2011) com as modificações descritas no item 3.3.3.2 do programa experimental de laboratório. A resistência à tração dos dois grupos de CPs foi determinada e a razão de resistência à tração retida (RRT), dos CPs condicionados e não condicionados foi calculada.

Em geral, valores mínimos de RRT entre 70 e 80% demonstram um comportamento satisfatório da mistura asfáltica ultra delgada ao dano por umidade induzida (CALTRANS, 2003a; TDOT, 2004; TxDOT, 2004 e NCHRP, 2011). Para as misturas densas (CA) e descontínuas do tipo SMA, o limite mínimo para a RRT também tem sido adotado 70%, segundo a especificação AASHTO MP 8-01 (BERNUCCI *et al.*, 2008). O autor sugere o limite mínimo de 80% para os resultados de RRT, considerando a exclusão do ciclo de congelamento / descongelamento do ensaio.

A Figura 4.10 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral via seca, via úmida (24h, 60°C) e ao dano por umidade induzida (RRT) para os cinco teores de ligante estabelecidos no projeto de dosagem do RAUD. Verifica-se resultados satisfatórios de resistência à tração seca e ao dano por umidade induzida da mistura, com valores superiores

aos mínimos (0,65 MPa e 70,0%, respectivamente), segundo norma brasileira DNIT 031/2006 – ES para o concreto asfáltico (DNIT, 2006b), para teores entre 5,0 e 6,0% de AMP 55/75-E.

A Figura 4.11 apresenta os resultados comparativos de resistência à tração por compressão diametral, via seca para os cinco teores de ligante estabelecidos nos projetos de dosagem do RAUD e do CA. Verifica-se que os valores de resistência à tração do RAUD são ligeiramente superiores aos do CA nos teores estudados e praticamente da mesma magnitude para ambos os projetos quando o teor de AMP 55/75-E é de 5,0 %.

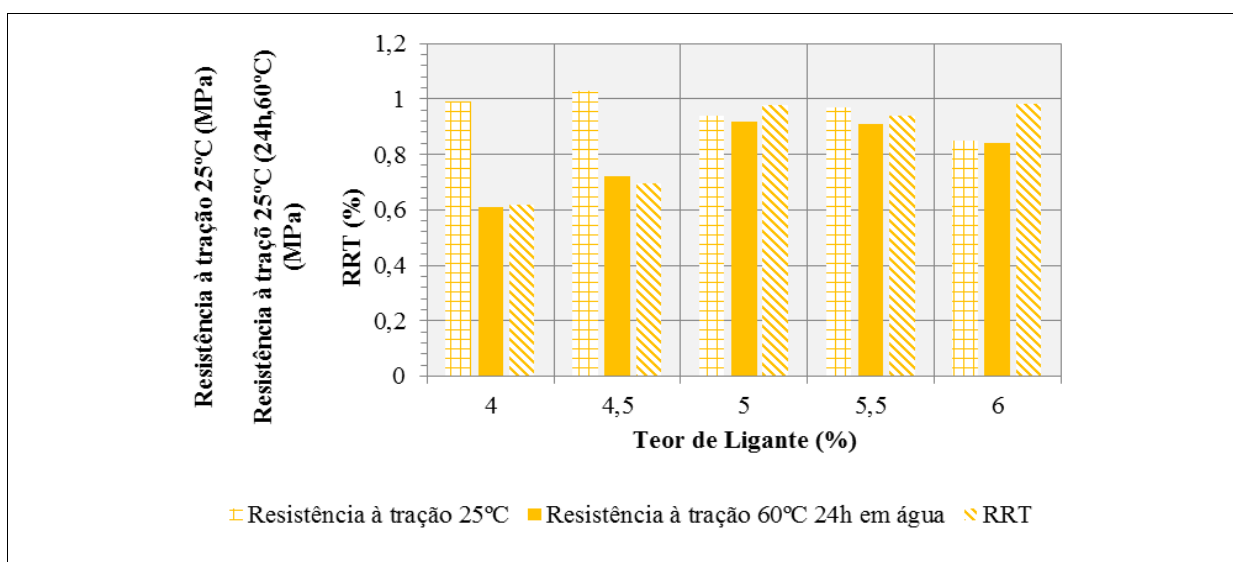


Figura 4.10: Resistência à tração via seco, úmida e razão de resistência à tração retida (RRT) para diversos teores de ligante.

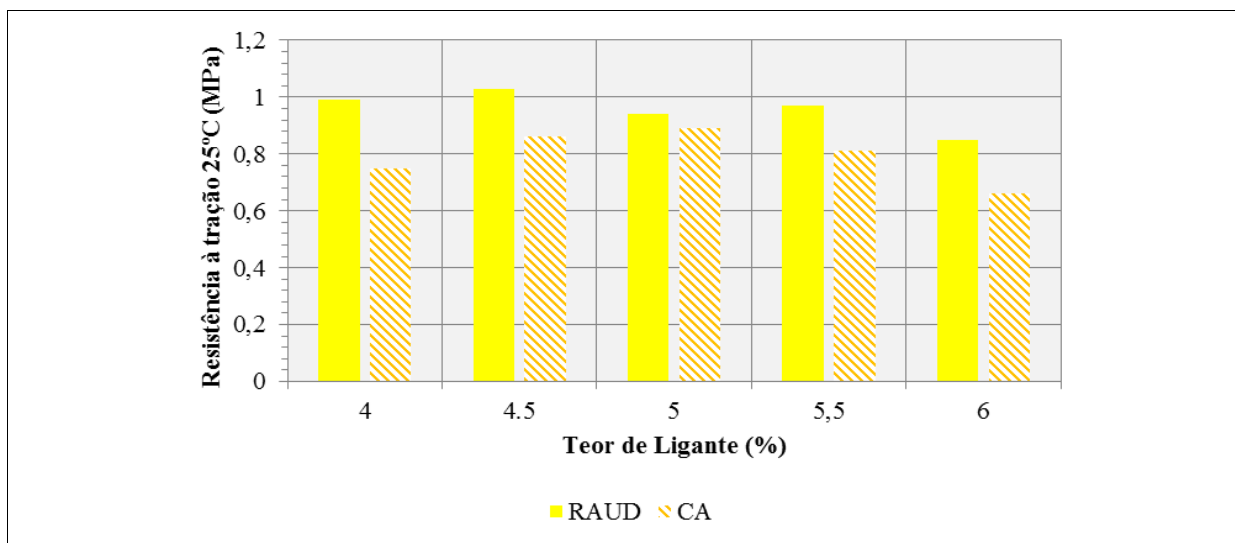


Figura 4.11: Avaliação da resistência à Tração a 25°C via seca (MPa) x teor de Ligante (%) para o projeto Calógeras RAUD e CA

#### 4.4.3.2 Resistência ao desgaste por abrasão Cantabro

Apesar da norma NBR 15140 (ABNT, 2004d) estabelecer somente o método via seco, o procedimento de ensaio também foi realizado em corpos de prova (CPs) previamente submersos em água por 24 h a 60°C (método via úmida). O ensaio realizado em CPs condicionados em água visa avaliar o efeito combinado do desgaste (perda da coesão) e da suscetibilidade da mistura asfáltica ultra delgada à ação da água (adesividade). O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento descrito no item 3.3.3.3 do programa experimental de laboratório.

A Figura 4.12 apresenta os resultados de perda por desgaste Cantabro via seco e via úmida da mistura ultra delgada em função do teor de ligante AMP 55/75-E.

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 4.12 verifica-se:

- a) a perda por desgaste Cantabro é maior à medida que o teor de ligante da mistura asfáltica é reduzido;
- b) para o teor de ligante correspondente a 5,5% os resultados de perda por desgaste Cantabro, via seco e via úmida, são baixos e praticamente da mesma

magnitude, demonstrando uma resistência satisfatória da mistura à ação da água.

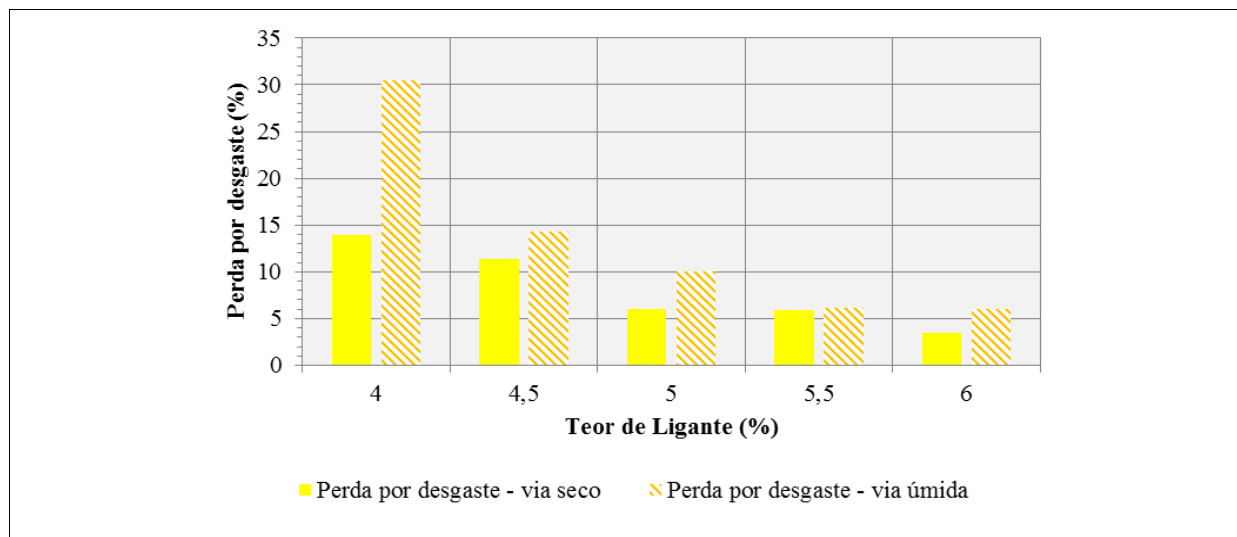


Figura 412: Desgaste Cantabro via seco e via úmida – Projeto Calógeras RAUD – trecho experimental

#### 4.4.3.3 Avaliação da estabilidade mecânica e da durabilidade da macrotextura superficial

A descrição e composição dos materiais, as temperaturas de usinagem e de compactação da mistura, bem como os demais dados referentes ao projeto da seção-teste do RAUD foram fornecidos ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP para a avaliação da estabilidade mecânica e da durabilidade da macrotextura superficial, através do ensaio de deformação permanente em trilha de roda.

A Tabela 4.8 apresenta a composição dos materiais da mistura asfáltica ultra delgada para a confecção das placas de laboratório nos teores de 5,5 e 5,0% de AMP 55/75-E, respectivamente. O objetivo do ensaio foi avaliar a sensibilidade do RAUD ao afundamento em trilha de roda, praticamente na faixa de tolerância permitida ( $\pm 0,3\%$ ) para o teor de ligante de projeto de 5,2%.

Tabela 4.8: Composição da mistura asfáltica para teste no simulador LPC



<i>Material</i>	<i>Calógeras</i>
	% na composição
Pedrisco 3/8"	64
3/16" ao fundo	35
Cal CH-I	1
<i>Ensaio</i>	<i>Teores de ligante asfáltico (%)</i>
Deformação permanente em trilha de roda	5,5
	5,0*

(\*) teor de ligante da mistura para a avaliação da durabilidade da macrotextura

Os ensaios de deformação permanente em trilha de roda foram realizados no simulador de tráfego tipo LPC francês (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*). Para a mistura asfáltica foram moldadas duas placas com 500mm de comprimento, 180 mm de largura e 50 mm de espessura, conforme estabelece o procedimento da norma francesa NF P 98-253-1 “*Déformation Permanente Mélanges Hydrocarbonés*” (AFNOR, 1991a).

As placas de mistura asfáltica foram compactadas por amassamento, simulando a compactação de campo, por meio de um equipamento denominado “*mesa compactadora tipo LPC*” (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*), conforme especificação francesa NF P 98-250-2 “*Preparation Mélanges Hydrocarbonés*” (AFNOR, 1991b). A utilização de uma superfície metálica de apoio para recobrir toda a área superficial da placa permitiu uma compactação uniforme e a densidade obtida foi semelhante à densidade do estudo Marshall, com todo o material usinado acondicionado no molde.

Conforme já comentado, a finalidade principal do ensaio (conduzido até 3.000 ciclos) não é propriamente o de avaliar a deformação permanente em trilha de roda, mas verificar se a estabilidade mecânica do revestimento delgado no teor de ligante estabelecido para o projeto, não compromete suas características de desempenho funcional.

A durabilidade da macrotextura é de fundamental importância para a manutenção dos índices de segurança do pavimento. Embora a norma francesa NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001) estabeleça a avaliação somente “*in situ*”, foi realizada a verificação adicional da durabilidade da macrotextura superficial das placas moldadas em laboratório, através do ensaio de deformação permanente no Simulador de Tráfego. Para tanto, foi medida a HS (*Hauterau Sable* – Altura Média de Areia) ou PMT (*Profondeur Moyenne de Texture* – Profundidade

Média da Textura) pelo método da mancha de areia NF P 98-216-1 (AFNOR, 1992), NF EN 13036-1 (AFNOR, 2002a) ou ASTM E 965 (ASTM, 2001c).

Segundo Brosseau (2005), a relação entre os valores finais e iniciais de HS ou PMT, determinados, respectivamente, após e antes do ensaio de deformação permanente (3000 ciclos a 60°C), deve ser igual ou superior a 0,5 ( $HS_{final} / HS_{inicial} \geq 0,5$ ). Em outras palavras, as placas moldadas em laboratório após o ensaio devem conservar no mínimo 50% de sua macrotextura original.

A redução da macrotextura superficial pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\left[ 1 - \left( \frac{HS_{final}}{HS_{inicial}} \right) \right] \cdot 100 \leq 50$$

(4.3)

A Figura 4.13 (a) e (b) mostra o aspecto final das placas após a verificação da sua estabilidade mecânica a 60°C, com agregados da pedra Calógeras nos teores de 5,5 e 5,0% de AMP 55/75-E.

A Figura 4.14 (a) e (b) ilustra o aspecto da macrotextura superficial das placas, antes e após o ensaio de deformação permanente (3.000 ciclos a 60°C), quando submetidas ao ensaio de mancha de areia, com agregados da pedra Calógeras no teor de 5,0% de AMP 55/75-E.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados de deformação permanente após 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos de aplicação da carga do simulador de tráfego LPC para as placas do RAUD moldadas nos teores de 5,5 e 5,0% de AMP 55/75-E. As representações gráficas dos resultados dos ensaios laboratoriais para as placas do RAUD moldadas nos teores de 5,5 e 5,0% de AMP 55/75-E, com seus ciclos de carga e porcentagens de afundamento em trilha de roda, são apresentadas nas Figuras 4.15 e 4.16, respectivamente.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados referentes a avaliação da durabilidade da macrotextura, calculado pela expressão 4.3, para as placas moldadas do RAUD com agregados da pedra Calógeras no teor de 5% de AMP 55/75-E.

Para fins comparativos, a Figura 4.17 apresenta a média dos resultados de deformação permanente após 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos de aplicação da carga do simulador de tráfego LPC para duas placas de concreto asfáltico moldadas no teor de projeto de 4,6% de AMP 55/75-E.

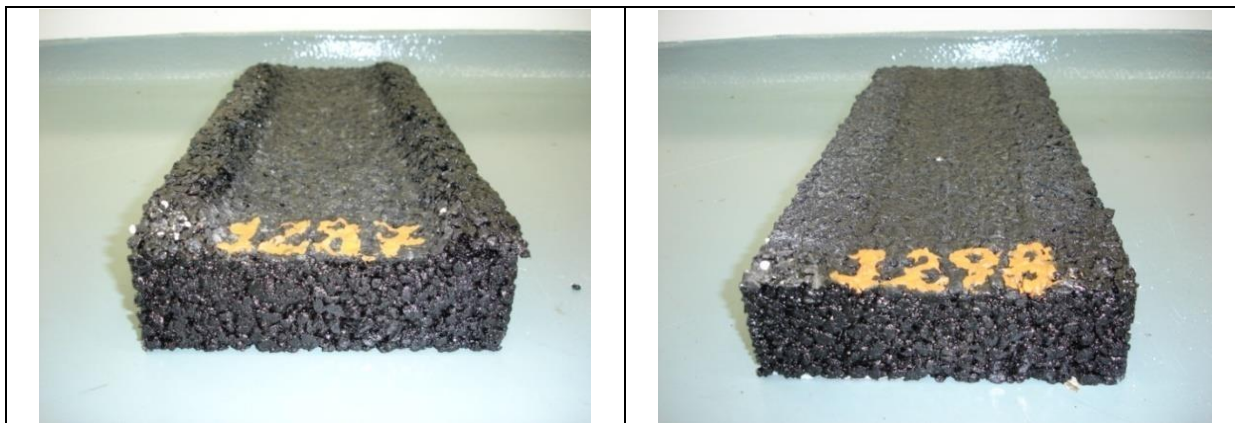


Figura 4.13 (a) Projeto RAUD – 5,5% de AMP 55/75-E

Figura 4.13 (b): Projeto RAUD – 5,0% de AMP 55/75 – E



Figura 4.14 (a): Avaliação da macrotextura – placa virgem

Figura 4.14 (b): Avaliação da macrotextura – placa após 3.000 ciclos

Tabela 4.9: Valores de deformação permanente do RAUD para 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos

Pedreira	Teores (%)	% deformação permanente em trilha de roda			
		N° de ciclos de simulação de tráfego			
		1.000	3.000	10.000	30.000
Calógeras	5,5	2,81	4,02	5,96	8,54
	5,0	2,99	3,91	5,24	6,85

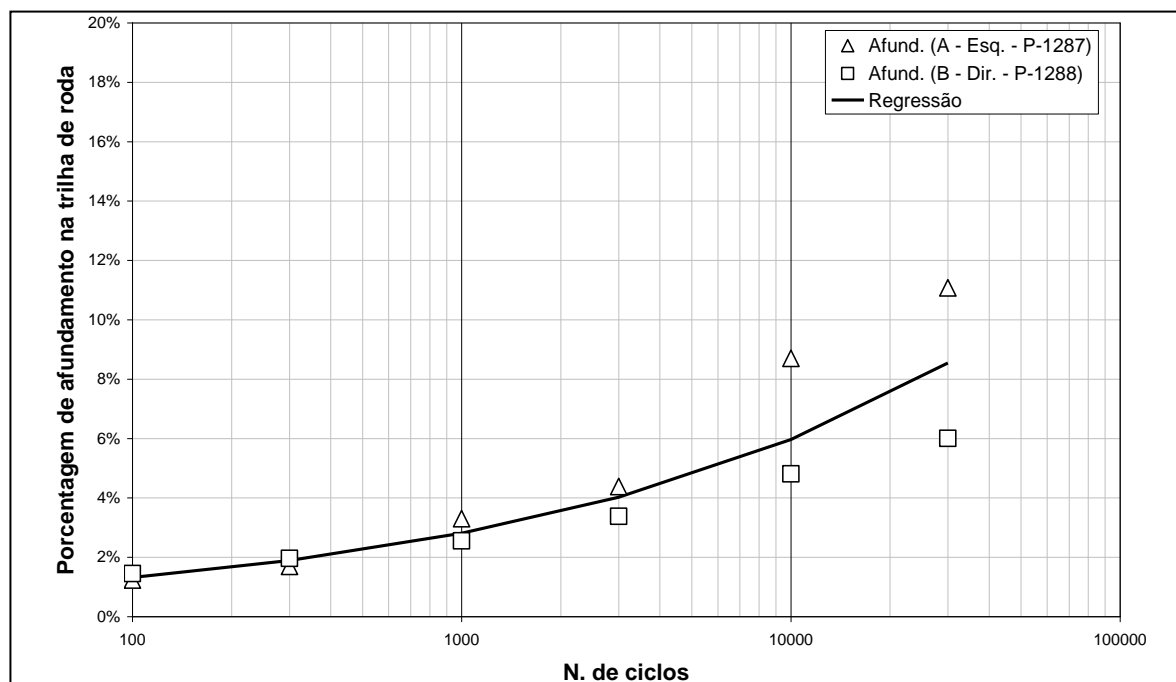


Figura 4.15: Deformação permanente (%) do RAUD no teor de 5,5% de AMP55/75-E

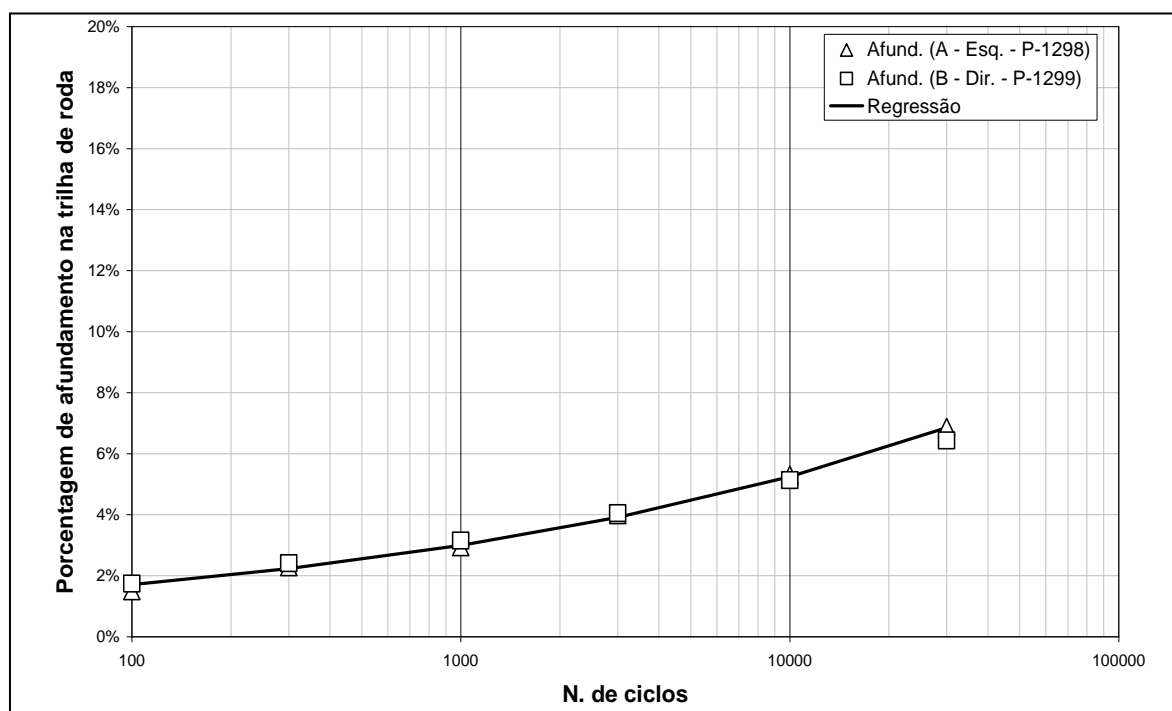


Figura 4.16: Deformação permanente (%) do RAUD no teor de 5,0% de AMP 55/75-E

Tabela 4.10: Avaliação da durabilidade da macrotextura do RAUD no simulador de tráfego em placas moldadas no teor de 5,0 % de AMP 55/75-E

Placa	Determinação do n° de ciclos	Identificação	Diâmetro (mm)			Dmédio	Área (mm²)	Hs (mm)
			D1	D2	D3			
Placa 1	0	E	120	120	120	120	11309	1,11
	3.000		90	175			15750	0,79
	0	C	120	115	120	118,33	10997	1,14
	3.000		95	180			17100	0,73
	0	D	113	120	125	119,33	11184	1,12
	3.000		90	180			16200	0,77
Placa 2	0	F	120	125	125	123,33	11946	1,05
	3.000		95	175			16625	0,75
	0	G	120	120	125	121,66	11626	1,08
	3.000		90	160			14400	0,87
Média geral	0						1,1	1,1
	3.000						0,8	0,8
Redução (%)			29					

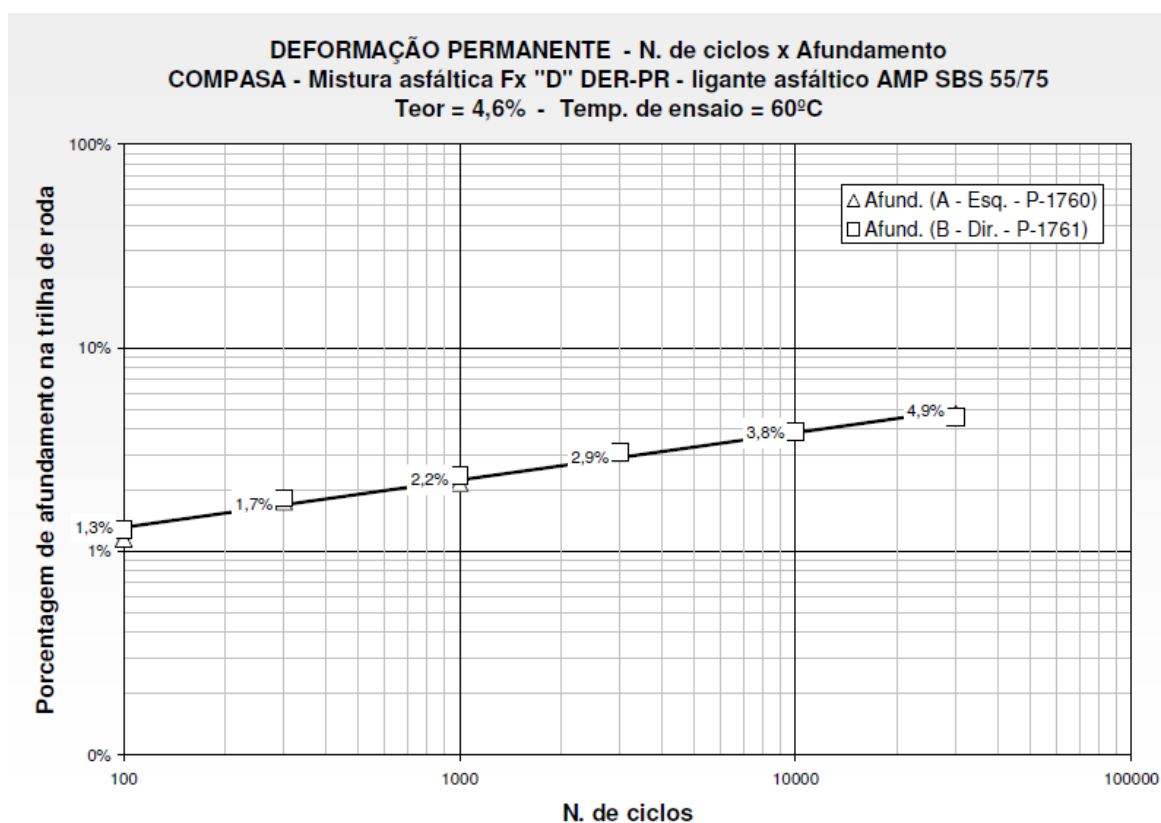


Figura 4.17: Deformação permanente (%) do CA no teor de 4,6% de AMP 55/75-E

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.9 e Figuras 4.15 e 4.16, verifica-se que os valores de 4,02% e 3,91%, referentes à deformação permanente do RAUD a 60°C, 3.000 ciclos, para a mistura composta por agregados da pedra Calógeras nos teores de 5,5%

e 5,0 % de AMP 55/75-E, respectivamente, são inferiores ao limite máximo de 15% determinado para o revestimento delgado do tipo BBTM 0/10 Classe 1, segundo a norma francesa NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001).

Observa-se também que o valor de 8,54%, referente à deformação permanente a 60°C, 30.000 ciclos, diminuiu para 6,85% quando o teor de ligante da mistura ultra delgada foi reduzido de 5,5 para 5,0 %, respectivamente. Esse resultado de deformação permanente (6,85%) no teor de 5,0% de AMP 55/75-E para o RAUD é superior ao resultado de 4,9%, referente à deformação permanente a 60°C, 30.000 ciclos para as placas do concreto asfáltico moldadas no teor de projeto de 4,6% de AMP 55/75-E (Figura 4.17), bem como ao limite máximo de 5,0%, estabelecido pelas diretrizes de dimensionamento europeias do Grupo COST 333, para as misturas asfálticas densas sob tráfego pesado (*fort*) - acima de 2.000 veículos comerciais diários, com eixo traseiro carregado de no mínimo 5 toneladas.

Na prática, o RAUD é aplicado em espessuras delgadas entre 20 a 30 mm, sobre uma superfície previamente selada com emulsão asfáltica elastomérica. Conforme já observado, uma vez que essas camadas trabalham na estrutura do pavimento de forma consolidada, estima-se que o desempenho mecânico da mistura no campo deve ser superior ao verificado em laboratório.

Portanto, na etapa de dosagem da mistura, recomenda-se a avaliação adicional de sua estabilidade mecânica no simulador de tráfego LPC. Para melhor reproduzir o que ocorre na prática, a mistura asfáltica ultra delgada deverá ser moldada na espessura de 25 mm sobre um substrato constituído por uma placa de mistura asfáltica densa (CA) na espessura de 25 mm. A mistura asfáltica densa (CA) do substrato deve ter boa resistência aos afundamentos em trilha de roda para uma avaliação adequada da estabilidade mecânica e da durabilidade da macrotextura superficial do RAUD. A pintura de ligação entre placas de CA e RAUD deve ser executada com emulsão asfáltica elastomérica, cuja taxa e demais requisitos técnicos devem estar previstos no projeto do RAUD.

Pela análise dos valores da Tabela 4.10 verifica-se que a redução média da macrotextura superficial foi de 29%, e, portanto, inferior ao limite máximo de 50 % estabelecido na expressão 4.3.

Os resultados apresentados indicam que a mistura, dosada com agregados da pedra Calógeras no teor de 5,0 % de AMP 55/75-E, tende a ter um bom comportamento sob tráfego intenso/pesado no que se refere à manutenção da textura superficial e de aderência pneu/pavimento. Entretanto, os resultados no teor de ligante de projeto de 5,2% só poderão ser conclusivos mediante a avaliação da macrotextura do trecho experimental ao longo do período de seu monitoramento.

A norma NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001) determina que a avaliação da durabilidade da macrotextura superficial para esse tipo de mistura deve ser realizada somente “in situ” através do ensaio da mancha de areia. Os valores mínimos de HS ou PMT devem ser 0,7 e 0,9 mm para o BBTM 0/6 e 0/10, respectivamente. A título de comparação, as misturas do tipo concreto asfáltico (CA) não devem apresentar valores de HS inferiores a 0,6 mm, segundo o DNIT (2006).

#### 4.4.4 Resultados dos estudos de dosagem das misturas asfálticas

A Tabela 4.11 apresenta os valores limites para os requisitos técnicos do RAUD, sugeridos no item 3.4 do programa experimental de laboratório, e os resultados dos ensaios correspondentes ao projeto de dosagem para a execução da seção-teste do trecho experimental, conforme a combinação de materiais e graduações discriminadas na Tabela 4.2.

A Tabela 4.12 apresenta os valores limites para os requisitos técnicos, segundo a especificação de serviço do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, para concreto asfáltico com asfalto polímero ES-P 15/2005 (DER/PR, 2005), e os resultados dos ensaios correspondentes ao projeto de dosagem para a execução da seção de referência do trecho experimental, conforme a combinação de materiais e graduações discriminadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.11: Propriedades finais da mistura asfáltica – projeto RAUD para o trecho experimental

<i>Métodos</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Valores Especificados</i>		<i>RAUD</i>
		<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	
DNER ME 043	Teor de ligante de projeto – Pb (%)	-	-	5,2
Equação 2.6	Espessura do filme de ligante (µm)	9,0	-	9,0
DNER ME 043	Volume de vazios – VV (%)	-	-	10,4
DNER ME 043	Relação betume/vazios – RBV (%)	-	-	47,6
DNER ME 043	Vazios do agregado mineral – VAM (%)	-	-	19,3

Investigação de campo e laboratório sobre revestimento asfáltico ultra delgado

Métodos	Ensaio	Valores Especificados		RAUD
		Mín.	Máx.	
NBR-15619	Massa específica máxima medida (RICE) (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	2,665
NBR-15573	Densidade aparente	-	-	2,389
-	Relação fíler/ligante	-	-	1,3
NBR-15087	Resistência à tração 25°C (MPa)	0,65 <sup>3</sup>	-	0,97
NBR-15087	Resistência à tração 60°C, 24h, em água (MPa)	-	-	0,90
NBR-15617	Dano por umidade induzida RRT (%)	80,0 <sup>3</sup>	-	92,78
NBR-15140	Desgaste por abrasão Cantabro via seca (%)	-	-	6,3
NBR-15140	Desgaste por abrasão Cantabro via úmida (%)	-	-	6,8
AASTHO T-305	Sensibilidade ao escorrimento (%)	-	0,10	0,02
NF P 98-253-1	Estabilidade mecânica -simulador LPC (%)	-	15,0	4,0 <sup>1</sup>
NF P 98-253-1	Redução da macrotextura superficial (%)	-	50,0	29,0 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> valor médio dos resultados determinados para 5,0 e 5,5 % de AMP 55/75-E

<sup>2</sup> valor determinado para o teor de 5,0 % de AMP 55/75-E

<sup>3</sup> limites mínimos sugeridos pelo autor

Tabela 4.12: Propriedades finais da mistura asfáltica - projeto CA para o trecho experimental

Métodos	Ensaio	Valores especificados		CA
		Mín.	Máx.	
DNER ME 043	Teor de ligante de projeto -Pb (%)	-	-	4,6
DNER ME 043	Volume de vazios VV (%)	3,0	5,0	4,6
DNER ME 043	Relação betume/vazios - RBV (%)	70,0	82,0	71,3
DNER ME 043	Vazios do agregado mineral - VAM (%)	15,0	-	15,8
ABNT/NBR 15619	Densidade máxima medida (RICE)	-	-	2,680
DNER ME 043	Densidade aparente	-	-	2,552
DNER ME 043	Estabilidade 60°C (kgf)	800,0	-	1189,2
DNER ME 138	Resistência a tração 25°C (MPa)	0,65	-	0,87
DNER ME 043	Fluência 60°C (mm)	2,0	-	2,92
Instituto do Asfalto	Relação fíler/ligante	0,8	1,6	1,6

As seguintes observações podem ser feitas a partir da análise dos resultados relacionados nas Tabelas 4.11 e 4.12:



- a) o teor de ligante de projeto (Pb) de 5,2% foi selecionado para o RAUD de modo a assegurar a espessura mínima do filme de asfalto (9,0  $\mu\text{m}$ ), determinada através da Equação 2.8, e atender os valores limites estabelecidos no estudo experimental de laboratório, para a resistência à tração por compressão diametral, bem como de resistência ao dano por umidade induzida (RRT), apresentados na Tabela 3.25;
- b) para o RAUD, as densidades aparentes, massas específicas máximas medidas e os parâmetros volumétricos Marshall – Volume de vazios (Vv), Relação betume-vazios (RBV) e Vazios do agregado mineral (VAM), foram obtidos no teor de ligante de projeto (5,2 %), conforme a representação gráfica do estudo de dosagem apresentada na Figura 4.7;
- c) para o RAUD, considerando a análise conjunta dos resultados do projeto de dosagem (trecho experimental) e das misturas asfálticas descontínuas estudadas (programa experimental de laboratório) são propostas as seguintes faixas de valores limites experimentais para os parâmetros volumétricos Marshall e de relação fíler-ligante asfáltico:
- (10 %  $\leq$  Vv  $\leq$  18 %), (33 %  $\leq$  RBV  $\leq$  65 %) e (18 %  $\leq$  VAM  $\leq$  28 %)
- (0,9  $\leq$  relação fíler/ligante  $\leq$  1,4)
- d) para o RAUD, os resultados apresentados mostram que o escorrimento do ligante aumenta à medida que os teores de AMP 55/75-E são incrementados e, que no teor de ligante de projeto de 5,2% o escorrimento é inferior ao limite máximo de 0,1%;
- e) o valor médio dos resultados de estabilidade mecânica (afundamento em trilha de roda a 60°C, 3.000 ciclos), calculado para teores de ligante de 5,0 e 5,5%, é inferior ao limite máximo de 15% estabelecido para o RAUD (Tabela 4.11);
- f) comparando os valores de resistência à tração por compressão diametral a 25°C, determinados nos teores de ligante AMP 55/75-E de projeto, verifica-se que o resultado obtido para o RAUD é ligeiramente superior ao do CA.

## 4.5 PROCESSO CONSTRUTIVO DO RAUD

### 4.5.1 Equipamentos

De modo geral os principais equipamentos utilizados para a produção e aplicação do RAUD foram similares aos utilizados para as misturas asfálticas convencionais tipo CA, a saber:

- a) usina de asfalto contra fluxo MAGNUM 80 fabricada pela empresa Terex Road *Building*. A usina possui controles eletrônicos individuais de pesagem por microcomputador da vazão de ligante, de cada silo de agregados, do fíler mineral, bem como das temperaturas dos materiais e da mistura usinada.
- b) Vibro acabadora para espalhamento da mistura asfáltica com dispositivo eletrônico para controle de nível, fabricada pela empresa Terex Road *Building*;
- c) rolos lisos duplo tandem com peso total de 8 a 12 toneladas;
- d) caminhão espargidor para aplicação da membrana elástica de impermeabilização/ligação com emulsão asfáltica;
- e) caminhão distribuidor de agregados e
- f) caminhões basculantes para transporte da mistura asfáltica

As Figuras 4.18 a 4.20 ilustram os principais equipamentos utilizados pela Compasa do Brasil para a produção e aplicação do RAUD no trecho experimental da rodovia PR-092.



Figura 4.18: Usina de asfalto - MAGNUM 80 utilizada no trecho experimental



Figura 4.19: Acabadora para espalhamento da mistura asfáltica utilizada no trecho experimental



Figura 4.20: Rolo liso duplo tandem utilizada no trecho experimental

## 4.5.2 Procedimentos construtivos

### 4.5.2.1 Camada impermeabilizante e de ligação

Não havendo a disponibilidade de uma vibro acabadora especial para a aplicação simultânea de emulsão asfáltica (membrana elástica de impermeabilização/ligação) e do RAUD, foi empregado o processo em duas etapas, utilizando equipamentos convencionais, para a execução do trecho experimental, conforme relatado por Brosseaud (1999).

Antes da aplicação da mistura asfáltica ultra delgada foi executada uma camada impermeabilizante e de ligação (membrana elástica com 5-6 mm de espessura) constituída de emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos (RR1C-E na taxa de 450 g/m<sup>2</sup> de ligante residual) recoberta por 2 a 3 l/m<sup>2</sup> de agregado limpo de graduação 4/6 mm. Alternativamente também pode ser aplicado um MRAF - faixa I da especificação de serviço DNIT 035/2005 - ES (DNIT, 2005), na taxa de 5 a 7 kg/m<sup>2</sup> imediatamente antes da aplicação da mistura asfáltica a quente. Esse tratamento de superfície visa preencher parte dos vazios do esqueleto mineral da mistura asfáltica a quente formando uma membrana elástica, coesiva e impermeável responsável pela adesão entre o novo revestimento e a camada subjacente. A execução da camada impermeabilizante e de ligação é ilustrada na Figura 4.21 (a) e (b).



Figura 4.21 (a): Execução da camada impermeabilizante e de ligação (membrana elástica) - aplicação da emulsão elastomérica



Figura 4.21 (b): Execução da camada impermeabilizante e de ligação (membrana elástica) - aplicação do agregado de graduação 4/6 mm

Observa-se que, na ocorrência de irregularidades longitudinais e/ou transversais da camada asfáltica subjacente, deve ser executada previamente uma camada de nivelamento com massa asfáltica de graduação fina a quente ou microrrevestimento asfáltico a frio para a correção das deformações da superfície do revestimento antigo e a selagem de fissuras existentes.

#### 4.5.2.2 Produção da mistura asfáltica para o RAUD

As temperaturas do ligante asfáltico elastomérico (AMP 55/75-E) para a mistura e compactação da massa asfáltica foram determinadas em função da relação temperatura-viscosidade. As temperaturas estabelecidas foram aquelas determinadas no projeto de dosagem da mistura (Tabela 3.5 e Figura 3.1b.). Os agregados foram aquecidos 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante asfáltico, sem ultrapassar a temperatura limite de 177°C.

Com base nesses critérios, foi estabelecida a temperatura de usinagem da mistura asfáltica entre 165 e 175°C. A mistura produzida apresentou aspecto homogêneo, sem segregação dos materiais (Figura 4.22) e de acordo com a composição granulométrica e os requisitos técnicos preconizados no projeto de dosagem.



Figura 4.22: Temperatura de usinagem da mistura asfáltica para o RAUD

#### 4.5.2.3 Transporte da mistura asfáltica para o RAUD

A mistura asfáltica foi transportada da usina ao ponto de aplicação em caminhões basculantes. A usina de asfalto e a frota de veículos de transporte operaram em sincronia, assegurando o fornecimento contínuo da mistura para evitar paradas da vibro acabadora sobre o novo revestimento.

A aderência da mistura às chapas da caçamba foi evitada mediante a aspersão prévia de solução de cal (uma parte de cal para três de água), retirando o excesso de solução antes do carregamento da mistura, basculando-se a caçamba.

Observa-se que cada carregamento foi coberto com lona para proteger a mistura de chuvas ocasionais, eventual contaminação por poeira e, especialmente, perda de temperatura e queda de partículas durante o transporte.

#### 4.5.2.4 Distribuição e compactação da massa asfáltica para o RAUD

A distribuição da mistura foi realizada através de vibro acabadora e imediatamente após a execução da camada impermeabilizante e de ligação. A temperatura média da mistura, medida na pista no momento da distribuição, foi de 150°C (Figura 4.23) e a mínima superior a 135°C.



Figura 4.23: Temperatura média de distribuição da mistura asfáltica para o RAUD no trecho experimental

A vibroacabadora operou em velocidade constante, entre 2,0 a 3,0 km/h, sem parar durante a aplicação e com a sua mesa aquecida. Observa-se que o controle de espessura da camada acabada é de fundamental importância; para tanto a distribuição da massa foi executada com vibro acabadora dotada de sistema de nível eletrônico. A espessura mínima acabada foi limitada a 20 mm e a máxima a 30 mm. Espessuras inferiores são suscetíveis a potenciais descolamentos e destacamentos da camada e espessuras superiores tendem a formar um reservatório de acúmulo de água gerando pressões negativas (efeito poro-pressão) e formação

de painéis ou buracos pela passagem do tráfego. Detalhes da espessura e textura superficial do RAUD são ilustrados na Figura 4.24 (a) e (b).



Figura 4.24 (a): Detalhes da espessura e textura superficial do RAUD – espessura final da camada



Figura 4.24 (b): Detalhes da espessura e textura superficial do RAUD – textura superficial da camada



Possíveis irregularidades na superfície da camada acabada devem ser corrigidas imediatamente pela adição manual de massa com espalhamento efetuado por meio de ancinhos e/ou rodos metálicos. No entanto, esse procedimento deve ser reduzido ao máximo, já que o reparo manual tende a prejudicar o acabamento do serviço.

Em conjunto com a distribuição da mistura asfáltica foram executadas as operações de rolagem. Recomenda-se que a temperatura inicial de rolagem seja a mais elevada que a mistura asfáltica possa suportar sem ocorrência de fissuras ou fluência, em geral entre 145 e 155°C.

Um aspecto operacional relevante é a rápida velocidade de esfriamento da massa, bem maior que a usualmente verificada para o concreto asfáltico – CA; isso ocorre devido a sua graduação mais grossa e espessura delgada quando aplicada em condições ambientais adversas (alta umidade, baixas temperaturas e alta velocidade do vento) podendo ocasionar desagregações e outros defeitos prematuros se não compactada em tempo hábil.

A compactação de uma mistura asfáltica descontínua, como o RAUD, deve ser realizada apenas com rolos lisos. O rolo de pneus é incompatível com esse tipo de mistura que possui elevado teor de ligante. A compactação deve ser executada, preferencialmente, com a utilização de dois rolos lisos duplo tandem de 10-12 toneladas de peso, sem vibração. Estes devem operar simultaneamente e posicionados imediatamente atrás da vibro acabadora, como ilustrado na Figura 4.25.

A compactação deve ser iniciada pelas bordas em direção ao eixo da pista. Nas curvas, de acordo com a superelevação, a compactação deve sempre começar do ponto mais baixo para o ponto mais alto. Cada passada do rolo deve ser recoberta na seguinte em pelo menos metade da espessura rolada. Um terceiro rolo liso pode ser empregado para a rápida compactação das juntas longitudinais e transversais.

Durante a rolagem não devem ser permitidas mudanças de direção e inversões bruscas da marcha, sem estacionamento do equipamento sobre o revestimento recém rolado. As rodas do rolo foram umedecidas adequadamente com uma emulsão de óleo vegetal de modo a evitar a aderência da mistura. Deve ser vedada a utilização de óleo diesel.

As condições de distribuição e compressão devem ser determinadas experimentalmente na obra a partir da execução de um segmento de controle definindo os parâmetros mais apropriados à sua aplicação, conforme descrito no item 4.5.2.6.

De modo geral, os rolos lisos executam um mínimo de quatro coberturas finalizando a operação quando for atingida a compactação de referência, determinada na execução do segmento de controle.



Figura 4.25: Detalhe da rolagem da mistura imediatamente atrás da vibro acabadora durante a execução do RAUD no trecho experimental

#### 4.5.2.5 Abertura ao tráfego do RAUD

O revestimento recém-acabado deve ser mantido sem tráfego até o seu completo esfriamento. A pintura de sinalização pode ser realizada após o esfriamento da massa asfáltica aplicada. O aspecto final da rodovia após a sinalização horizontal do RAUD é ilustrado na Figura 4.26 (a) e (b). O Anexo A apresenta em detalhe os registros fotográficos da construção do trecho experimental desta pesquisa.



Figura 4.26 (a): Aspecto final da rodovia após a sinalização horizontal do RAUD – pista seca



Figura 4.26 (b): Aspecto final da rodovia após a sinalização horizontal do RAUD – pista úmida

#### 4.5.2.6 Execução do segmento de controle

A verificação da dosagem é feita em obra a partir da execução de um segmento de controle. Nesta etapa, alguns ensaios de campo são efetuados para a comparação com os valores e tolerâncias determinadas nas especificações do projeto da mistura. O segmento de controle é de fundamental importância para identificar possíveis variações de materiais e/ou equipamentos e estabelecer diretrizes para a execução e controle de qualidade do serviço.

Pequenos ajustes, se necessários, devem ser efetuados para compatibilizar as condições ambientais e operacionais da obra com os requisitos especificados no projeto de dosagem, tais como: produção e calibração da usina de asfalto, velocidades de espalhamento da acabadora, padrão de rolagem dos equipamentos de compactação (tempo de operação, temperaturas inicial e final, número de coberturas), etc.

Um “*checklist*” deve ser usado durante a sequência de execução da seção de controle visando “fazer certo da primeira vez” e evitar não conformidades durante o controle de qualidade dos serviços. Nesta etapa são pertinentes algumas questões gerais, tais como:

- a) Os agregados, ligante asfáltico e fíler mineral atendem as especificações de qualidade?
- b) As pilhas de agregados estão identificadas, separadas e armazenadas em local limpo e coberto?
- c) Os agregados estão na graduação requerida e seu teor de umidade foi determinado?
- d) O tamanho nominal máximo da composição de agregados é compatível com a espessura da camada asfáltica?
- e) A usina de asfalto está devidamente calibrada considerando a produção x teor de umidade dos agregados?
- f) O ligante asfáltico e os agregados estão na temperatura correta de usinagem?
- g) Os agregados estão bem recobertos pela película de ligante na temperatura requerida para a mistura?
- h) A resistência à água da mistura asfáltica foi reavaliada durante sua produção?

- i) Os equipamentos para a execução da camada impermeabilizante e de ligação estão devidamente calibrados? A aplicação está homogênea?
- j) A mistura asfáltica está sendo transportada corretamente sem problemas de contaminação, segregação ou perda acentuada de temperatura?
- k) A quantidade de caminhões para transporte da massa asfáltica é suficiente para a alimentação contínua da acabadora?
- l) A mesa da acabadora está na temperatura adequada? O sistema eletrônico de controle de nível está operante?
- m) A velocidade de aplicação da acabadora é compatível com a produção da usina e com o acabamento desejado?
- n) A mistura asfáltica está sendo aplicada com uniformidade, nas temperaturas e espessuras requeridas?
- o) O padrão de rolagem está adequado para atender a densidade de referência requerida (tipos, quantidade de rolos e coberturas, temperaturas inicial e final de compactação)?
- p) Produtos antiaderentes estão sendo utilizados nos rolos em substituição ao óleo diesel?
- q) As condições climáticas (temperatura, velocidade do vento, umidade) permitem atingir a densidade de referência requerida para a mistura asfáltica?
- r) A mistura asfáltica está na temperatura adequada para abertura ao tráfego?

#### 4.6 CONTROLE TECNOLÓGICO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Durante o processo construtivo, os seguintes controles de materiais e misturas asfálticas foram realizados no laboratório da obra:

- a) ligante asfáltico modificado por polímeros elastoméricos: penetração (NBR 6576), ponto de amolecimento (NBR 6560), recuperação elástica (NBR 15086)

- e viscosidade Brookfield (NBR 15184) a diferentes temperaturas para estabelecimento da curva viscosidade x temperatura;
- b) agregados: análise granulométrica (DNER 083/98), equivalente de areia (DNER 054/97) e adesividade (NBR 14329) ;
- c) emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos: resíduo seco (NBR 14376), peneiração (NBR 14393), penetração sobre o resíduo (NBR 6576), ponto de amolecimento sobre o resíduo (NBR 6560) e recuperação elástica sobre o resíduo (NBR 15086);
- d) mistura asfáltica - temperaturas: durante a usinagem, transporte (a cada caminhão que chegava à pista), espalhamento, no início e no final da compactação;
- e) mistura asfáltica– execução: teor de ligante (DNER-ME 053/94 e/ou ASTM D-2172-B – extração por refluxo), análise granulométrica (DNER 083/94), resistência à tração por compressão diametral (DNER 138/94), ensaio Marshall (DNER ME-043), densidade de referência através do densímetro eletromagnético;
- f) mistura asfáltica – pista: verificação da espessura e adesão entre as camadas através da extração de CPs (corpos-de-prova), macrotextura através do ensaio de mancha de areia (ASTM E 965/96) e atrito superficial com o pêndulo britânico (ASTM E 303/93).

A amostragem do trecho experimental, referente à seção-teste do RAUD, apresentou dificuldades operacionais. A maior parte dos corpos de prova (CPs) não resistiu ao processo de extração com a sonda rotativa para a determinação de suas propriedades mecânicas de resistência à tração e a desagregação (ensaio de desgaste - Cantabro); Na prática, os CPs, que permaneceram íntegros, foram utilizados somente para a verificação das espessuras da seção-teste (RAUD). A Figura 4.27 (a) e (b) mostra o processo de extração por sonda rotativa e os CPs obtidos da seção-teste (RAUD) e de controle (CA).



Figura 4.27 (a): Extração por sonda rotativa e CPs da pista experimental - extração de CPs por sonda rotativa



Figura 4.27 (b): Extração por sonda rotativa e CPs da pista experimental - detalhe dos CPs do CA (à esquerda) e do RAUD (à direita)

Devido à fragilidade dos CPs extraídos, a densidade de referência da seção-teste (RAUD) foi determinada experimentalmente na obra, através do densímetro eletromagnético, a partir da execução do segmento inicial para a definição do padrão de rolagem ( quantidade de rolos e coberturas, temperaturas inicial e final de compactação).

Conforme descrito na norma francesa NF XP P 98-137 (AFNOR, 2001), o teor de vazios “*in situ*” do revestimento asfáltico delgado BBTM é de difícil determinação e pouco significativo em função da espessura delgada do revestimento. O processo de rolagem tem por finalidade apenas o assentamento dos agregados e, portanto, não há requisitos técnicos a serem atendidos em relação ao grau de compactação em pista (TDOT, 2004; CALTRANS 2003a).

A Figura 4.28 mostra a determinação da densidade de referência da seção teste (RAUD) através do densímetro eletromagnético.



Figura 4.28: Determinação da densidade de referência da seção-teste (RAUD) através do densímetro eletromagnético.

O controle tecnológico do trecho experimental foi executado conforme os respectivos planos de controle de materiais e misturas asfálticas para a seção-teste do RAUD e de controle em CA, apresentados nas Tabelas 4.13 a 4.18.

As Tabelas 4.19 e 4.20 apresentam o relatório de controle tecnológico da seção-teste do RAUD sentido Sul e Norte, respectivamente. As Tabelas 4.21 e 4.22 apresentam o relatório de controle tecnológico da seção de controle do CA sentido Sul e Norte, respectivamente.

Tabela 4.13: Plano de controle para o ligante asfáltico AMP 55/75-E

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Penetração	Conforme projeto	NBR 6576	Penetrômetro	A cada fornecimento
Viscosidade a altas temperaturas, cP 135°C, 150°C, 177°C	Conforme projeto	NBR 15184	Viscosímetro Brookfield	A cada fornecimento
Ponto de Amolecimento	Conforme projeto	NBR 6560	Anel e Bola	A cada fornecimento
Recuperação Elástica	Conforme projeto	NBR 15086	Ductilômetro	A cada fornecimento
Temperatura do ligante na usinagem	Conforme projeto (135 °C – 177 °C)	-	Termômetro	A cada usinagem



Tabela 4.14: Plano de controle para a emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos AMP 55/75-E RR1C-E

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Resíduo seco	62%, mín.	NBR 14376	Balança	A cada fornecimento
Peneiração	0,10%, máx.	NBR 14393	Balança	A cada fornecimento
Ponto de Amolecimento	50°C, mín.	NBR 6560	Anel e Bola	A cada fornecimento
Recuperação Elástica	65%, mín.	NBR 15086	Ductilômetro	A cada fornecimento
Penetração sobre o resíduo	45-150 (0,1 mm)	NBR 6576	Penetrômetro	A cada fornecimento

Tabela 4.15: Plano de controle para os agregados

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Granulometria de cada agregado	Conforme Projeto	DNER-ME 083-98	Peneiras Balança	Um ensaio por turno de trabalho
Equivalente de Areia	Conforme Projeto	DNER-ME 054-97	Proveta	Um Ensaio por turno de trabalho
Adesividade	Conforme Projeto	NBR-14329	Visual	Um ensaio por turno de trabalho

Tabela 4.16: Plano de controle para as temperaturas da massa asfáltica

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Temperatura de usinagem	Máx.175°C	----	Termômetro	Durante cada carregamento que sair da usina
Temperatura de Espalhamento	Mín. 135°C	----	Termômetro	A cada distribuição da acabadora
Temperatura Inicial de Compactação	135 °C - 175°C	----	Termômetro	A cada distribuição da acabadora
Temperatura Final de Compactação	Mín. 90°C	----	Termômetro	A cada distribuição da acabadora

Tabela 4.17: Plano de controle para a massa asfáltica – execução

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>	<i>Tamanho da amostra</i>
Quantidade de Ligante Asfáltico	Conforme Projeto	DNER-ME 053-94 e/ou ASTM-D 2172 (B)	Rotarex / Refluxo	01 análise por turno	Aproximadamente 1 kg (com Duplicidade)
Controle da Graduação da Mistura do Agregado	Conforme Projeto	DNER-ME 083-98	Peneiras Balança	01 análise por turno	Aproximadamente 1 kg (com Duplicidade)
Ensaio Marshall	Conforme Projeto	DNER-ME 043	Prensa e Compactador	01 análise por turno	Aproximadamente 1,5 kg por CP
Resistência à Tração	Conforme Projeto	DNER-ME 138	Prensa	01 análise por turno	Aproximadamente 1,5 kg por CP -
Densidade de Referência	Conforme segmento de controle	DNIT-031-2006	Densímetro Eletromag - nético	A cada 100 metros de faixa de rolamento compactada	----

Tabela 4.18: Plano de controle para a massa asfáltica – pista

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Verificação da espessura e adesão entre as camadas	Qualitativo	Observação visual de CPs extraídos da pista	-	A cada 100 m por faixa
Macrotextura/ mancha de areia	0,6-1,2	ASTM E 965/96	Aparelhagem para ensaio de mancha de areia	03 medidas a cada 100 m por faixa
Atrito superficial/ pêndulo britânico	VRD $\geq$ 47	ASTM E 303-93	Pêndulo Britânico	05 medidas a cada 100 m por faixa

Tabela 4.19: Controle tecnológico – RAUD (sentido Sul) – trecho experimental

<i>Rodovia PR-092</i>	<i>Trecho: Jaguariaíva – Arapoti</i>			<i>Sentido: Sul (Jaguariaíva – Curitiba)</i>			<i>Tipo de faixa: ¼" Tennessee</i>			<i>Tipo de CAP: AMP 55/75-E</i>	
<i>Peneiras</i>	<i>Análise granulométrica</i>									<i>Lim inf</i>	<i>Lim sup</i>
3/8"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Nº 4	49,6	51,4	50,9	51,6	48,6	49,1	52,1	47,6	50,4	40,0	55,0
Nº 8	26,5	27,1	26,9	28,4	27,9	27,3	25,9	25,4	26,8	22,0	32,0
Nº 16	19,3	19,9	20,2	21,7	19,6	21,4	20,3	20,8	21,0	15,0	25,0
Nº 30	14,5	15,6	15,1	14,6	16,5	14,9	16,8	15,8	14,3	10,0	18,0
Nº 50	10,2	10,7	11,3	10,5	9,8	11,1	9,1	9,5	10,9	8,0	13,0
Nº 100	7,6	7,2	8,1	7,9	8,3	7,1	8,2	8,9	8,6	6,0	10,0
Nº 200	5,9	5,6	6,1	6,3	5,3	5,8	6,2	5,9	5,7	4,0	7,0
Estaca	5955	5960	5965	5970	5975	5980	5985	5990	5995		
	Trilha de roda interna		Trilha de roda externa			Eixo da pista					
	<i>Ensaio Marshall</i>						<i>Temperaturas</i>				
<i>Estacas</i>	<i>% de ligante</i>	<i>V.V. %</i>	<i>V.A.M %</i>	<i>R.B.V %</i>	<i>RT MPa</i>	<i>Densidade Aparente</i>	<i>Grau de compactação %</i>	<i>Temp. de usinagem °C</i>	<i>Temp. inicial espalhamento °C</i>	<i>Temp Final compactação °C</i>	
5955	5,10	12,51	24,15	48,21	1,00	2,332	97,6	165,0	162,0	144,3	
5960	5,10	11,78	23,48	49,82	1,00	2,351	98,4	168,0	163,0	145,1	
5965	5,20	11,65	23,49	50,41	1,10	2,355	98,6	166,0	162,0	144,3	
5970	5,30	10,76	22,82	52,85	1,20	2,378	99,5	169,0	164,0	144,8	
5975	5,00	12,01	23,65	49,21	0,90	2,345	98,2	171,0	165,0	145,3	
5980	5,00	10,49	22,27	52,90	0,90	2,385	99,9	164,0	160,0	143,4	
5985	5,30	10,61	22,68	53,23	1,20	2,382	99,7	172,0	165,0	145,6	
5990	5,20	11,58	23,45	50,62	1,00	2,356	98,6	166,0	162,0	143,2	
5995	5,30	12,03	23,88	49,62	1,10	2,334	98,1	168,0	163,0	143,9	
<b>Projeto</b>	5,20	10,40	19,30	47,60	0,97	2,389	97,0	-	-	-	

Tabela 4.20: Controle tecnológico – RAUD (sentido Norte) – trecho experimental

<i>Rodovia PR-092</i>	<i>Trecho: Jaguariaíva – Arapoti</i>			<i>Sentido: Norte ( Jaguariaíva – Arapoti)</i>			<i>Tipo de faixa: ¼” Tennessee</i>			<i>Tipo de CAP: AMP 55/75-E</i>	
<i>Peneiras</i>	<i>Análise granulométrica</i>									<i>Lim inf</i>	<i>Lim sup</i>
3/8”	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Nº 4	49,9	51,0	50,6	51,2	50,1	49,3	52,4	48,9	50,9	40,0	55,0
Nº 8	26,9	27,3	27,8	29,0	28,3	28,1	26,8	27,0	25,9	22,0	32,0
Nº 16	20,1	18,7	19,9	20,4	20,1	20,8	19,3	21,2	21,9	15,0	25,0
Nº 30	15,1	14,6	16,9	15,7	15,3	14,4	16,1	14,9	15,6	10,0	18,0
Nº 50	10,9	11,1	10,4	10,2	11,3	10,5	9,9	11,7	10,6	8,0	13,0
Nº 100	7,1	7,9	7,0	8,3	7,6	8,5	7,4	7,9	8,1	6,0	10,0
Nº 200	5,5	5,9	5,3	6,4	6,1	5,7	6,3	5,0	4,9	4,0	7,0
Estaca	5955	5960	5965	5970	5975	5980	5985	5990	5995		
	Trilha de roda interna		Trilha de roda externa			Eixo da pista					
	<i>Ensaio Marshall</i>						<i>Temperaturas</i>				
<i>Estacas</i>	<i>% de ligante</i>	<i>V.V. %</i>	<i>V.A.M %</i>	<i>R.B.V %</i>	<i>RT MPa</i>	<i>Densidade Aparente</i>	<i>Grau de compactação %</i>	<i>Temp. de usinagem °C</i>	<i>Temp. inicial espalhamento °C</i>	<i>Temp Final compactação °C</i>	
5955	5,20	11,6	23,44	50,50	1,00	2,356	98,6	167,0	166,0	145,6	
5960	5,22	11,9	23,70	49,84	0,90	2,348	98,3	169,0	167,0	144,8	
5965	5,16	11,6	23,43	50,36	1,10	2,355	98,6	162,0	164,0	144,3	
5970	5,12	11,7	23,45	50,15	0,90	2,353	98,5	165,0	165,0	144,9	
5975	5,27	10,5	22,54	53,42	1,00	2,385	99,8	164,0	166,0	145,0	
5980	5,11	11,0	22,83	51,88	0,90	2,372	99,3	173,0	167,0	145,3	
5985	5,09	11,5	23,28	50,51	0,90	2,358	98,7	167,0	169,0	145,5	
5990	5,06	11,2	22,98	51,25	1,00	2,366	99,1	168,0	171,0	144,8	
5995	5,21	10,7	22,63	52,88	1,20	2,381	99,7	166,0	170,0	145,9	
<b>Projeto</b>	5,20	10,4	19,3	47,60	0,97	2,389	97,0	-	-	-	

Tabela 4.21: Controle tecnológico – CA (sentido Sul) – trecho experimental

<i>Rodovia PR-092</i>	<i>Trecho: Jaguariaíva – Arapoti</i>			<i>Sentido: Sul ( Jaguariaíva – Curitiba)</i>			<i>Tipo de faixa: D DER PR</i>			<i>Tipo de CAP: AMP 55/75-E</i>		
<i>Peneiras</i>	<i>Análise granulométrica</i>									<i>Lim inf</i>	<i>Lim sup</i>	
¾”	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
½”	89,2	89,6	90,4	89,6	90,4	91,8	90,7	91,2	90,7	80,0	100,0	
3/8”	79,2	78,0	78,6	79,3	78,1	80,9	81,5	81,7	80,3	70,0	90,0	
Nº4	60,0	59,4	59,8	58,6	58,3	59,5	61,0	60,7	60,6	50,0	70,0	
Nº 10	39,0	38,5	39,2	40,1	38,9	38,0	37,4	39,3	38,6	33,0	48,0	
Nº 40	19,8	20,2	20,2	19,2	19,7	20,0	20,8	21,2	20,5	15,0	25,0	
Nº 80	13,5	14,0	14,8	14,3	14,1	13,9	14,4	13,9	14,4	8,0	17,0	
Nº 200	6,9	7,1	7,3	6,8	6,7	7,5	7,7	7,4	7,9	4,0	10,0	
Estaca	5978	5983	5988	5993	5998	6003	6008	6013	6018			
	Trilha de roda interna		Trilha de roda externa			Eixo da pista						
<i>Ensaio Marshall</i>										<i>Temperaturas</i>		
<i>Estacas</i>	<i>% de ligante</i>	<i>V.V. %</i>	<i>V.A.M %</i>	<i>R.B.V %</i>	<i>Estabilidade</i>	<i>Fluência</i>	<i>Grau de compac. %</i>	<i>RT</i>	<i>Densidade aparente</i>	<i>Temp. usinagem °C</i>	<i>Temp. inicial espalhamento °C</i>	<i>Temp Final compactação °C</i>
5978	4,54	4,7	17,61	73,09	1234	2,7	100,04	0,90	2,553	168	162	144
5983	4,49	4,8	17,63	72,70	1198	2,6	99,96	0,85	2,551	171	166	145
5988	4,59	4,3	17,27	75,15	1209	2,9	100,51	0,80	2,565	166	160	143
5993	4,49	4,9	17,70	72,38	1252	2,7	99,88	0,90	2,549	169	161	145
5998	4,51	4,8	17,62	72,89	1245	2,6	100,00	0,90	2,552	162	156	143
6003	4,64	4,5	17,50	74,20	1215	2,7	100,27	1,00	2,559	170	164	145
6008	4,6	4,6	17,53	73,82	1236	2,5	100,20	0,90	2,557	173	163	144
6013	4,62	4,5	17,45	74,35	1210	2,6	100,31	0,90	2,560	164	157	143
6018	4,58	4,5	17,45	74,13	1203	2,6	100,27	1,00	2,559	168	163	144
<b>Projeto</b>	4,60	4,6	15,80	71,30	1189,2	2,92	97,0	0,87	2,552			

Tabela 4.22: Controle tecnológico – CA (sentido Norte) – trecho experimental

<i>Rodovia PR-092</i>	<i>Trecho: Jaguariaíva – Arapoti</i>			<i>Sentido: Norte ( Jaguariaíva – Arapoti)</i>			<i>Tipo de faixa: D DER PR</i>				<i>Tipo de CAP: AMP 55/75-E</i>	
<i>Peneiras</i>	<i>Análise granulométrica</i>										<i>Lim inf</i>	<i>Lim sup</i>
¾"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
½"	88,6	87,5	89,7	87,3	88,8	91,0	90,3	92,5	90,7	80,0	100,0	
3/8"	74,5	77,0	78,4	79,6	77,6	80,9	81,5	82,1	80,1	70,0	90,0	
Nº4	57,8	59,5	60,1	58,6	59,0	61,3	61,0	59,4	61,6	50,0	70,0	
Nº 10	39,8	40,0	38,1	40,6	38,9	38,0	36,4	38,4	37,6	33,0	48,0	
Nº 40	20,1	21,0	19,6	21,8	20,5	21,2	20,8	21,7	20,4	15,0	25,0	
Nº 80	13,2	12,9	14,0	13,5	12,9	14,0	13,6	13,2	14,2	8,0	17,0	
Nº 200	6,4	7,6	7,0	6,9	6,8	7,3	7,1	7,4	7,7	4,0	10,0	
Estaca	5978	5983	5988	5993	5998	6003	6008	6013	6018			
	Trilha de roda interna		Trilha de roda externa			Eixo da pista						
<i>Ensaio Marshall</i>										<i>Temperaturas</i>		
<i>Estacas</i>	<i>% de ligante</i>	<i>V.V. %</i>	<i>V.A.M %</i>	<i>R.B.V %</i>	<i>Estabilidade</i>	<i>Fluência</i>	<i>Grau de compac. %</i>	<i>RT</i>	<i>Densidade aparente</i>	<i>Temp. usinagem °C</i>	<i>Temp. inicial espalhamento °C</i>	<i>Temp Final compactação °C</i>
5978	4,51	4,9	17,68	72,57	1238	2,6	99,9	1,00	2,550	166	160	143
5983	4,49	4,8	17,63	72,70	1196	3,1	99,9	0,85	2,551	174	168	146
5988	4,6	4,7	17,60	73,50	1251	2,7	100,1	0,90	2,555	171	164	144
5993	4,61	4,7	17,67	73,18	1243	2,7	100,0	0,85	2,553	168	162	144
5998	4,58	4,8	17,71	72,82	1249	2,6	99,9	0,88	2,551	169	163	143
6003	4,46	4,9	17,64	72,50	1255	2,5	99,9	0,95	2,550	170	164	145
6008	4,68	4,4	17,47	74,59	1201	2,9	100,3	0,90	2,561	173	166	144
6013	4,46	4,9	17,67	72,34	1263	2,6	99,8	1,00	2,549	167	161	143
6018	4,53	4,9	17,70	72,59	1257	2,6	99,9	1,10	2,550	165	159	143
<b>Projeto</b>	4,60	4,6	15,80	71,30	1189,2	2,92	97,0	0,87	2,552			

## 4.7 MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Para obtenção das características estruturais e funcionais da superfície de rolamento do trecho experimental, correspondendo a seção-teste do RAUD e a de controle em concreto asfáltico – CA foram realizadas as seguintes avaliações de campo:

- a) levantamento deflectométrico para a determinação da capacidade estrutural do pavimento, antes e após a execução do trecho experimental, medidas com viga Benkelman (DNER-ME 024/94);
- b) afundamentos em trilhas de roda através do inventário das condições funcionais do estado da superfície (DNIT 006/2003-PRO e DNIT 007/2003-PRO);
- c) macrotextura através do ensaio de mancha de areia (ASTM E 965/96);
- d) drenabilidade superficial, avaliação da capacidade da macrotextura em drenar a água da chuva através da superfície do pavimento
- e) atrito superficial (microtextura dos agregados) através do pêndulo britânico. O valor é expresso em BPN – *British Pendulum Number*(ASTM E 303/93);
- f) cálculo dos valores de IFI (*International Friction Index*) cujo procedimento está descrito na norma ASTM E-1960-98 e;
- g) medição do ruído através da metodologia ISO 11819-1 (*Statistical Pass-By Index*).

Entre a data de execução (maio/2009), e o final do período de análise (outubro/2011), o número N foi de aproximadamente  $1,77 \times 10^7$  para o trecho experimental. Foram realizadas 11 campanhas de medições periódicas entre setembro de 2009 e outubro de 2011 em ambas as seções, divididas em sentido Sul e sentido Norte, sendo a primeira em aclave e a segunda em declive.

Para a seção-teste foram demarcadas 6 estacas no trecho norte e 6 estacas no trecho sul, totalizando 12 estacas. Para a seção de controle foram demarcadas 5 estacas para cada trecho, totalizando 10 estacas. As estacas estavam distanciadas a cada 100m. As medições feitas em cada campanha foram realizadas por estaca, da seguinte forma: 3 medidas de macrotextura / mancha de areia, 2 medidas de drenabilidade e 5 medidas de microtextura/pêndulo britânico.

As avaliações foram efetuadas nas áreas mais solicitadas pelos pneus dos veículos, por serem pontos usualmente críticos quanto à segurança. Todas as medições foram realizadas em trilha de roda externa e dispostas nas estacas da seguinte forma:

- a) pêndulo marca central a 70 cm do centro da faixa de sinalização;
- b) mancha de areia a 70 cm do centro da faixa de sinalização e 85 cm abaixo da marca do pêndulo;
- c) drenabilidade a 70 cm do centro da faixa de sinalização e 85 cm acima da marca do pêndulo.

Para a medição de ruído, foram executadas 193 leituras na seção-teste e 201 leituras na seção de controle, sempre realizadas no ponto médio de cada seção.

Na apresentação dos resultados de macrotextura/mancha de areia, drenabilidade e de microtextura / pêndulo britânico os valores medidos representam a média dos levantamentos realizados para todas as estacas de cada seção.

Os valores de drenabilidade para a seção de controle são apenas referenciais e não podem ser considerados representativos tendo em vista que o tempo máximo estabelecido para o ensaio (10 minutos) foi ultrapassado durante as medições de vazão de água.

A Figura 4.29 ilustra a variação de textura superficial na junta transversal da seção-teste do RAUD com a de controle em CA.



Figura 4.29: Detalhe da textura da superfície na junta transversal (RAUD à esquerda e CA à direita)



## 4.8 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PROGRAMA DE CAMPO

A Figura 4.30 ilustra a avaliação deflectométrica de campo com a viga Benkelman. A Tabela 4.23 e a Figura 4.31 apresentam os resultados comparativos do levantamento deflectométrico, medidas com viga Benkelman (DNER-ME 024/94), para a determinação da capacidade estrutural do trecho experimental, antes (março/2009) e imediatamente após a sua execução (julho/2009). Também foi medida a deflexão máxima (D0) da seção-teste em RAUD (20 mm) e de controle em CA (30 mm), decorridos 26 meses após o início do período de monitoramento (julho/2011).

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.23 e Figura 4.31, observa-se:

- a) as seções-teste em RAUD e de controle em CA foram construídas sobre um trecho de rodovia que apresentava condições estruturais similares e deflexões máximas médias de mesma magnitude;
- b) imediatamente após a execução do trecho experimental (julho/2009) e decorridos 26 meses após o início do período de análise (julho/2011), ambas as camadas de rolamento, construídas com o mesmo tipo de ligante asfáltico (AMP 55/75-E), reduziram as deflexões máximas originais aumentando a capacidade estrutural do pavimento pela mesma ordem de magnitude, embora as seções-teste e de controle tenham sido construídas com espessuras distintas: RAUD (20 mm) e o CA (30 mm), respectivamente;
- c) e os raios de curvatura, medidos em ambas as seções, indicaram que as tensões provenientes das cargas de tráfego permaneciam bem distribuídas ao longo do trecho experimental da rodovia.



Figura 4.30: Avaliação deflectométrica de campo com a viga Benkelman no trecho experimental

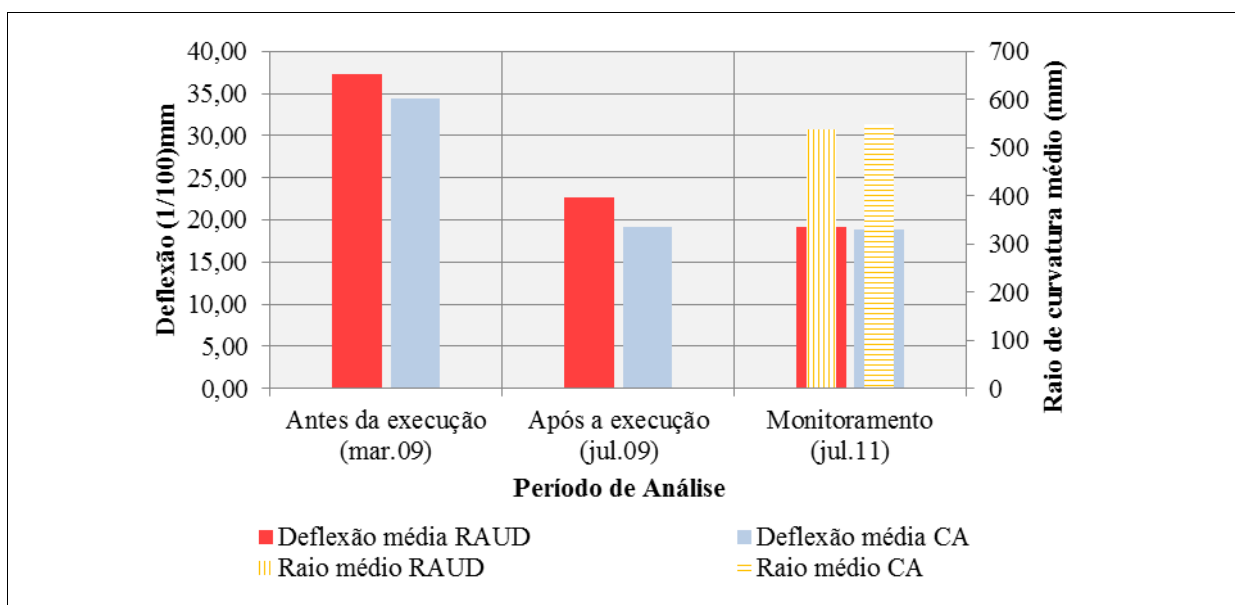


Figura 4.31: Avaliação deflectométrica comparativa da seção- teste x seção de controle desta pesquisa

Tabela 4.23: Resultados comparativos do levantamento deflectométrico

Revestimento Asfáltico Ultra Delgado – RAUD						Concreto Asfáltico – CA					
	Antes da Exec. (mar. 2009)	Após a Exec. (jul. 2009)	Monitoramento (jul.2011)				Antes da Exec. (mar. 2009)	Após a Exec. (jul. 2009)	Monitoramento (jul.2011)		
Estaca			D0*	D25**	R***	Estaca			D0*	D25**	R***
5984N	50	28	16	10	520,83	6008N			10	6	781,25
5980N			12	8	781,25	6003N	22	18	24	20	781,25
5975N	34	26	14	6	390,63	5998N			24	16	390,63
5970N			8	4	781,25	5993N	24	16	18	10	390,63
5965N	28	18	16	10	520,83	5988N			30	16	223,21
5960N			10	4	520,83						
5960S	44	18	10	6	781,25	5988S	38	16	18	8	312,5
5965S			34	26	390,63	5993S			24	12	260,42
5970S	30	26	22	12	312,50	5998S	28	16	12	8	781,25
5975S			24	20	781,25	6003S			12	8	781,25
5980S	38	20	24	16	390,63	6008S	60	30	16	12	781,25
5984S			40	28	260,42						
Média	37,33	22,67	19,17	12,50	536,03	Média	34,40	19,20	18,80	11,60	548,36
Desvio Padrão	8,45	4,50	10,00	8,27	197,85	Desvio Padrão	15,58	6,10	6,55	4,50	250,60

\*D0 = (L0 - LF) x F(constante da viga)

\*\* D25 = (L25 - LF) x F(constante da viga)

\*\*\* R = 6250/[2(D0 - D25)]

Os afundamentos em trilhas de roda podem resultar na redução da aderência devido ao acúmulo de água na superfície do pavimento e, conseqüentemente, aumentar os riscos de hidroplanagem dos veículos em pista molhada. A Tabela 4.24 apresenta os resultados comparativos de afundamentos médios em trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), através do inventário das condições funcionais do estado da superfície (DNIT 006/2003-PRO e DNIT 007/2003-PRO), das seções-teste do RAUD (20 mm) e de controle em CA (30 mm), decorridos 26 meses após o início do período de monitoramento do trecho experimental (julho/2011).

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.24, observa-se:

- as seções-teste em RAUD e de controle em CA apresentam afundamentos médios em trilha de roda de mesma ordem de magnitude e compatíveis com o nível tráfego pesado ( $N \geq 1,77 \times 10^7$ ) e a vida de serviço da rodovia (26 meses);

b) e os afundamentos em trilha de roda externa (TRE) de ambas as seções (RAUD e CA) tendem a ser maiores no trecho experimental sentido Norte, em declive.

Tabela 4.24: Determinação de afundamentos em trilha de roda das seções – teste e de controle do trecho experimental

<i>Determinação de afundamentos em trilha de roda</i>			
	<i>Estacas</i>	<i>Trilha de roda interna (mm)</i>	<i>Trilha de roda externa (mm)</i>
RAUD	5970 Sul	2	2
	5970 Norte	1	3
CA	5998 Sul	3	2
	5998 Norte	1	4

A Figura 4.32 ilustra a execução dos ensaios de macrotextura/mancha de areia, microtextura/pêndulo britânico e de drenabilidade na seção-teste (RAUD) do trecho experimental. As Figuras 4.32 a 4.36 apresentam os resultados de monitoramento dos índices funcionais do trecho experimental (macrotextura/mancha de areia, drenabilidade, microtextura/pêndulo britânico, IFI F(60) e de pressão sonora SBPI, respectivamente).



Figura 4.32: Detalhe da execução dos ensaios de macrotextura/ mancha de areia, microtextura/pêndulo britânico e drenabilidade na seção-teste (RAUD) do trecho experimental.

A partir da análise comparativa da evolução da macrotextura/mancha de areia entre setembro/2009 a outubro/2011, apresentado na Figura 4.33, verifica-se:

- a) a macrotextura de ambos os revestimentos apresenta um decréscimo inicial em função da ação abrasiva do tráfego (eliminação da película de ligante superficial do agregado), havendo uma tendência assintótica de estabilização dos valores ao longo período de análise;
- b) para ambas as seções (RAUD e CA) há uma variação na textura superficial ao longo do período de análise, sendo que o trecho experimental Sul, em aclive tende a apresentar uma macrotextura mais fechada (sentido de maior tração e tempo de aplicação das cargas de tráfego) em relação ao trecho experimental Norte, em declive;
- c) e considerando a média dos valores de mancha de areia do trecho experimental, em ambos os sentidos (Sul e Norte), a macrotextura do RAUD é classificada como grossa ou aberta atendendo aos valores limites de 0,6 a 1,2 mm, recomendados pelo DNIT (2006a); já o CA apresenta textura superficial média e a partir da 3ª campanha de monitoramento (novembro/2009) não atende mais ao valor mínimo de 0,6 mm, preconizado pela especificação de serviço para o concreto asfáltico (DNIT, 2006b).

Pode-se concluir que a melhor textura superficial da seção-teste está principalmente relacionada ao tamanho máximo dos agregados e a graduação descontínua da mistura. A macrotextura superficial grossa ou aberta do RAUD pode contribuir para aumentar a resistência à derrapagem em altas velocidades, a drenagem da água superficial, a percepção das marcas viárias, bem como reduzir a hidroplanagem, o “spray” e a reflexão da luz, melhorando as condições de visibilidade e segurança do usuário em pista molhada.

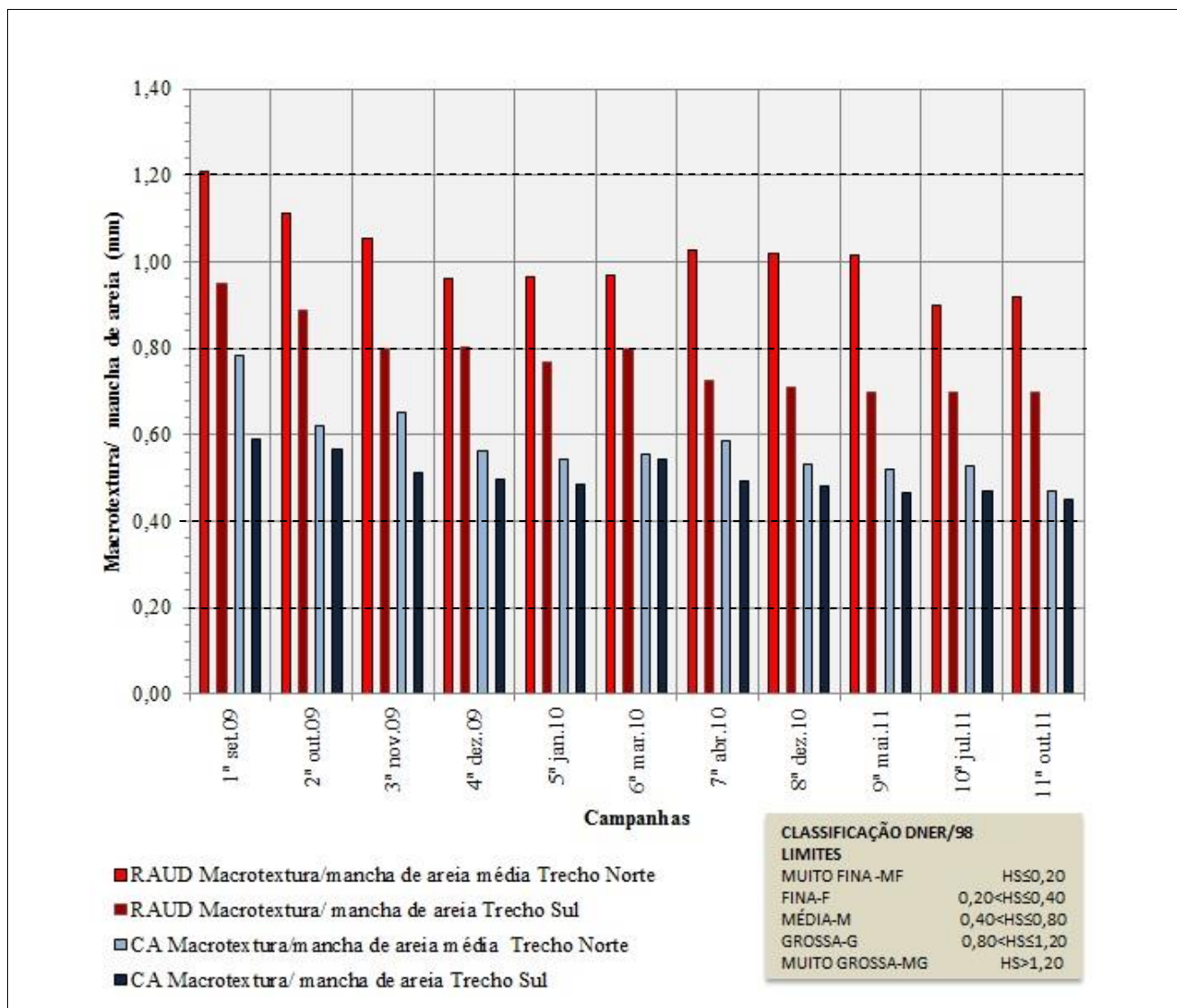


Figura 4.33: Avaliação de macrotextura/mancha de areia para o RAUD e o CA do trecho experimental desta pesquisa

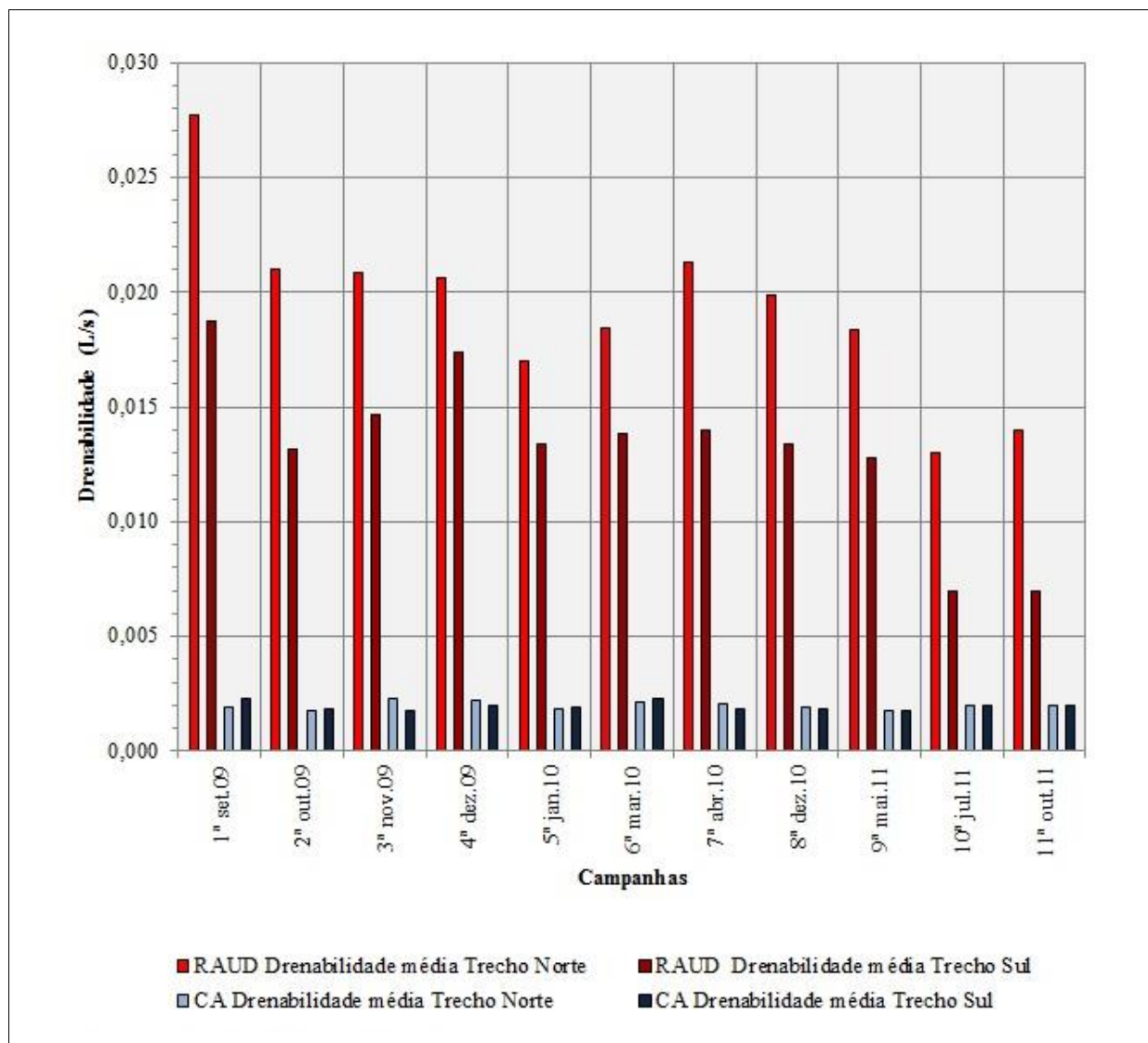


Figura 4.34: Avaliação da drenabilidade para o RAUD e o CA do trecho experimental desta pesquisa

Baseado na análise comparativa dos resultados de drenabilidade, apresentados na Figura 4.34, verifica-se:

- a) um decréscimo inicial dos valores de drenabilidade do RAUD em função da ação abrasiva do tráfego, com uma tendência de estabilização dos valores da capacidade de escoamento da água superficial ao longo período de monitoramento;
- b) a seção-teste sentido Sul do RAUD, em aclave tende a apresentar menor capacidade de escoamento da água superficial (sentido de maior tração e tempo

de aplicação das cargas de tráfego) em relação ao sentido Norte, em declive, devido a sua macrotextura superficial mais fechada e a própria inclinação;

- c) e os valores de drenabilidade apresentados para a seção de controle em CA são muito baixos indicando limitações do método de ensaio principalmente para misturas asfálticas com graduação contínua e textura superficial de média a fechada, conforme descrito por Aps (2006).

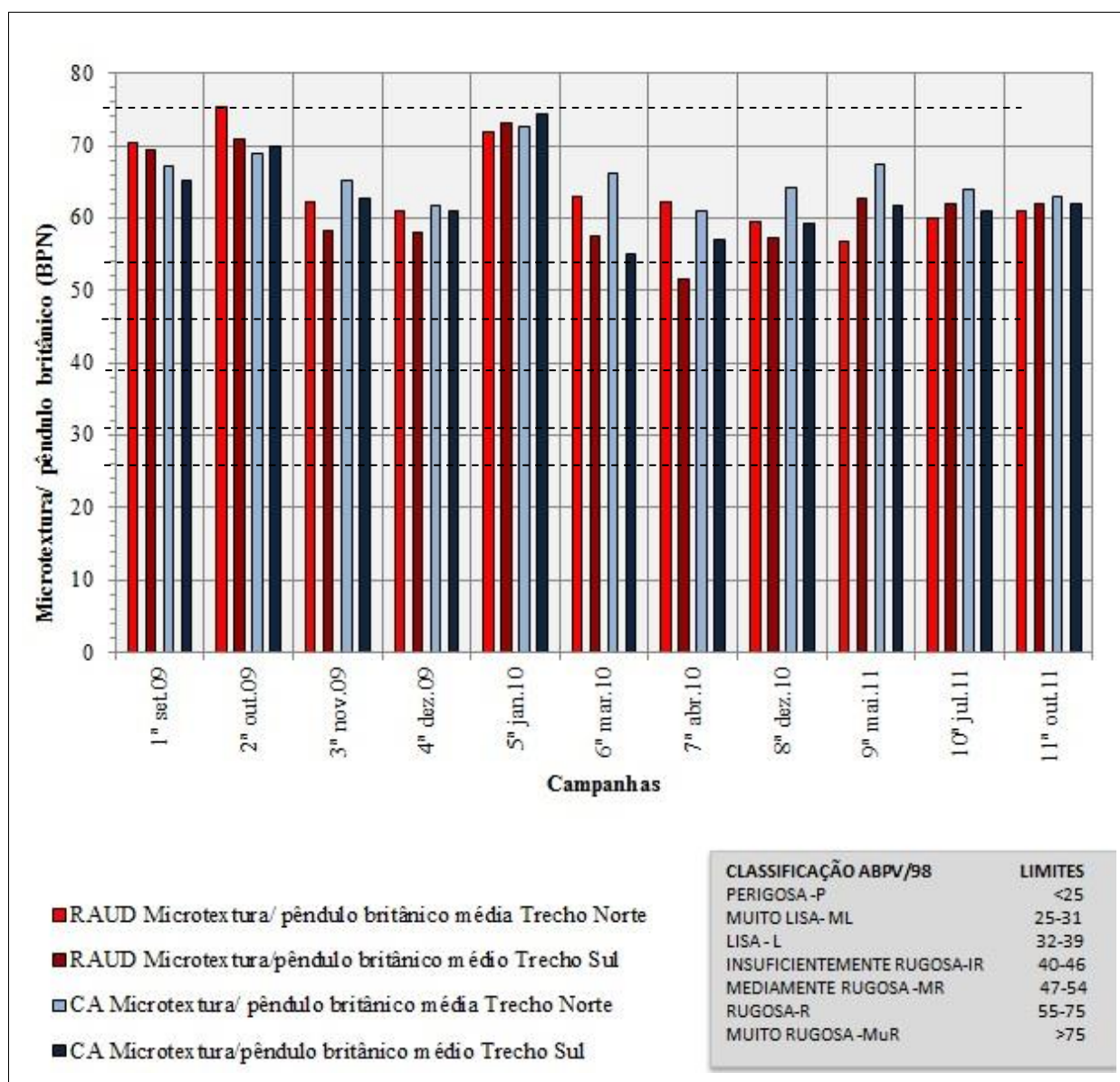


Figura 4.35: Avaliação da microtextura/pêndulo Britânico entre o RAUD e o CA do trecho experimental desta pesquisa



Em relação aos resultados de microtextura/pêndulo Britânico, apresentados na Figura 4.35, verifica-se:

- a) para ambos os revestimentos asfálticos, há uma leve tendência de redução dos valores de resistência à derrapagem atrito em baixas velocidades (< 48 km/h) ao longo do período de monitoramento;
- b) o RAUD e o CA apresentam valores de resistência à derrapagem de mesma ordem de magnitude, sendo a microtextura dos revestimentos classificada como rugosa;
- c) e o RAUD e o CA reúnem as condições adequadas para romper a lâmina de água superficial em baixas velocidades de deslocamento tendo em vista que o DNIT (2006a) tem recomendado o VRD – valor mínimo de resistência à derrapagem de 55 (microtextura rugosa).

Para as seções avaliadas, pode-se inferir que o polimento do agregado é a principal característica responsável pela redução da aderência pneu/superfície medida pelo Pêndulo Britânico ao longo do período de análise. Portanto, as misturas asfálticas (RAUD e CA) do trecho experimental, formuladas com agregados de mesma origem mineralógica e de boa resistência ao polimento tendem a proporcionar as condições adequadas de atrito superficial em baixa velocidade.

O IFI F60 (*International Friction Index*), expressa um índice de aderência pneu/pavimento; através deste parâmetro é possível identificar superfícies com baixo coeficiente de atrito e estabelecer ações preventivas e procedimentos de gestão para minimizar a ocorrência de acidentes por deficiência das condições de aderência do pavimento molhado.

Em relação aos resultados do IFI F60, apresentados na Figura 4.36 pode-se inferir:

- a) seus valores estão mais afetados pela variação dos índices de macrotextura do que pelos índices de atrito medido pelo Pêndulo Britânico tendo em vista que para o cálculo do IFI F60 há a necessidade de relacionar estes dois índices;
- b) para ambas as seções (RAUD e CA) há uma variação nos valores calculados para o IFI F60 sendo que o trecho experimental Sul, em aclave, tende a apresentar menores valores de aderência (sentido de maior tração e tempo de

aplicação das cargas de tráfego) em relação ao trecho experimental Norte, em declive, devido a sua macrotextura mais fechada;

c) e considerando a média dos valores de IFI F60 do trecho experimental, em ambos os sentidos (Sul e Norte), ao longo do período de monitoramento, o RAUD tende a apresentar o conceito ótimo e o CA, conceito bom em termos de aderência pneu/pavimento quando comparados com os valores limites de IFI F60 recomendados pelo (DNIT, 2006a).

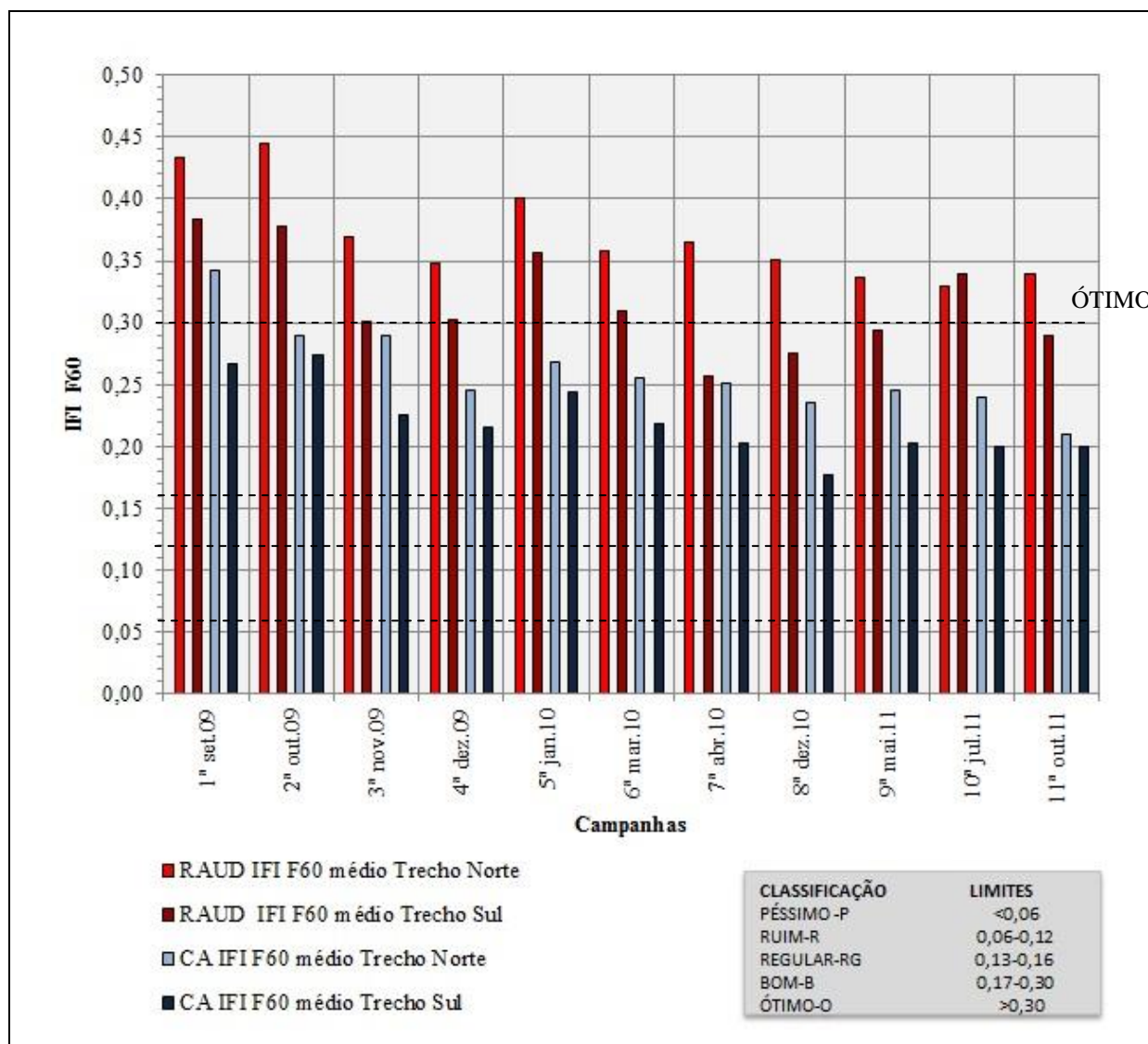


Figura 4.36: Avaliação do IFI F60 entre o RAUD e o CA do trecho experimental desta pesquisa

Comparando os resultados de pressão sonora SBPI apresentados na Figura 4.37, verifica-se:

- a) passando de média velocidade ( 70 a 80 km/h), para alta ( 95 a 110 km/h), há um incremento de pelo menos 2 dBA para o concreto asfáltico e apenas 1 dBA para o RAUD;
- b) há uma redução na energia acústica do RAUD em relação ao concreto asfáltico de 5 dBA em médias velocidades e de 6 dBA para altas velocidades;
- c) e o RAUD pode ser considerado um revestimento mais silencioso em relação ao CA (tradicionalmente o mais utilizado nas rodovias brasileiras).

Segundo Specht *et al.* (2009), alterações de -3 e -5 dBA no ruído representam 50 e 67% de perda na energia acústica, ou seja, provocam mudanças perceptíveis que podem atenuar de maneira expressiva o ruído causado pelo tráfego rodoviário, principalmente em zonas urbanas.

Pode-se inferir que esse melhor desempenho acústico está relacionado à macrotextura, ao tamanho máximo dos agregados e ao volume de vazios do RAUD, visto que ambos os revestimentos foram concebidos com agregados e ligante asfáltico (AMP 55/75-E) de mesma natureza.

A Figura 4.38 ilustra o equipamento utilizado para a medição do ruído através da metodologia ISO 11819-1 (*Statistical Pass-By Index*).

A Figura 4.39 (a) e (b) apresenta as correlações entre os valores de microtextura/pêndulo Britânico e macrotextura / mancha de areia com os obtidos no ensaio de drenabilidade.

Analisando a Figura 4.39 (a) e (b), observa-se para a seção-teste do RAUD, baixa correlação ( $R^2= 0,0606$ ) entre os valores medidos de drenabilidade e os de microtextura/pêndulo Britânico. Por outro lado há forte correlação ( $R^2= 0,774$ ) entre os valores medidos de drenabilidade e os de mancha de areia, conforme também verificado por Aps (2006).

Portanto, infere-se que o ensaio de mancha de areia pode ser utilizado para avaliações futuras da capacidade de escoamento da água do RAUD, devido a sua simplicidade de execução e

baixa dispersão dos resultados obtidos, conforme pode ser observado pelo coeficiente de variação (CV), determinado ao longo do período de monitoramento (Figuras 4.40 e 4.41).

Em Estatística o coeficiente de variação (CV) é definido como uma medida relativa de variabilidade. O CV por ser independente da unidade de medida utilizada, foi utilizado para comparar a dispersão de valores dos diferentes parâmetros funcionais de aderência em cada experimento. O coeficiente de variação (CV) é o desvio padrão ( $\sigma$ ) expresso como uma porcentagem da média aritmética (média) de cada conjunto de dados funcionais obtidos por campanha de monitoramento, conforme a seguinte equação:

$$CV = 100 \cdot (\sigma / \text{Média}) (\%) \quad (4.4)$$

As Figuras 4.40 a 4.43 apresentam a análise estatística (Coeficiente de Variação – CV) dos resultados de monitoramento dos índices funcionais de aderência do trecho experimental, sentido Norte e Sul, (macrotextura/mancha de areia, drenabilidade, microtextura/pêndulo britânico e IFI F(60)).

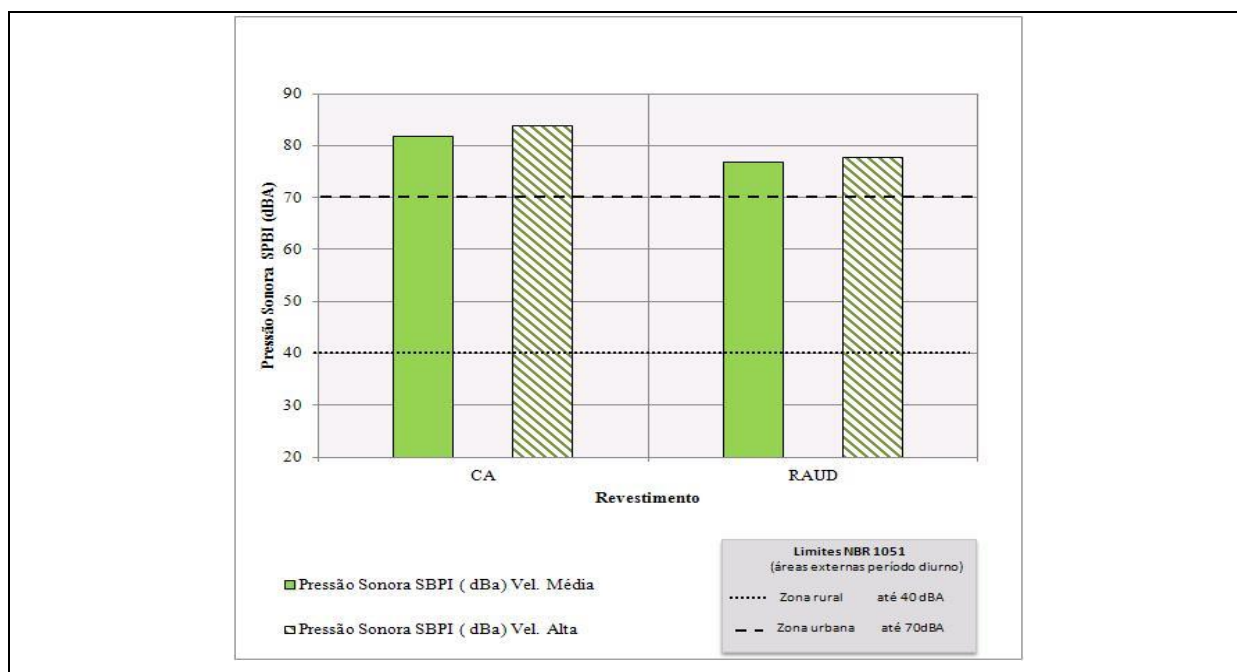


Figura 4.37: Avaliação da pressão sonora entre o RAUD e o CA desta pesquisa



Figura 4.38: Detalhe do equipamento utilizado para a medição do ruído - metodologia ISO 11819-1 (*Statistical Pass-By Index*) nesta pesquisa

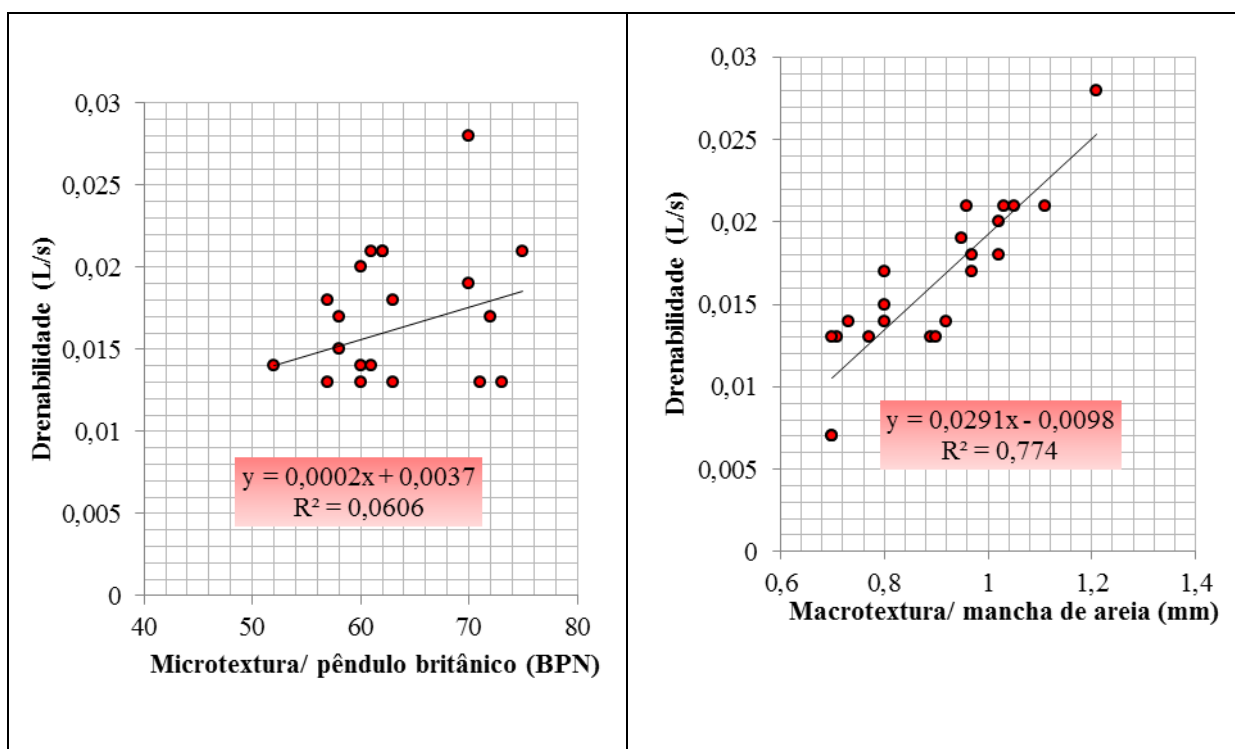


Figura 4.39 (a): Correlações entre drenabilidade e microtextura superficial

Figura 4.39 (b): Correlações entre drenabilidade e macrotextura superficial

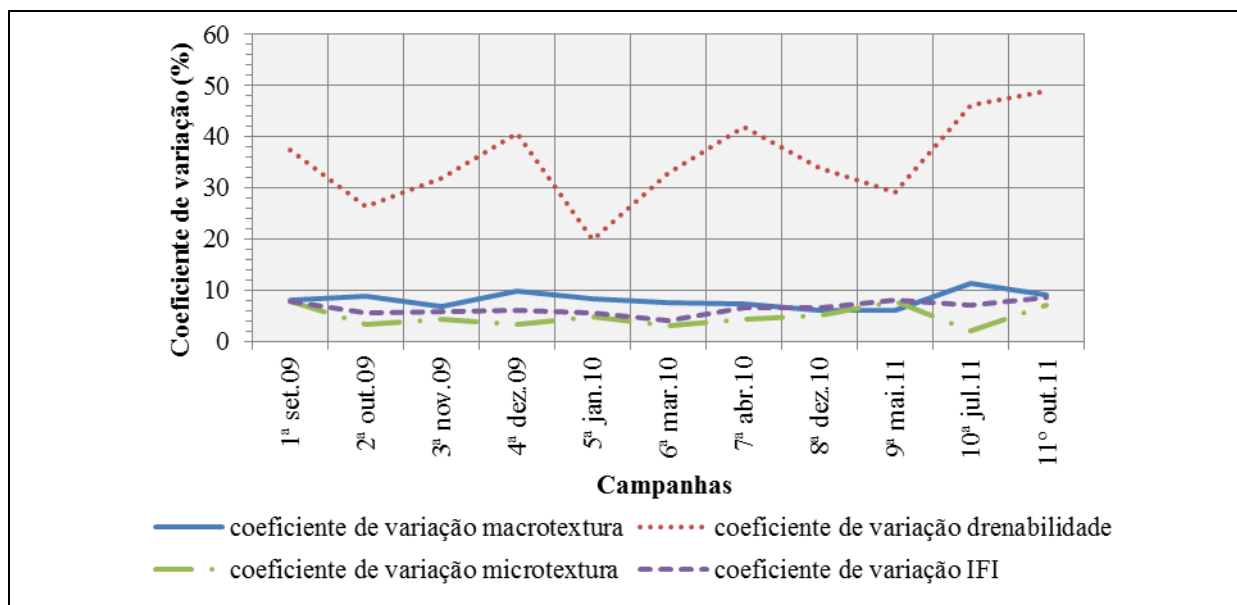


Figura 4.40: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do RAUD – trecho Norte desta pesquisa

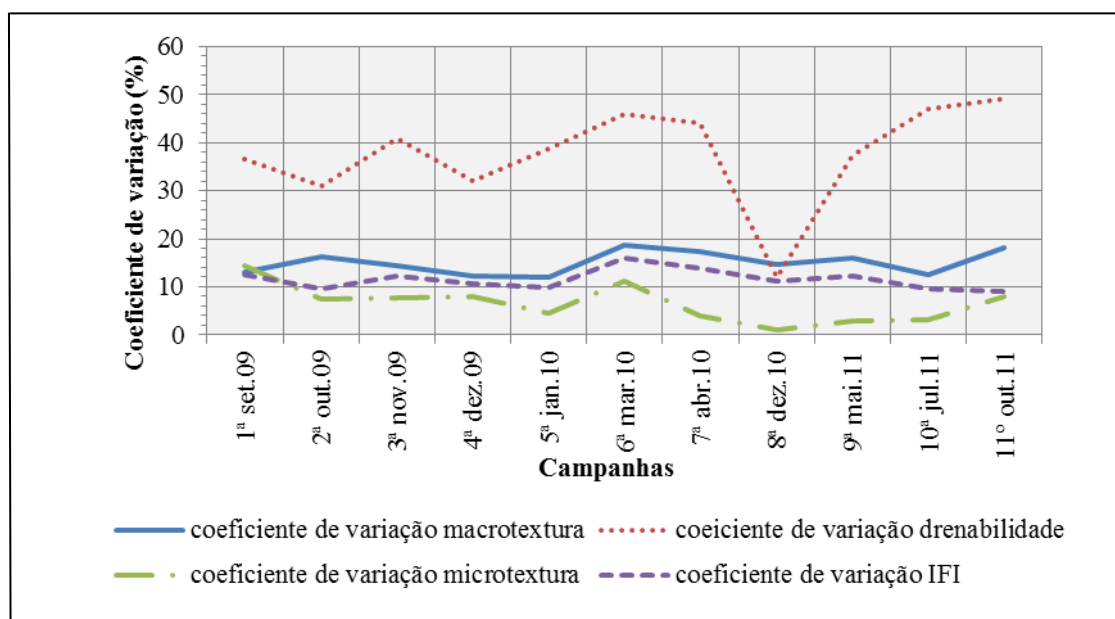


Figura 4.41: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do RAUD – trecho Sul desta pesquisa

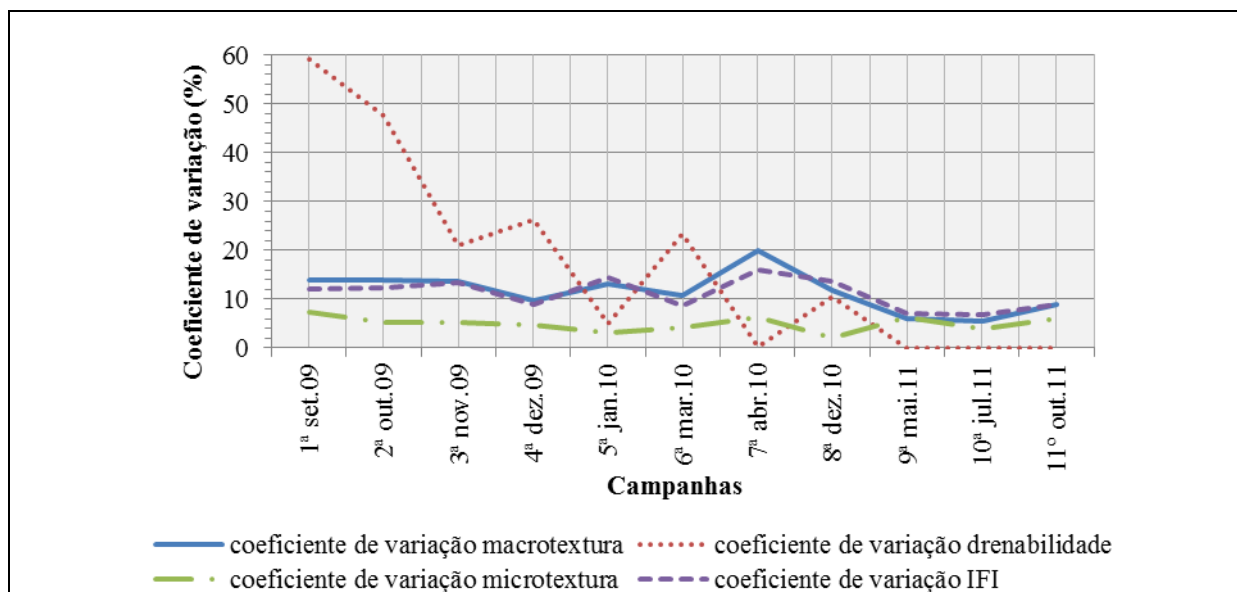


Figura 4.42: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do CA – trecho Norte desta pesquisa

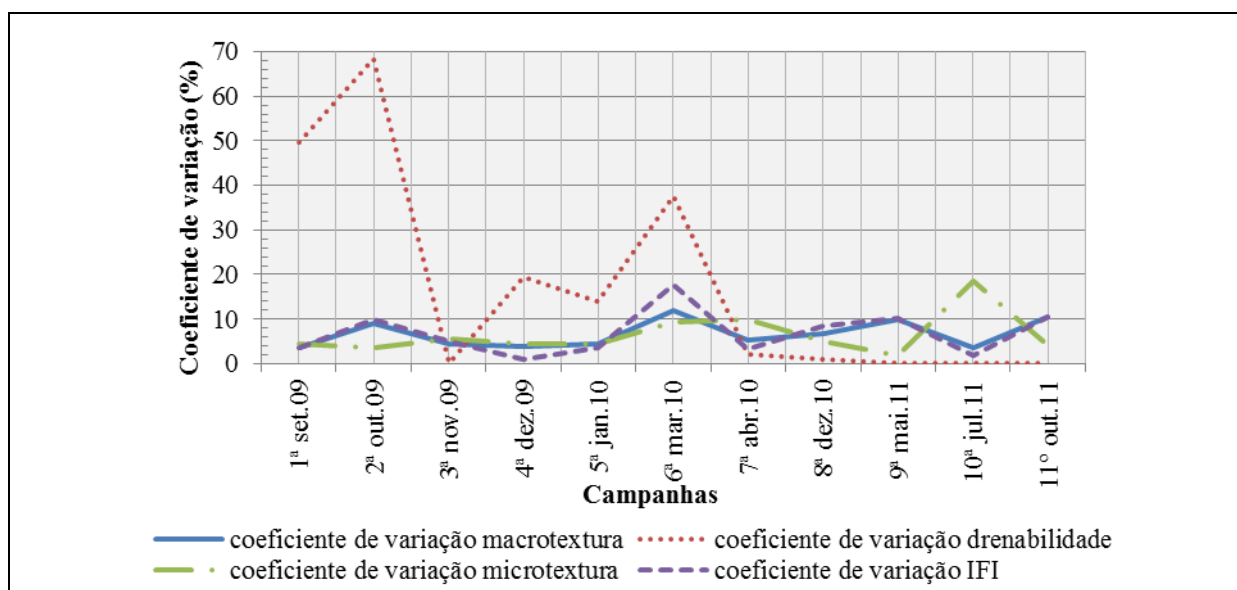


Figura 4.43: Coeficiente de variação para os parâmetros de avaliação da aderência do CA – trecho Sul desta pesquisa

Com base na análise dos resultados apresentados nas Figuras 4.40 a 4.43, as seguintes considerações podem ser feitas:

- a) a dispersão dos valores medidos de drenabilidade para o RAUD, sentidos Norte e Sul, obtidos para cada campanha de monitoramento, são extremamente elevados quando comparados com os de macrotextura, microtextura e cálculo do IFI F(60);

- b) conforme já observado neste estudo, tendo em vista as limitações do ensaio de drenabilidade para misturas asfálticas com graduação contínua e textura superficial de média a fechada, os coeficientes de variação (CVs) correspondentes para a seção de controle em CA não devem ser considerados;
- c) o autor sugere que o ensaio de drenabilidade seja empregado somente para a verificação do efeitos da textura superficial na drenagem da água em revestimentos asfálticos de graduação densa (volume de vazios com ar entre 3 a 6%) e que apresentam macrotextura de média a grossa. Para a avaliação da capacidade de escoamento da água superficial em revestimentos asfálticos porosos, com alto volume de vazios interconectados, tais como a CPA e o RAUD, resulta mais apropriado à utilização do ensaio de permeabilidade.
- d) os valores de macrotextura / mancha de areia apresentam maior variabilidade em relação aos valores medidos de microtextura / Pêndulo Britânico para as seções-teste do RAUD e de controle em CA;
- e) de maneira geral, a dispersão dos valores calculados de aderência pneu-pavimento IFI F(60) para cada campanha de monitoramento podem ser considerados mais altos para o trecho experimental no sentido Sul de ambas as seções, em rampa ascendente, quando comparados ao sentido Norte, em declive. Essa variabilidade de resultados no sentido Sul pode ser atribuída a maior tração e tempo de aplicação das cargas de tráfego com o fechamento heterogêneo da macrotextura superficial.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O objetivo principal da presente pesquisa foi estudar o desempenho do revestimento asfáltico ultra delgado, disponibilizando uma nova tecnologia construtiva ou de manutenção asfáltica, durável e econômica, para a adequada proteção da estrutura do pavimento, bem como para a melhoria das suas condições funcionais de segurança, conforto ao rolamento e redução de ruído.

Para atender ao objetivo principal, buscou-se um maior conhecimento da qualidade dos materiais, procedimentos de dosagem, processo construtivo, equipamentos e controles tecnológicos, além da definição do campo de aplicação e limitações da técnica.

Também foi realizado um estudo de laboratório e de campo, entre o revestimento ultra delgado e o concreto asfáltico, ambos projetados com o mesmo tipo de ligante elastomérico, com os seguintes objetivos específicos:

- a) comprovar a funcionalidade do revestimento asfáltico ultra delgado para correção das condições de superfície e reabilitação de pavimentos, sob tráfego rápido, intenso e pesado;
- b) estabelecer um método de laboratório próprio para o procedimento de dosagem do revestimento asfáltico ultra delgado;
- c) avaliar eventuais necessidades de modificações nos procedimentos de operação das usinas de asfalto, equipamentos de espalhamento e compactação, bem como nos controles executivos desse serviço;
- d) avaliar eventuais necessidades de modificações nos métodos e/ou procedimentos usualmente utilizados para a determinação das condições de aderência, atrito e ruído ambiental do revestimento asfáltico;
- e) propor um procedimento executivo e de controle tecnológico para o revestimento asfáltico ultra delgado.

Considerando os estudos de dosagem referentes aos programas experimentais de laboratório e de campo, conclui-se que:

- a) a seleção adequada dos componentes da mistura asfáltica ultra delgada, empregando agregados de alta qualidade e ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos, bem como de graduações descontínuas com elevada interação entre os agregados graúdos, melhoram as propriedades mecânicas do RAUD, tais como: resistência à tração e ao cisalhamento da mistura (melhor coesão), ao desgaste e a desagregação pela ação do tráfego e por umidade induzida (melhor adesividade);
- b) a descontinuidade granulométrica é essencial para a obtenção de valores adequados de macrotextura superficial. A fração de agregado que passa na peneira de abertura 4,75 mm e é retida na peneira de abertura 2,36 mm deve ser controlada em relação ao peso total de agregados que integram a composição granulométrica;
- c) da análise dos resultados do estudo de dosagem da mistura ultra delgada para a execução do trecho experimental, verificou-se que valores de 4,02% e 3,91%, referentes à deformação permanente a 60°C, 3.000 ciclos, obtidos no simulador de tráfego LPC, para os teores de 5,5% e 5,0 % de AMP 55/75-E, respectivamente, são inferiores ao limite máximo de 15% determinado para o revestimento delgado do tipo BBTM 0/10 Classe 1, segundo a norma francesa XP P 98-137 (AFNOR, 2001b);
- d) observou-se também que o valor de 8,54%, referente à deformação permanente a 60°C, 30.000 ciclos, diminuiu para 6,85% quando o teor de ligante da mistura ultra delgada foi reduzido de 5,5 para 5,0 %, respectivamente. Esse resultado de deformação permanente (6,85%) no teor de 5,0% de AMP 55/75-E é ligeiramente superior ao resultado de 4,9%, referente à deformação permanente a 60°C, 30000 ciclos para as placas do concreto asfáltico moldadas para a execução da seção de referência do trecho experimental, no teor de projeto de 4,6% de AMP 55/75-E, bem como ao limite máximo de 5,0%, estabelecido pelas diretrizes de dimensionamento europeias do Grupo COST 333, para as misturas asfálticas densas sob tráfego pesado. Portanto, a partir da análise dos resultados de deformação permanente no simulador de tráfego LPC, conclui-se que a estabilidade mecânica do RAUD não deve comprometer seu desempenho funcional (“fechamento” da macrotextura superficial) sob tráfego pesado.

Com base na análise dos resultados dos estudos de dosagem referentes aos programas de laboratório e de campo, são propostos os seguintes requisitos técnicos e valores limites experimentais para a seleção do teor de ligante de projeto do RAUD:

- a) parâmetros volumétricos Marshall e de relação filer-ligante asfáltico para o RAUD, em corpos de prova moldados com 50 golpes por face,:

$$(10 \% \leq V_v \leq 18 \%), (33 \% \leq RBV \leq 65 \%) \text{ e } (18 \% \leq VAM \leq 28 \%)$$

$$(0,9 \leq \text{relação filer/ligante} \leq 1,4)$$

- b) película de ligante asfáltico de no mínimo 9,0  $\mu\text{m}$  de espessura e compatível com resultados adequados de resistência da mistura asfáltica à desagregação (resistência à tração por compressão diametral  $> 0,65 \text{ MPa}$ ), ao dano por umidade induzida ( $RRT \geq 80\%$ ) e ao desgaste por abrasão (ensaio Cantabro);
- c) existência do contato grão-grão da mistura asfáltica e valores máximos de 15% de deformação permanente a  $60^\circ\text{C}$ , 3.000 ciclos no simulador de tráfego LPC, para assegurar intertravamento da estrutura mineral e a estabilidade mecânica (manutenção da macrotextura) do RAUD;
- d) sensibilidade ao escorrimento do ligante asfáltico inferior a 0,1% de modo a evitar a sua dosagem excessiva na mistura.

Em relação à construção do trecho experimental desta pesquisa, verificou-se os seguintes aspectos operacionais e de controle tecnológico:

- a) o emprego do processo de aplicação da emulsão asfáltica (membrana elástica de impermeabilização/ligação) e do RAUD, realizado em duas etapas, utilizando equipamentos convencionais, mostrou-se operacionalmente viável, conforme relatado por Brosseaud (1999). Ao longo do período de monitoramento do trecho experimental (29 meses), o RAUD apresentou comportamento satisfatório sem ocorrências de defeitos por “descolamento ou destacamento” do revestimento superficial;

- b) observou-se que, as irregularidades longitudinais e/ou transversais da camada asfáltica subjacente, devem ser corrigidas previamente com massa asfáltica de graduação fina a quente ou microrrevestimento asfáltico a frio (camada de nivelamento) para a correção das deformações da superfície do revestimento antigo e a selagem de fissuras existentes;
- c) um aspecto de grande relevância é a rápida velocidade de esfriamento da massa, bem maior que a usualmente verificada para o concreto asfáltico – CA; isso ocorre devido a sua graduação mais grossa e espessura delgada quando aplicada em condições ambientais adversas (alta umidade, baixas temperaturas e alta velocidade do vento) podendo ocasionar desagregações e outros defeitos prematuros, se não compactada em tempo hábil. Portanto, a usina de asfalto e a frota de veículos de transporte devem operar em sincronia, assegurando o fornecimento contínuo da mistura para evitar paradas da acabadora sobre o novo revestimento. A aplicação da mistura deve ser realizada imediatamente após a execução da camada impermeabilizante e de ligação;
- d) verificou-se que o controle da velocidade da vibro acabadora ( 2 a 3 km/h) e da espessura da camada ultra delgada são fundamentais para assegurar a qualidade do serviço. A distribuição da massa deve ser executada com vibro acabadora dotada de sistema de nível eletrônico. A espessura mínima e máxima do revestimento deve estar limitada entre 20 mm e 30 mm, respectivamente;
- e) a temperatura mínima de distribuição da mistura deve ser superior a 135°C, sendo a temperatura inicial de rolagem a mais elevada que a mistura asfáltica possa suportar sem ocorrência de fissuras ou fluência, em geral entre 145 a 155°C. A compactação do RAUD deve ser realizada imediatamente após a passagem da vibro acabadora e apenas com rolos lisos, sem vibração.

No Anexo B é proposto um procedimento construtivo e de controle tecnológico para o RAUD, baseado na revisão bibliográfica e nas discussões dos resultados apresentados neste estudo.

A partir da análise dos resultados do programa de campo, considerando o trecho experimental, constituído por uma seção-teste em RAUD (20 mm) e outra de controle em CA (30 mm),

construído sobre um segmento de rodovia que apresentava condições estruturais e deflexões máximas médias semelhantes, conclui-se que:

- a) após o período de monitoramento do trecho experimental ( $(N_{USACE} \geq 1,77 \times 10^7$  e 26 meses) ambas as camadas de rolamento reduziram as deflexões máximas originais aumentando a capacidade estrutural do pavimento pela mesma ordem de magnitude. Também as medidas de afundamentos em trilhas de roda e os raios de curvatura, medidos em ambas as seções, apresentaram valores semelhantes. Embora a contribuição do RAUD para a capacidade estrutural seja pequena, pode também contribuir indiretamente para a melhoria do comportamento mecânico do pavimento devido à impermeabilização da estrutura (membrana elástica);
- b) as boas características de atrito e aderência do RAUD, monitoradas no trecho experimental desta pesquisa, podem ser atribuídas ao tamanho nominal máximo (6 ou 10 mm), e a qualidade dos agregados (100% britados com boa resistência mecânica à abrasão e ao polimento, forma predominantemente cúbica, textura superficial rugosa, etc.), bem como a graduação descontínua da composição da mistura. A resistência à derrapagem é função da micro e macrotextura superficial. A microtextura está relacionada à resistência ao polimento dos agregados e depende da sua área de contato com os pneumáticos. A macrotextura depende da graduação dos agregados da mistura asfáltica e de sua capacidade em drenar a água da superfície;
- c) em função das limitações do ensaio de drenabilidade para misturas asfálticas com graduação contínua e textura superficial de média a fechada, o autor sugere o emprego desse método somente para a verificação dos efeitos da textura superficial no escoamento da água em revestimentos asfálticos de graduação densa (volume de vazios com ar entre 3 a 6%) e que apresentam macrotextura de média a grossa;
- d) para a avaliação da capacidade de escoamento da água superficial em revestimentos porosos, com alto volume de vazios interconectados, tais como a CPA e o RAUD, resulta mais apropriado à utilização do ensaio de permeabilidade. Também o ensaio de mancha de areia pode ser utilizado para avaliações da capacidade de escoamento da água do RAUD, devido a forte

correlação do método com o ensaio de drenabilidade, bem como sua simplicidade de execução e baixa dispersão dos resultados obtidos nesta pesquisa;

- e) já a redução do ruído no RAUD desta pesquisa de campo, pode ser creditada a concepção da mistura asfáltica; tamanho nominal máximo (6 mm), volume de vazios ( 10 a 18%), textura superficial negativa e espessura adequada (20 a 30 mm);
- f) o ligante modificado por polímeros elastoméricos não contribui diretamente para a redução da pressão sonora e melhoria das condições de aderência e atrito, porém seu emprego é de fundamental importância para a durabilidade e desempenho funcional (segurança, conforto acústico e ao rolamento) do RAUD;
- g) os resultados do estudo mostram que o RAUD é uma alternativa técnica de bom desempenho funcional para a implantação, conservação e restauração de rodovias e vias urbanas brasileiras. A textura superficial grossa ou aberta do revestimento pode aumentar a resistência à derrapagem e a drenagem da água superficial, bem como reduzir a hidroplanagem e o efeito “*spray*” em relação às misturas asfálticas convencionais. Essas características técnicas tendem a melhorar as condições de visibilidade e a segurança do usuário em situações de ultrapassagem, frenagem ou manobras emergenciais sob altas velocidades em pavimentos molhados;
- h) o RAUD desta pesquisa de campo é classificado como um revestimento silencioso, com redução de pelo menos 67% na energia acústica, em relação ao concreto asfáltico tradicionalmente utilizado. O RAUD pode ser empregado em camadas de rolamento de rodovias, túneis, viadutos, vias expressas e urbanas que requeiram atenuação do ruído causado pelo tráfego e melhorias nas condições de conforto acústico do meio ambiente;
- i) à luz dos resultados obtidos no monitoramento do trecho experimental, pode-se esperar um bom compromisso entre suas principais características técnicas (resistência, durabilidade, segurança, conforto sonoro) e econômicas (baixa espessura e produtividade);

Como recomendações finais, autor sugere a continuidade dos estudos do tema proposto a partir do desenvolvimento de programas experimentais de laboratório e de campo utilizando tipos de graduações usualmente utilizadas para o RAUD, conforme proposto por Hanson (2001) e ligantes asfálticos modificados por polímeros, com maior ponto de amolecimento e recuperação elástica, em condições de tráfego, clima e de infraestrutura do pavimento distintos.

Na etapa de projeto de dosagem da mistura, o autor recomenda a utilização do Compactador Giratório Superpave® (CGS) e a verificação complementar da estabilidade mecânica, no simulador de tráfego LPC, para a definição do teor de ligante de projeto do RAUD. Objetivando melhor reprodução do desempenho em serviço, a mistura asfáltica ultra delgada deverá ser moldada na espessura de 25 mm sobre um substrato constituído por uma placa de mistura asfáltica densa (CA) com espessura de 25 mm. A mistura asfáltica densa do substrato em CA deve ter boa resistência aos afundamentos em trilha de roda para uma avaliação adequada da estabilidade mecânica e da durabilidade da macrotextura superficial do RAUD. A pintura de ligação entre as placas de CA e de RAUD deve ser feita com emulsão asfáltica elastomérica, cuja taxa e demais requisitos técnicos devem estar previstos no projeto do RAUD.

Os resultados dos programas experimentais de campo referentes ao desempenho funcional do RAUD (avaliação da qualidade ao rolamento, ruído ambiental e das condições de segurança) contribuirão para o desenvolvimento da técnica. A identificação de superfícies com baixo coeficiente de atrito podem ainda estabelecer ações preventivas na área de engenharia de tráfego e procedimentos de gestão para minimizar a ocorrência de acidentes por deficiência das condições de aderência do pavimento.

O autor também sugere o estudo de revestimentos asfálticos ultra delgados mornos a partir do grupo de tecnologias denominado “*warm mix asphalt – WMA*” visando à pesquisa e desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- a) redução da temperatura de produção e aplicação e do consumo energético;
- b) melhor recobrimento dos agregados;
- c) redução do envelhecimento de curto prazo do ligante asfáltico;

- d) redução da velocidade de resfriamento da mistura asfáltica ultra delgada e, conseqüentemente, aumentando o tempo de rolagem e a eficiência de compactação;
- e) melhoria das condições de segurança, meio- ambiente e saúde – SMS.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T-283**: Standard method of test for resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage, Washington, 1989.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T- 305**: Standard method of test for determination of raindown characteristics in uncompacted asphalt mixtures. Washington, 1997.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP-58**: standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the micro-deval apparatus. Washington, 2000.

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

\_\_\_\_\_. **Planilha de retiradas de asfaltos por refinaria**. ABEDA, Rio de Janeiro, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . **NBR 7731**: Guia de execução de serviços de medição de ruído aéreo e avaliação dos seus efeitos sobre o homem. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 6954**: lastro padrão: determinação da forma do material, Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 14329**: Cimento asfáltico de petróleo: determinação expedita da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos, Rio de Janeiro, 1999.

\_\_\_\_\_. **NBR 6570**: Emulsões asfálticas - determinação da sedimentação. Rio de Janeiro, 2000a.

\_\_\_\_\_. **NBR 10151**: Acústica - avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade-procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2000b.

\_\_\_\_\_. **NBR 6293**: Materiais betuminosos : determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, Brasil, 2001a.

\_\_\_\_\_. **NBR 14376**: Materiais asfálticos - determinação do efeito do calor e do ar - método da película delgada. Rio de Janeiro, 2001b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14746**: Microrrevestimentos e lamas asfálticas: determinação da perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, Brasil, 2001c.

\_\_\_\_\_. **NBR 14757**: Microrrevestimentos e lamas asfálticas: determinação da adesividade de misturas. Rio de Janeiro, 2001d.

\_\_\_\_\_. **NBR 14758**: Microrrevestimentos: determinação do tempo mínimo de misturação. Rio de Janeiro, 2001e.

\_\_\_\_\_. **NBR 14798**: Microrrevestimentos asfálticos: determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro. Rio de Janeiro, 2002a.

\_\_\_\_\_. **NBR 14841:** Microrrevestimentos à frio: determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT. Rio de Janeiro, 2002b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14855:** Materiais betuminosos - determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro, 2002c.

\_\_\_\_\_. **NBR 14948:** microrrevestimentos asfáltico a frio modificados por polímero – materiais, execução e desempenho. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **NBR 14949:** Microrrevestimentos asfálticos - caracterização da fração fina por meio da absorção de azul-de-metileno. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14950:** Materiais betuminosos- Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, Brasil, 2003c.

\_\_\_\_\_. **NBR 11341:** Derivados de petróleo: determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15086:** Materiais betuminosos: determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15087:** Misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2004c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15140:** Misturas asfálticas: determinação do desgaste por abrasão cantabro. Rio de Janeiro, 2004d.

\_\_\_\_\_. **NBR 15166:** Asfalto modificado : ensaio de separação de fase. Rio de Janeiro, Brasil, 2004e.

\_\_\_\_\_. **NBR 15184:** Materiais betuminosos : determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004f.

\_\_\_\_\_. **NBR 6299:** Emulsões asfálticas - determinação do pH. Rio de Janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6568:** Emulsões asfálticas - determinação do resíduo de destilação. Rio de Janeiro, 2005b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14393:** Emulsões asfálticas - determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 6560:** Materiais betuminosos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2007a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576:** Materiais asfálticos - determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14491:** Emulsões asfálticas - determinação da viscosidade saybolt furol. Rio de Janeiro, 2007c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15528:** Aditivos orgânicos melhoradores de adesividade para cimento asfáltico de petróleo: Avaliação para recebimento. Rio de Janeiro, 2007d.

\_\_\_\_\_. **NBR 6569**: Emulsões asfálticas catiônicas - determinação da desemulsibilidade. Rio de Janeiro, 2008a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15573**: Misturas asfálticas - determinação da massa específica aparente de corpos-de-prova compactados. Rio de Janeiro, 2008b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15617**: Misturas asfálticas: resistência ao dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15618**: Cimento asfáltico de petróleo: Avaliação por desempenho de aditivos orgânicos melhoradores de adesividade. Rio de Janeiro, 2008d.

\_\_\_\_\_. **NBR 15619**: Misturas asfálticas - determinação da massa específica aparente máxima medida em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2008e.

\_\_\_\_\_. **NBR 6300**: Emulsões asfálticas catiônicas - determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6567**: Emulsões asfálticas - determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15235**: Materiais asfálticos - determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009c.

AFNOR – ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P 98-253-1**: Essais relatifs aux chaussées - Deformation permanente des mélanges hydrocarbonés – Partie 1: Essai d'orni'wage. France, 1991a.

\_\_\_\_\_. **NF P 98-250-2**: Essais relatifs aux chaussées - Préparation des mélanges hydrocarbonés - partie 2: compactage des plaques. France, 1991b.

\_\_\_\_\_. **NF P 98-216-1**: Essais relatif aux chaussées – détermination de la macrotexture – partie 1: essai de hauteur au sable vraie (HSv). France, 1992.

\_\_\_\_\_. **NF XP P 98-137**: enrobés hydrocarbonés – couche de roulement: béton bitumineux très mince. France, 2001.

\_\_\_\_\_. **NF EN 13036-1**: caractéristiques de surface – méthodes d'essai – partie 1: mesurage de La profondeur de macrotexture de la surface du revêtement à l'aide d'une technique volumétrique, France, 2002a.

\_\_\_\_\_. **NF P 98-251-1**: essais relatifs aux chaussées – essais statique sur mélanges hydrocarbonés – partie 1: essais duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud. France, 2002b.

\_\_\_\_\_. **NF EN 12697-22**: essais relatifs aux chaussées – déformation permanente dès mélanges hydrocarbonés – partie 22: essai d'orni'wage. France, 2004.

\_\_\_\_\_. **NF EN 12697-31**: mélanges bitumineux – méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – partie 31: confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire (PCG). France, 2005.

AGNUSDEI, J. O. Misturas Mornas. Novas alternativas para fabricação. **Asfalto em Revista**, ano III, nº 15 p. 22-25, Jan./Fev. 2011.

ALVES, T. S. F. **Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários**: Aplicação prática do radar de prospecção e do deflectómetro de impacto. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

AMARANTE JR., F.G.A.; SOUZA, F.S.V.; SANT'ANNA, F.M.G.; OLIVEIRA, P.C.A. **Fresagem fina como medida de melhoramento da segurança da rodovia Presidente Dutra no trecho da serra das Araras**. 36º Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba, 2005.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira: 2010**. São Paulo, 2010.

APRG – AUSTRROADS PAVEMENT RESEARCH GROUP. **Technical Note 8**: Ultra thin asphalt surfacing. Sidney, 1999.

APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – international friction index para revestimentos asfálticos**. 179 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

APS, M.; BERNUCCI L. L. B.; REIS R. M. M.; MACHADO FILHO P. R. **Medidas de macro e microtextura em revestimento do tipo SMA- stone matrix asphalt - em seção teste da via Anchieta**. Trabalho apresentado na 34. Reunião Anual de Pavimentação da ABPV, Campinas, 2003a.

APS, M.; BERNUCCI, L. L. B.; COSTA, A. L. A.; QUINTANILHA, J. A.; FILHO, P. R. M. Aderência pneu-pavimento obtida por meio de ensaios de macro e microtextura e em provas de frenagem com veículos comerciais. **Revista Estradas**, Porto Alegre, n. 5, p. 31-37, nov. 2003b.

APS, M.; FILHO, O. S. R.; BERNUCCI, L. B.; QUINTANILHA, J. A.; DARONCHO, C. **Avaliação de superfícies antiderrapantes de pavimentos aeroportuários**. Trabalho apresentado no XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, 2003c.

APS, M.; BERNUCCI, L. L. B. Medidas de macrotextura e microtextura e valores de aderência em revestimentos asfálticos visando a segurança viária. **Boletim Informativo**. Rio de Janeiro, n. 173, Encarte, 1º semestre, 2004a.

APS, M.; BERNUCCI, L. L. B.; FABRICIO, J. M.; FABRICIO, J. V. F. **Classificação da aderência pneu-pavimento por meio de um índice combinado, de macro e microtextura IFI - international friction index**. Trabalho apresentado no 9. Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Rio Grande do Norte, 2004b.

ASPHALT INSTITUTE. **ES-10**: Cause and prevention of stripping in asphalt. Second edition. College Park, Maryland, USA, 1987.

\_\_\_\_\_. **MS-2**: Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types, USA, 1995.

\_\_\_\_\_. **SP-1**: Performance graded asphalt binder specification and testing. Superpave® Series N° 1 (SP-1), USA, 1997.

\_\_\_\_\_. **MS-4**: The asphalt handbook. Manual Series, n. 4 (MS-4), USA, 2007.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3203**: percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures. ASTM Standards, 1994.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5/97**: penetration of bituminous materials. ASTM Standards, 1997a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2872**: effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). ASTM Standards, 1997b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6084**: elastic recovery of bituminous materials by ductilometer. ASTM Standards, 1997c.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 303/93 (1998)**: Standard Method for Measuring Frictional Properties Using The British Pendulum Tester. ASTM Standards, 1998.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 113/99**: ductility of bituminous materials. ASTM Standards, 1999.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 244/00**: standard test methods and practices for emulsified asphalts. ASTM Standards, 2000a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 3319**: accelerated polishing of aggregates using the british wheel. ASTM Standards, 2000b.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 1960/98**: Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface: ASTM Standards, 2000c.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2042/01**: solubility of asphalt materials in trichloroethylene. ASTM Standards, 2001a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5821**: determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. ASTM Standards, 2001b.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 965/96**: standard method for measuring surface macro texture depth using a volumetric technique frictional properties using the british pendulum tester. ASTM Standards, 2001c.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2419**: sand equivalent value of soils and fine aggregate. ASTM Standards, 2002a.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 867/02**: vehicle-pavement systems, ASTM Standards, 2002b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6936**: determining demulsibility of emulsified asphalt. ASTM Standards, 2004.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 88/05**: standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. ASTM Standards, 2005.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 131/06**: standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. ASTM Standards, 2006a.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 1252/06**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading).ASTM Standards, 2006b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4402**: standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. ASTM Standards, 2006c.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 127/07**: standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. ASTM Standards, 2007a.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 128/07**: standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. ASTM Standards, 2007b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6933**: standard test method for oversized particles in emulsified asphalts (sieve test). ASTM Standards, 2008a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6934**: standard test method for residue by evaporation of emulsified asphalt. ASTM Standards, 2008b.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 1552/09**: standard practice for capping concrete masonry units, related units and masonry prisms for compression testing .ASTM Standards, 2009a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 36 / D36M / 09**: standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). ASTM Standards, 2009b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4867 / D4867M / 09**: Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures. ASTM Standards, 2009c.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 102 / E102M /93(2009)**: standard test method for Saybolt Furol viscosity of bituminous materials at high temperatures. ASTM Standards, 2009c.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4791**: standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. ASTM Standards, 2010a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6930**: standard test method for settlement and storage stability of emulsified asphalts. ASTM Standards, 2010b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 92/11**: standard test method for flash and fire points by cleveland open cup tester. ASTM Standards, 2011a.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5871**: Standard Specification for Benzene for Cyclohexane Feedstock. ASTM Standards, 2011b.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6390**: standard test method for determination of draindown characteristics in uncompacted asphalt mixtures. ASTM Standards, 2011c.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 7173**: standard practice for determining the separation tendency of polymer from polymer modified asphalt. ASTM Standards, 2011d.

BERNUCCI, L. L. B. **Revestimentos Asfálticos Descontínuos e Delgados**. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 2005.

BERNUCCI, L. L. B.; CERATTI, J. A. P.; MOURA, E.; CHAVES, J. M.; CARVALHO, A. D. **Estudo de adesividade no comportamento de misturas asfálticas**. In: COONGRESSO ÍBERO-LATINOAMERICANO DO ASFALTO, 10., 1999, Sevilla. **Anais...** Madri: Asociación Espanola de La Carretera, 1999. v. 1. p. 383-396

BERNUCCI, L. L. B.; MOURA, E.; LEITE, L. F. M. Efeito do uso de asfaltos modificados nas propriedades mecânicas dos revestimentos asfálticos. In: RODO 2002 – SIMPÓSIO SOBRE OBRAS RODOVIÁRIAS, 2., 2002, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2002. p. 147-157

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.

BOLZÁN, P. E. **Pavimentación asfáltica em bajos espesores**. In: XI Congreso Iberoamericano del Asfalto, Lima, 2001.

\_\_\_\_\_. Sistemas de pavimentación de bajos espesores. **In: Artículo técnico Bitafal asfaltos**, Uruguai, 2009. Disponível em: <http://www.bitafal.com/newsletter/newsletter>. Acesso em: 15/04/2011.

BRASIL será 5ª maior economia do mundo em 2025, aponta pesquisa. **O Globo**, Rio de Janeiro, 22 jan. 2010. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/economia/mat/2010/01/22/pesquisa>. Acesso em: 11/04/2011.

BRENEMAN, E. J. Ultrathin bonded wearing course (NOVACHIP®). Disponível em: <http://www.ejbreneman.com/novachip.html>. Acesso em: 01/08/2006.

BROSSEAUD, Y. Evolución y perspectivas de futuro de las mezclas en caliente utilizadas em la conservación de carreteras. **Revista Carreteras**, Espanha, n. 91, p. 75-93, 1997-b.

\_\_\_\_\_. **Very thin and ultra-thin wearing courses using hot-mixed bituminous materials – A review of use and performance**. In: Proceedings of 78<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999.

\_\_\_\_\_. Revestimentos asfálticos franceses – Panorama das técnicas, balanço e comportamento. In: Encontro do Asfalto, 16., 2002, Rio de Janeiro. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 2002.

\_\_\_\_\_. Propriedades das superfícies dos pavimento em relação à segurança e conforto dos usuários. In: Encontro do Asfalto, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 2002.

BROSSEAUD, Y. New mix designs for French wearing courses. Assessment of surface characteristics. State of art VTAC - UTAC. França : SETRA/LCPC, 2005.

BROSSEAUD Y.; ANFOSSO-LEDEE, F. Surface pavements with low rolling noise level and high adherence: evaluation of the French researches, development of the products. Eurobitume – Eurasphalt – Vienne, 2004.

CALTRANS – CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Technical Advisory Guide (TAG) for Bonded Wearing Course Pilot Projects**. USA, 2003a.

\_\_\_\_\_. **ASPHALT RUBBER USAGE GUIDE**. USA, 2003b.

CCR ENGELOG. **Especificação particular para a execução de concreto betuminoso a quente**. São Paulo, 1999.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2010.

COMISION PERMANENTE DEL ASFALTO. Proyecto de especificaciones técnicas generales para mezclas asfálticas de bajo espesor en carpetas de rodamiento. Version 2010. Argentina, 2010.

CRESENDIO, J. E. Estradas federais registram número recorde de mortes. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 09 set. 2010.

DENATRAN – DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Número de veículos automotores do país**. Disponível em <http://denatran.gov.br>. Acesso em 16/02/2011.

DER/PR – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 15/2005**: Concreto asfáltico usinado à quente com asfalto polímero. Paraná, 2005.

\_\_\_\_\_. **Relatório de projeto executivo de engenharia para restauração de pavimento. Rodovia PR-092. Trecho: Wenceslau Braz – Jaguariaíva**. Curitiba, 2009.

DER/SP – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/031**: concreto asfáltico tipo SMA. São Paulo, 2007.

DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, STATE OF CALIFORNIA. **California test 331**: method of test for residue by evaporation of latex modified emulsified asphalt. Califórnia, USA, 1998.

\_\_\_\_\_. **California test 332**: method of test for recovery from deformation of latex modified asphalt emulsion residue. Califórnia USA, 2000.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 078/94**: agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994a.



\_\_\_\_\_. **DNER-ME 024/94**. Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 089/94**: agregado: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994c.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 117/94**: mistura betuminosa - determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994d.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 138/94**: misturas betuminosas: determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994e.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043/95**: misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 054/97**: agregado: equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997a.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 153/97**: agregados em estado compactado seco – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1997b.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035/98**: agregado: determinação da abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998a.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081/98**: agregado: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98**: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998c.

\_\_\_\_\_. **DNER-ES 386/99**: pavimentação: pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

**DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 386/1999 – ES**: pavimentos flexíveis: pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

\_\_\_\_\_. **DNIT 006/2003 – PRO**: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 007/2003 – PRO**: Levantamento para a avaliação da condição de superfície de sub-trecho homogêneo de rodovias de pavimento flexível e semi-rígido para gerência de pavimentos e estudos de projetos. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. **DNIT 035/2005 – ES**: pavimentos flexíveis: micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **IPR 720**: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 031/2006 – ES**: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006b.

\_\_\_\_\_. **DNIT 111/2009 – EM:** pavimentação flexível. Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “terminal blending”. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 112/2009 – ES:** pavimentos flexíveis. Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “terminal blending”. Rio de Janeiro, 2009b.

FERREIRA, P. N. **Estudo da Utilização de Revestimentos Asfálticos Delgados a Quente para Pavimentos Tipo BBTM no Brasil.** 200f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FEHRL – FORUM EUROPEAN NATIONAL HIGHWAY RESEARCH LABORATORIES. **Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces.** Report 2006/02, Belgium, 2006.

FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **FHWA-SA-94-051:** Surface Rehabilitation Techniques – State of the Practice Design, Construction, and Performance of Micro-surfacing. Washington, 1994.

FMI – FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL. **Relatório macroeconômico do Brasil.** Disponível em: <http://www.imf.org>. Acesso em: 16/02/2011.

GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Pesquisa de Interrelacionamento de Custos Rodoviários - PICR.** Brasília, 1982. Relatório Final, 12 v.

HANSON, D. I.; **Construction and performance of an ultrathin bonded hot-mix asphalt wearing course.** Transportation Research Record 1749, TRB, National Research Council. Washington, D.C., 2001.

HARRIS, S.; MESSMER, P.; HILL, J. **Thin Wearing Courses.** In: 61<sup>st</sup> Annual School for Highway Superintendents, Ithaca, 2006.

HUNTER, R. N. **Asphalts in road construction.** London: Thomas Telford Publishing, 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010:** população do Brasil é de 190.732.694 pessoas. 29 nov. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 16/02/2011.

IBP – INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Asfalto Modificado com Polímeros. **Informativo O Asfalto.** Rio de Janeiro, ano 6, n. 1, p. 1-8, mai. 1995.

\_\_\_\_\_. Asfalto Modificado com Polímeros. **Informativo O Asfalto.** Rio de Janeiro, ano 7, n. 1, p. 1-6, mai. 1996.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Rodovias brasileiras: gargalos, investimentos, concessões e preocupações com o futuro.** Comunicados do IPEA N. 52. Brasília, 2010.

IPIRANGA ASFALTOS. **3º Workshop de inovações tecnológicas.** São Paulo, 2006.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11819-1:** Acoustics: measurement of the influence of road surface on traffic noise: parte 1. Genebra, 1997.

\_\_\_\_\_. **ISO/DIS 13325:** tyres-coast-by-method for measurement of tyre/road sound emission. Genebra, 2001.

ISSA – INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA A 143:** Recommended performance guidelines for micro-surfacing. USA, 2010.

JAIR, M. R. **Capas de rodamento delgadas y ultradelgadas.** Comunicação pessoal, 2003.

KANDHAL, P.S. **Moisture Susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions.** NCAT Report 92-1. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. USA, 1992.

KANDHAL, P.S.; JOHNSON R. R.; LOCKETT. L. **Evaluation and monitoring of Novachip asphalt process in Alabama.** Project 930-303. Alabama Department of Transportation, Montgomery, 1996.

LÁU, V.L.E.S.T. **Estudo comparativo do desempenho acústico de diferentes tipos de revestimento dos pavimentos.** 266 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

LCPC – LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. **Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 207, p. 55-71, Paris, 1997.

\_\_\_\_\_. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobes à chaud.** Réferencer : CR 39, 177 p. Paris, 2006.

METCALF, S; COSTELLO, M. **Bounded Wearing Course.** In: Southern California Pavement Preservation Conference, Diamond Bar, 2006.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES – SECRETARIA NACIONAL DE POLÍTICA DE TRANSPORTES. **Planejamento Rodoviário 2006** – Workshop sobre Asfalto, Fortaleza, 2006.

NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Thin Hot Mix Asphalt Surfacing.** Benefits of Thin Surfacing. Information Series 110. NAPA, Maryland, 8 p, 1996.

\_\_\_\_\_. **Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation.** Information Series 135. NAPA, Maryland, 28 p, 2009.

\_\_\_\_\_. **Warm-Mix Asphalt: Best Practices.** Quality Improvement Publication 125, 2<sup>nd</sup> Edition. NAPA, Maryland, 63 p, 2011

NASCIMENTO, H. R. C.; REIS, R. M. M. **Misturas betuminosas de elevada macrotextura e suas aplicações em aeroportos**. Trabalho apresentado na International Conference Airports: Planning, Infrastructure & Environment, Rio de Janeiro, 2003.

NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **A Mix Design Manual for Hot Mix Asphalt**. NCHRP Report 673. Transportation Research Board, 2011.

NEWCOMB, D. E.; BUNCHER, M.; HUDDLESTON, I. J. **Concepts of Perpetual Pavements**. Transportation Research Circular n. 503, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 04-11, 2001.

NICHOLLS, J. C. **Asphalt Surfacing: A Guide to Asphalt Surfacing and Treatments Used for the Surface Course of Road Pavements**. London: E & FN SPON, 2003.

NICHOLLS, J. C.; CARSWELL, I.; WILLIAMS, J. T. **Durability of thin surfacings in the United Kingdom**. In: 3<sup>rd</sup> International Conference Bituminous Mixtures And Pavements, Thessaloniki, 2002.

OHL BRASIL. **OHL ES 001- Rev. 03/2009**: Especificação particular para execução de concreto asfáltico usinado a quente - CA . Centro de Desenvolvimento Tecnológico, 2009.

PAC – 2 – PROGRAMA DE ACELERAÇÃO DO CRESCIMENTO - 2- 2010. **Portal Brasil**. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/pac>. Acesso em: 08/03/2011.

PIRE – THE PACIFIC INSTITUTE FOR RESEARCH & EVALUATION STUDY. **On a crash course**: The dangers and health costs of deficient roadways. USA, 2009.

PRETORIUS, F.J.; WISE, J.C.; HENDERSON, M. **Development of application differentiated ultra-thin asphalt friction courses for Southern African application**. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, South Africa, 2004.

READ J.; WHITEOAK D. **The Shell bitumen handbook**. Fifth edition. London, 2003.

REIS, R. M. M. Melhoria das condições de superfície do pavimento pode reduzir até 50% dos níveis de acidentes. **Asfalto em Revista**, ano III, n. 13. Set/Out 2010-a.

\_\_\_\_\_. Melhoria das condições de superfície do pavimento pode reduzir até 50% dos níveis de acidentes. **Asfalto em Revista**, ano III, n° 14. Nov/Dez 2010-b.

REIS, R. M. M.; BERNUCCI, L. L. B.; ZANON, A. L. **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado**. Trabalho apresentado no XV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, Campinas, 2001.

RGRA – REVUE GÉNÉRAL DES ROUTES ET DES AÉRODROMES. **Les Enrobés Bitumineux**, vol. 2, Paris, 2005.

RIBEIRO, L. M. B. *et al.* **Medição de macrotextura com equipamento do tipo “outflow meter”**. Trabalho apresentado no CONINFRA — Congresso de infra-estrutura de transportes, São Paulo, 2008.

SANDBERG, U.; EJSMONT, J. **Tyre/road noise reference book**. Kisa. 640p. 2002.

SERFASS, J. P. *et al.* **New type of ultrathin friction course**. **Transportation Research Record 1304, TRB, National Research Council**. Washington, D.C., 1991.

SILVA, J.P.S. **Aderência pneu pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SILVA, P.B. **Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S**. 132 f. Dissertação (Mestrado em infraestrutura de transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SPECHT, L. P.; ROZEK, T.; HIRSCH, F.; SANTOS, R. T. Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 7, n. 10, p. 30-38, jul. 2007.

SPECHT, L. P.; KOHLER R.; POZZOBON C. E.; CALLAI S. C. Causas, formas de medição e métodos para mitigação do ruído decorrente do tráfego de veículos. **Revista Tecnologia (UNIFOR)**, Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 12-26, jun. 2009.

SPECHT, L. P.; SOARES, M.; REIS, R. M.; CERATTI, J. A. P. **Influência do tipo de revestimento asfáltico no ruído ambiental**. Trabalho apresentado no XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Rio de Janeiro, 2011.

TDOT – TENNESSEE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Proposal Contract for the construction of. Contract No. CNC 249**. Tennessee, 2004.

TENISON, J. H. **Performance of Novachip in New Mexico**. In: Rocky Mountain Asphalt Conference and Equipment Show, Colorado State University, Denver, 2003.

TxDOT – TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Design of ultra-thin bonded hot mix wearing course (UTBHMWC) mixtures**. Texas, 2004

UNIÃO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO. **A Construção do Desenvolvimento Sustentado**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2006.

USDOT/FTHW - UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION/ FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Highway traffic noise analysis and abatement policy and guidance**. Washington, 1995.

VARGAS, S. B. **Introduction a la tecnologia de los microaglomerados asfálticos en frio y discontinuos en caliente**. Universidade do Chile. Faculdades de Ciências Físicas, y Matemáticas. Departamento de Ing. Civil, 2000.

WIRTGEN GROUP – VOGELE. **Economical, eco-friendly, noise reduction: paving thin overlay is a convincing option.**

Disponível em:  
[http://www.voegele.info/en/technologien/anwendungstechnik/interview\\_mit\\_volker\\_schaefer.html](http://www.voegele.info/en/technologien/anwendungstechnik/interview_mit_volker_schaefer.html). Acesso em: 25.09.12.

WSDOT – WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **TECH NOTES:** The Use of NovaChip® as a Surface Treatment. WSDOT, 2003.

**ANEXO A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO: CONSTRUÇÃO DO  
TRECHO EXPERIMENTAL DA PESQUISA**

## Relatório Fotográfico: Construção do Trecho Experimental da Pesquisa



Figura 1: Rodovia PR-092 – Wenceslau Braz – Jaguariaíva – Aspecto do revestimento antigo em concreto asfáltico antes da execução do trecho experimental, em março de 2009



Figura 2: Execução da camada impermeabilizante e de ligação – aplicação da emulsão asfáltica elastomérica





Figura 3: Execução da camada impermeabilizante e de ligação – início da aplicação do agregado 4/6 mm



Figura 4: Detalhe da graduação do agregado 4/6 mm para a camada impermeabilizante e de ligação do RAUD



Figura 5: Execução da camada impermeabilizante e de ligação – final da aplicação do agregado 4/6 mm



Figura 6: Execução da camada impermeabilizante e de ligação – retirada de amostra para verificação da taxa de agregado 4/6 mm



Figura 7: execução da camada impermeabilizante e de ligação – pesagem da bandeja para verificação da taxa de agregado 4/6 mm



Figura 8: Execução da camada impermeabilizante e de ligação – aspecto da textura superficial



Figura 9: Produção da mistura asfáltica ultra delgada - usina de asfalto contrafluxo



Figura 10: Produção da mistura - detalhe da forma cúbica do agregado graúdo selecionado para a composição da massa asfáltica



Figura 11: Transporte da mistura - carregamento dos caminhões basculantes



Figura 12: Transporte da mistura - temperatura da massa asfáltica



Figura 13: Aplicação da mistura – rolo de chapa imediatamente após a vibro acabadora visando aumentar a eficiência de compactação



Figura 14: Aplicação da mistura – temperatura da massa asfáltica durante sua distribuição



Figura 15: Aplicação da mistura – verificação da espessura durante a distribuição da massa asfáltica



Figura 16: Aplicação da mistura – aspecto da textura superficial da mistura asfáltica durante sua distribuição



Figura17: Aplicação da mistura – execução da junta longitudinal



Figura 18: Aplicação da mistura – aspecto do acabamento manual da junta longitudinal





Figura 19: Compactação da mistura – aspersão de emulsão de óleo vegetal para evitar a aderência da massa asfáltica ao rolo de chapa



Figura 20: Compactação da mistura – rolagem da junta longitudinal



Figura 21: Compactação da mistura – aspecto da junta longitudinal acabada



Figura 22: Compactação da mistura – aspecto da espessura média do RAUD (20 mm) após a compactação



Figura 23: Vista do tráfego sobre o RAUD em meia pista



Figura 24: Controle tecnológico – verificação da densidade *in situ* através do densímetro eletromagnético



Figura 25: Vista do trecho experimental sinalizado



Figura 26: Vista do trecho experimental sinalizado e liberado ao tráfego



Figura 27: Monitoramento do trecho experimental – extração de CP para verificação de espessura do RAUD



Figura 28: Monitoramento do trecho experimental - verificação da espessura do CP do RAUD



Figura 29: Monitoramento do trecho experimental - vista da textura superficial da seção-teste ( vista do RAUD na parte inferior) e da seção de referência ( vista do concreto asfáltico na parte superior)



Figura 30: Monitoramento do trecho experimental – aspecto da lâmina de água superficial sobre a seção de referência (vista do concreto asfáltico na parte superior) e na seção-teste (vista do RAUD na parte inferior)



Figura 31: Monitoramento do trecho experimental – avaliação dos parâmetros funcionais do trecho experimental (macrotextura/mancha de areia, microtextura/pêndulo britânico e drenabilidade)



Figura 32: Monitoramento do trecho experimental – avaliação do ruído do trecho experimental – equipamento utilizado segundo o método isso 11819-1 (*statistical pass-by index*)



Figura 33: Rodovia PR - 092 – Wenceslau Braz – Jaguariaíva - aspecto do trecho experimental em agosto de 2012



**ANEXO B – PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO E CONSTRUTIVO E  
DE CONTROLE TECNOLÓGICO PARA RAUD**

## Procedimento Construtivo e de Controle Tecnológico para o RAUD

### 1. DEFINIÇÃO

Revestimento Asfáltico Ultra Delgado - RAUD é um sistema composto por uma mistura asfáltica a quente de graduação descontínua (*gap-graded*), com elevada porcentagem de agregados graúdos de alta resistência mecânica e recobertos por uma argamassa constituída de areia britada, fíler mineral e ligante asfáltico modificado por polímeros elastoméricos. A mistura asfáltica é aplicada em espessuras, entre 20 a 30 mm sobre uma superfície previamente impermeabilizada por uma membrana elástica, produzida “*in situ*” a partir de emulsão asfáltica catiônica elastomérica.

### 2. CONDIÇÕES GERAIS

- a) o RAUD pode ser empregado como camada de rolamento ou camada intermediária para retardar a reflexão de fissuras e trincas não ativas do pavimento;
- b) não é permitida a execução dos serviços em dia de chuva. O RAUD somente deve ser executado quando a temperatura ambiente for superior a 10°C;
- c) todo carregamento de ligante asfáltico elastomérico que chegar à obra deve apresentar por parte do fabricante/distribuidor o certificado de resultados de análise dos ensaios de caracterização exigidos pela especificação do produto.

### 3. MATERIAIS

Os materiais do RAUD são: agregados graúdo e miúdo, material de enchimento e ligantes asfálticos elastoméricos, os quais devem atender aos requisitos técnicos das especificações de materiais dos órgãos competentes.

### 3.1. LIGANTES ASFÁLTICOS ELASTOMÉRICOS

Para a mistura a quente deverão ser empregados asfaltos modificados por polímeros elastoméricos (AMP-E), classificados segundo as normas ABNT-NBR e selecionados em função das características do tráfego e das condições ambientais.

A emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos, tipo RR1C-E, classificada segundo as normas ABNT-NBR, deverá ser selecionada para a membrana elástica.

No caso da membrana elástica ser substituída por microrrevestimento asfáltico a frio, deverá ser selecionada a emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada modificada por polímeros elastoméricos, tipo RC1C-E, classificada segundo as normas ABNT-NBR.

### 3.2 AGREGADOS

#### 3.2.1 Agregado Graúdo

Deverá ser pedrisco de graduação 3/8” – 3/16” e atender às características e requisitos técnicos apresentados na Tabela 1.

#### 3.2.2 Agregado Miúdo

Deverá ser pó de pedra de graduação 3/16” ao fundo e atender às características e requisitos técnicos apresentados na Tabela.1.

#### 3.2.3 Material de Enchimento - filer

Devem ser constituídos de materiais minerais finamente divididos tais como cimento portland e cal hidratada tipo CH-1 até o limite de 2%. Devem atender às especificações de materiais dos órgãos competentes.

### 3.3 MELHORADOR DE ADESIVIDADE

Para a mistura a quente, não havendo boa adesividade entre o ligante asfáltico elastomérico e os agregados poderá ser empregado aditivo melhorador de adesividade na quantidade fixada pelo projeto de dosagem.

Tabela 1: Caracterização e requisitos técnicos dos agregados graúdos e miúdos para o RAUD

Métodos	Ensaio	Valores especificados	
		Mín	Máx
DNER ME 035	Abrasão Los Angeles (s)	-	35,0
DNER ME 054	Equivalente de areia, em peso (%)	45,0	-
ASTM D471	Partículas chatas e alongadas 3:1 (%)	-	25,0
ASTM C1552	Angularidade de agregado miúdo (%)	40,0	-
AASHTO TP58	Micro Deval agregado miúdo (%)	-	18,0
DNER ME089	Durabilidade do agregado sulfato de sódio (%)	-	12,0
NBR14949	Reatividade ao azul de metileno (m/g)	-	10,0
DNER ME 089	Durabilidade do material graúdo (%)	-	12,0
DNER ME 089	Durabilidade do material miúdo (%)	-	15,0

#### 4. GRADUAÇÃO DA MISTURA DE AGREGADOS PARA O RAUD

A composição da mistura de agregados para o RAUD deve satisfazer aos requisitos técnicos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição da mistura de agregados para o RAUD

Peneira		RAUD Fx 6 mm (%)		Faixa de Trabalho (%)		Tolerância (%)	
Nº	Abertura	Limite Min.	Limite Máx.	Limite Min.	Limite Máx.	Limite Min.	Limite Máx.
3/8"	9,52 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%	0,00%
#4	4,76 mm	40,00	55,00	43,00	53,00	-5,00%	5,00%
#8	2,40 mm	22,00	32,00	22,70	30,70	-4,00%	4,00%
#16	1,21 mm	15,00	25,00	15,00	23,00	-4,00%	4,00%
#30	0,60 mm	10,00	18,00	10,50	18,00	-4,00%	4,00%
#50	0,33 mm	8,00	13,00	8,00	13,00	-4,00%	4,00%
#100	0,15 mm	6,00	10,00	6,00	10,00	-4,00%	4,00%
#200	0,07 mm	4,00	7,00	5,10	7,00	-1,00%	1,00%

## 5. REQUISITOS PARA O PROJETO DE DOSAGEM DO RAUD

O projeto da mistura asfáltica para o RAUD deverá atender aos seguintes requisitos:

### 5.1 PARÂMETROS MARSHALL E RELAÇÃO FILER/LIGANTE

Devem ser atendidos os seguintes parâmetros volumétricos Marshall e de relação filer-ligante asfáltico, em corpos de prova moldados com 50 golpes por face:

$$(10 \% \leq V_v \leq 18 \%), (33 \% \leq RBV \leq 65 \%) \text{ e } (18 \% \leq VAM \leq 28 \%)$$

$$(0,9 \leq \text{relação filer/ligante} \leq 1,4)$$

### 5.2 ESPESSURA DA PELÍCULA DE LIGANTE ASFÁLTICO

A película de ligante asfáltico deve ser de no mínimo 9,0  $\mu\text{m}$  de espessura e compatível com resultados adequados de resistência da mistura asfáltica à desagregação (resistência à tração por compressão diametral  $> 0,65 \text{ MPa}$ ), ao dano por umidade induzida ( $RRT \geq 80\%$ ) e ao desgaste por abrasão (ensaio Cantabro).

O ensaio para a determinação do dano por umidade induzida deve ser realizado segundo a norma NBR 15617, com as seguintes modificações:

- a) corpos de prova compactados por 50 golpes por face;
- b) não estabelecer valores limites para o teor de vazios com ar;
- c) eliminar a etapa de saturação e aplicação de vácuo aos CPs;
- d) aplicar condicionamento de baixa severidade aos CPs, eliminando o ciclo de congelamento / descongelamento.

O ensaio de desgaste por abrasão Cantabro deve ser realizado segundo a norma NBR 15140. Adicionalmente, deve ser realizada a determinação do desgaste em corpos de prova (CPs) previamente submersos em água por 24 h a 60°C (procedimento via úmida). O ensaio realizado em CPs condicionados em água é mais severo que o procedimento via seco e visa

avaliar o efeito combinado do desgaste (perda da coesão) e da suscetibilidade da mistura asfáltica à ação da água (adesividade).

A espessura da película de ligante asfáltico pode ser obtida através da Equação 1:

$$FT = \frac{\left(\frac{P_{be}}{100}\right)}{SA \cdot G_s \cdot 1000} \cdot 10^6 \quad (1)$$

Onde:

FT: espessura do filme de ligante asfáltico,  $\mu\text{m}$ ;

$P_{be}$ : teor de ligante efetivo da mistura asfáltica, %; e obtido conforme Equação 2

SA: área superficial da mistura de agregados,  $\text{m}^2/\text{kg}$ , obtida conforme Equação 4.

$G_s$ : massa específica do ligante asfáltico,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$$P_{be} = P_b - P_{ba} \left(\frac{100 - P_b}{100}\right) \quad (2)$$

Onde:  $P_{be}$ : teor de ligante efetivo da mistura asfáltica, %;

$P_b$ : teor de ligante da mistura asfáltica,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$P_{ba}$ : teor de ligante absorvido pela mistura de agregados, % e obtido conforme a Equação .3

$$P_{ba} = 100 \cdot G_b \cdot \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \cdot G_{se}}\right) \quad (3)$$

Onde:

$P_{ba}$ : teor de ligante asfáltico absorvido pela mistura de agregados, %;

$G_b$ : massa específica do ligante asfáltico,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$G_{se}$ : massa específica efetiva da mistura de agregados,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$G_{sb}$ : massa específica aparente da mistura de agregados,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$$SA = \frac{0,41 + (\%P\#4)0,41 + (\%P\#8)0,82 + (\%P\#16)1,64 + (\%P\#30)2,87 + (\%P\#50)6,14 + (\%P\#100)12,29 + (\%P\#200)32,77}{100} \quad (4)$$

Onde:

SA: área superficial da mistura de agregados, m<sup>2</sup>/kg

%P#i: agregados passando pela peneira #i, %

### 5.3 VERIFICAÇÃO DO CONTATO GRÃO-GRÃO E DA ESTABILIDADE DA MISTURA POR SIMULADOR LPC

A verificação do contato grão-grão da mistura asfáltica deve ser realizada através da Equação 5 e os valores máximos de deformação permanente a 60°C, 3.000 ciclos no simulador de tráfego LPC devem ser inferiores a 15%. Esses requisitos têm por objetivo assegurar o intertravamento da estrutura mineral e a estabilidade mecânica (manutenção da macrotextura) do RAUD;

$$VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC} \quad (5)$$

Esses parâmetros são obtidos pelas Equações 6 e 7:

$$VCA_{DRC} = \left( \frac{G_{CA} \cdot \gamma_w - \gamma_s}{G_{CA} \cdot \gamma_w} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

$$VCA_{mix} = 100 - \left( \frac{G_{MB}}{G_{CA}} \cdot P_{CA} \right) \quad (7)$$

Onde:

VCA<sub>DRC</sub>: vazios da fração graúda do agregado compactado, %;

$\gamma_s$ : massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado, g/cm<sup>3</sup> e obtida conforme o método DNER – ME 153/97;

$\gamma_w$ : massa específica da água: 0,998 g/cm<sup>3</sup>;

$G_{CA}$ : massa específica aparente da fração graúda do agregado, g/cm<sup>3</sup> e obtida conforme método DNER – ME 81/98;

$VCA_{mix}$ : vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %;

$G_{MB}$ : massa específica aparente da mistura compactada, g/cm<sup>3</sup> e obtida conforme método DNER – ME 117/94;

$P_{CA}$ : % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura;

A fração do agregado graúdo ( $P_{CA}$ ) é definida como sendo a porção relativa à mistura total de agregados, retida numa determinada peneira que varia de acordo com o diâmetro nominal máximo dos agregados, como apresentado na Tabela 3:

Tabela 3: Definição da fração do agregado graúdo. Fonte: (DER/SP, 2007)

<i>Diâmetro nominal máximo do agregado<sup>1</sup></i>		<i>Porção de agregado retida na peneira</i>	
<i>Mm</i>	<i>ASTM</i>	<i>Mm</i>	<i>ASTM</i>
25,0	1”	4,75	Nº4
19,0	¾”	4,75	Nº4
12,5	½”	4,75	Nº4
9,5	3/8”	2,36	Nº8
4,75	Nº4	1,18	Nº16

<sup>1</sup>diâmetro nominal máximo do agregado é definido como o diâmetro da peneira imediatamente superior àquela que retém mais que 10% dos agregados

## 5.4 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE AO ESCORRIMENTO

A avaliação da sensibilidade ao escorrimento do ligante deve ser realizada segundo a norma ASTM D6390 na temperatura de compactação da mistura asfáltico. A tela metálica de abertura 6,30 mm deve ser substituída por outra de abertura 2,36 mm em função do tamanho nominal máximo da graduação estabelecida para o RAUD. O valor máximo admitido para o ensaio deve ser inferior a 0,1%.



## 6. EQUIPAMENTOS

Os principais equipamentos para a construção do RAUD são os seguintes:

- a) depósitos para ligantes asfálticos;
- b) silos para agregados;
- c) usina de asfaltos para a mistura asfáltica a quente;
- d) caminhão espargidor para aplicação da membrana elástica de impermeabilização/ligação com emulsão asfáltica;
- e) caminhão distribuidor de agregados;
- f) caminhões basculantes para transporte da mistura asfáltica;
- g) vibro acabadora para espalhamento de massa asfáltica a quente;
- h) rolos lisos duplo tandem com peso total de 8 a 12 toneladas.

## 7. EXECUÇÃO

### 7.1 CAMADA DE NIVELAMENTO OU REPERFILAGEM

Havendo irregularidades longitudinais e/ou transversais na camada asfáltica subjacente, deverá ser executada a camada de nivelamento com massa asfáltica de graduação fina a quente ou microrrevestimento asfáltico a frio em uma ou duas camadas (Faixa II grossa ou Faixa III do DER-PR) com a finalidade de corrigir deformações ocorrentes na superfície do antigo revestimento e promover a selagem de fissuras existentes.

### 7.2 MEMBRANA ELÁSTICA

Para a execução da membrana elástica deve ser utilizada a emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos. O ligante elastomérico residual da emulsão promove a impermeabilidade e adesão da camada subjacente ao revestimento ultra delgado. Em geral, a emulsão asfáltica é aplicada simultaneamente com a mistura asfáltica através de

uma vibro acabadora especial. Alternativamente, este processo poderá ocorrer em duas etapas, da seguinte forma:

- a) aplicação de emulsão asfáltica elastomérica, tipo RR1C-E (na taxa de 450 g/m<sup>2</sup> de ligante residual), aquecida entre 50 a 75°C e cobertura com 2 a 3 litros/m<sup>2</sup> de agregado limpo de graduação 4/6 mm (tratamento superficial simples);
- b) ou execução de camada de 5 a 6 mm de espessura em microrrevestimento asfáltico a frio (taxa de 5 a 7 kg/m<sup>2</sup>) obedecendo a Faixa I da especificação DNIT 035/2005-ES.

### 7.3 TEMPERATURAS DE AQUECIMENTO DO LIGANTE, AGREGADOS, DE MISTURA E COMPACTAÇÃO DA MASSA ASFÁLTICA

As temperaturas de aquecimento do ligante asfáltico elastomérico (AMP - E) para a mistura e compactação da massa asfáltica devem ser determinadas para cada tipo de ligante em função da relação temperatura-viscosidade. As temperaturas recomendadas são aquelas especificadas no projeto de dosagem do RAUD. Os agregados devem ser aquecidos a temperatura de 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante asfáltico, sem ultrapassar 177°C.

A temperatura de usinagem da mistura asfáltica não deverá ser inferior a 140°C nem exceder 177°C. A temperatura inicial de compactação deverá ser a maior que a massa suportar sem fissurar ou fluir em geral entre 165 e 170°C. A temperatura final de rolagem deverá ser superior a 90°C.

### 7.4 PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

A produção da mistura é realizada em usina de asfalto capaz de dosar e produzir misturas homogêneas, sem segregação dos materiais, de acordo com a composição granulométrica e os requisitos técnicos preconizados no projeto de dosagem do RAUD.

## 7.5 TRANSPORTE DA MISTURA ASFÁLTICA

A mistura deverá ser transportada da usina ao ponto de aplicação em caminhões basculantes. A produção da mistura asfáltica e a frota veículos de transporte devem assegurar a operação contínua da vibro acabadora evitando paradas da mesma sobre o novo revestimento.

A aderência da mistura às chapas da caçamba deve ser evitada através da aspersão prévia de solução de cal (uma parte de cal para três de água) ou água e sabão. Em qualquer caso, o excesso de solução deve ser retirado, antes do carregamento da mistura, basculando a caçamba.

Cada carregamento deve ser coberto com lona para proteger a mistura de chuvas ocasionais, eventual contaminação por poeira e, especialmente, perda de temperatura e queda de partículas durante o transporte.

## 7.6 DISTRIBUIÇÃO E COMPACTAÇÃO DA MASSA ASFÁLTICA

A distribuição deve ser realizada por equipamentos adequados para o espalhamento e acabamento da massa. A temperatura da mistura, medida na pista no momento da distribuição, não deve ser inferior a 135°C.

A vibro acabadora deve operar em velocidade constante, entre 2,0 a 3,0 km/h, sem parar durante a aplicação e com a sua mesa aquecida. O controle de espessura da camada acabada e de fundamental importância, sendo a distribuição da massa executada com vibro acabadora dotada de sistema de nível eletrônico.

A espessura mínima acabada deve ser limitada a 20 mm e a máxima a 30 mm. Espessuras inferiores são suscetíveis a potenciais descolamentos e destacamentos da camada e superiores tendem a formar um reservatório de acúmulo de água gerando pressões negativas (efeito poro-pressão) e formação de panelas ou buracos pela passagem do tráfego.

Possíveis irregularidades na superfície da camada acabada devem ser corrigidas de imediato pela adição manual de massa, sendo o espalhamento desta efetuado por meio de ancinhos e/ou rodos metálicos. No entanto, esse procedimento deve ser reduzido ao máximo, já que o reparo manual tende a prejudicar o acabamento do serviço.

Em conjunto com a distribuição do camada asfáltica delgada são executadas as operações de rolagem. Como norma geral, a temperatura de rolagem é a mais elevada que a mistura asfáltica possa suportar sem a ocorrência de fissuras ou fluência, em geral entre 145°C e 155°C.

A compactação deverá ser executada com a utilização de três rolos lisos tandem de no mínimo 10-12 toneladas de peso, sem vibração. Os dois primeiros deverão operar simultaneamente e posicionados imediatamente atrás da acabadora. A compactação deverá ser iniciada pelas bordas em direção ao eixo da pista. Nas curvas de acordo com a superelevação a compactação deve sempre começar do ponto mais baixo para o ponto mais alto. Cada passada do rolo deve ser recoberta na seguinte de pelo menos, metade da espessura rolada. Um terceiro rolo liso deverá ser empregado para a compactação imediata das juntas longitudinais e transversais.

Durante a rolagem não são permitidas mudanças de direção e inversões bruscas da marcha, sem estacionamento do equipamento sobre o revestimento recém rolado. As rodas do rolo devem ser umedecidas adequadamente com uma emulsão de óleo vegetal de modo a evitar a aderência da mistura, sendo vedada a utilização de óleo diesel.

As condições de distribuição e compressão devem ser determinadas experimentalmente, na obra a partir da execução de um segmento de controle definindo os parâmetros mais apropriados à sua aplicação. De modo geral, os rolos lisos executam um mínimo de quatro coberturas finalizando a operação quando for atingida a compactação de referência, determinada na execução do segmento de controle.

## 7.7 ABERTURA AO TRÁFEGO

O revestimento recém-acabado deve ser mantido sem tráfego até o seu completo esfriamento. A pintura de sinalização pode ser realizada após o esfriamento da massa asfáltica aplicada.

## 8. CONTROLE TECNOLÓGICO

O controle tecnológico deverá ser executado de acordo com os planos de controle para os materiais e mistura asfáltica, conforme apresentado nas Tabelas 4 a 9.

## 9. MEDIÇÃO E PAGAMENTO

O RAUD deve ser medido e pago considerando a quantidade em peso de massa asfáltica e de emulsão asfáltica efetivamente aplicadas (toneladas ou quilogramas) acrescidos dos custos operacionais. Outro parâmetro que poderá ser adotado como critério de pagamento é o custo total orçado e medido em metros quadrados (m<sup>2</sup>) de área executada.

Tabela 4: Plano de controle para o asfalto modificado por polímeros elastoméricos (AMP-E)

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Penetração	Conforme projeto	NBR 6576	Penetrômetro	A cada fornecimento
Viscosidade a altas temperaturas, cP 135°C, 150°C, 177°C	Conforme projeto	NBR 15184	Viscosímetro Brookfield	A cada fornecimento
Ponto de Amolecimento	Conforme projeto	NBR 6560	Anel e Bola	A cada fornecimento
Recuperação Elástica	Conforme projeto	NBR 15086	Ductilômetro	A cada fornecimento
Temperatura do ligante na usinagem	Conforme projeto (135 °C – 177 °C)	-	Termômetro	A cada usinagem

Tabela 5: Plano de controle para a emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos - RR1C-E

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Resíduo seco	62%, mín.	NBR 14376	Balança	A cada fornecimento
Peneiração	0,10%, máx.	NBR 14393	Balança	A cada fornecimento
Ponto de Amolecimento	50°C, mín.	NBR 6560	Anel e Bola	A cada fornecimento
Recuperação Elástica	65%, mín.	NBR 15086	Ductilômetro	A cada fornecimento
Penetração sobre o resíduo	45-150 (0,1 mm)	NBR 6576	Penetrômetro	A cada fornecimento

Tabela 6: Plano de controle para os agregados

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Granulometria de cada agregado	Conforme Projeto	DNER-ME 083-98	Peneiras Balança	Um ensaio por turno de trabalho
Equivalente de Areia	Conforme Projeto	DNER-ME 054-97	Proveta	Um Ensaio por turno de trabalho
Adesividade	Conforme Projeto	NBR-14329	Visual	Um ensaio por turno de trabalho

Tabela 7: Plano de controle para as temperaturas da massa asfáltica

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Temperatura de usinagem	Máx. 175°C	----	Termômetro	Durante cada carregamento que sair da usina
Temperatura de Espalhamento	Mín. 135°C	----	Termômetro	A cada distribuição da acabadora
Temperatura Inicial de Compactação	135 °C - 175°C	----	Termômetro	A cada distribuição da acabadora
Temperatura Final de Compactação	Mín. 90°C	----	Termômetro	A cada distribuição da acabadora

Tabela 8: Plano de controle para a massa asfáltica – execução do RAUD

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>	<i>Tamanho da amostra</i>
Quantidade de Ligante Asfáltico	Conforme Projeto	DNER-ME 053-94 e/ou ASTM-D 2172 (B)	Rotarex / Refluxo	01 análise por turno	Aproximadamente 1 kg (com Duplicidade)
Controle da Graduação da Mistura do Agregado	Conforme Projeto	DNER-ME 083-98	Peneiras Balança	01 análise por turno	Aproximadamente 1 kg (com Duplicidade)
Ensaio Marshall	Conforme Projeto	DNER-ME 043	Prensa e Compactador	01 análise por turno	Aproximadamente 1,5 kg por CP
Resistência à Tração	Conforme Projeto	DNER-ME 138	Prensa	01 análise por turno	Aproximadamente 1,5 kg por CP -
Densidade de Referência	Conforme segmento de controle	DNIT-031-2006	Densímetro Eletromag – nético	A cada 100 metros de faixa de rolamento compactada	----

Tabela 9: Plano de controle para a massa asfáltica – pista

<i>Tipos de Controle</i>	<i>Especificação ou critério de aceitação</i>	<i>Método de controle</i>	<i>Instrumento de medição</i>	<i>Frequência</i>
Verificação da espessura e adesão entre as camadas	Qualitativo	Observação visual de CPs extraídos da pista	-	A cada 100 m por faixa
Macrot textura/ mancha de areia	0,6-1,2	ASTM E 965/96	Aparelhagem para ensaio de mancha de areia	03 medidas a cada 100 m por faixa
Atrito superficial/ pêndulo britânico	$VRD \geq 47$	ASTM E 303-93	Pêndulo Britânico	05 medidas a cada 100 m por faixa