

**PATRÍCIA NUNES FERREIRA**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS DELGADOS A QUENTE PARA PAVIMENTOS  
TIPO BBTM NO BRASIL**

TESE APRESENTADA À ESCOLA  
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO  
PAULO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE  
TRANSPORTES

SÃO PAULO  
2006

**PATRÍCIA NUNES FERREIRA**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS DELGADOS A QUENTE PARA PAVIMENTOS  
TIPO BBTM NO BRASIL**

TESE APRESENTADA À ESCOLA  
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO  
PAULO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE  
TRANSPORTES

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ORIENTADOR:  
PROF. LIVRE-DOCENTE  
LIEDI LÉGI BARIANI BERNUCCI

SÃO PAULO  
2006

FERREIRA, P. N. **Estudo da utilização de revestimentos asfálticos delgados a quente para pavimentos tipo BBTM no Brasil**. 2006. 200f. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

### ERRATA

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
14	23	Classe 2: 20 a 25%	Classe 2: 18 a 25%
52	8	Outro fator corresponde aos ensaios de controle de BBTM no Brasil, aos quais devem ser acrescidas medidas do volume de vazios de corpos-de-prova broqueados,	Portanto, poder-se-ia acrescentar aos ensaios de controle do BBTM no Brasil medidas do volume de vazios de corpos-de-prova broqueados,
72	1	A curva teórica do BBTM	A curva do traço do BBTM
85	24	estudo de manutenção	projeto de restauração
87	1	estudo de manutenção	projeto de restauração
111	14	O ECF é composto	O ECF é um microrrevestimento asfáltico composto
119	16	controle exterior (LRPC de Autun)	controle externo – laboratório fiscalizador da obra (LRPC de Autun)
127	10 e 19	..., adotado no para	..., adotado para
153	13	...LCPC.	...LCPC. A escala de rugosidade corresponde ao perfil original do agregado com suas respectivas asperezas e a escala de ondulação corresponde ao perfil constituído de segmentos que ligam os picos do perfil original dos agregados (DO, 2004).
160	20	Tabela 4.14. <sup>(1)</sup> Após a redução de 2% no teor de ligante asfáltico	Tabela 4.14. <sup>(1)</sup> Após a redução de 0,2% no teor de ligante asfáltico

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
<b>169</b>	<b>5</b>	<b>nora,</b>	<b>norma,</b>
<b>179</b>	<b>7</b>	<b>é exatamente</b>	<b>foi exatamente</b>
<b>180</b>	<b>18</b>	<b>foi,</b>	<b>foi</b>
<b>185</b>	<b>3 e 8</b>	<b>2%</b>	<b>7%</b>
<b>191</b>	<b>5</b>	<b>tendência alisar</b>	<b>tendência de alisar</b>
<b>192</b>	<b>28</b>	<b>..., embora a mesma avaliação em misturas não compactadas.</b>	<b>..., embora a mesma avaliação não tenha sido feita em misturas não compactadas em laboratório.</b>
<b>199</b>	<b>1</b>		<b>DO, Minh-Tan. Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées. Nantes, FR: LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2004. 86 p.</b>

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Ferreira, Patrícia Nunes**

**Estudo da utilização de revestimentos asfálticos delgados a quente para pavimentos tipo BBTM no Brasil / P.N. Ferreira. -- São Paulo, 2006.**

**200 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.**

**1.Revestimentos asfálticos delgados a quente I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.**

*À minha querida mãe Raimunda,  
minha maior incentivadora.*

O presente trabalho foi realizado com o auxílio da Fundação de Amparo à Pesquisa  
do Estado de São Paulo – FAPESP.

## **AGRADECIMENTOS**

---

Antes de agradecer a todas as pessoas e organismos que fizeram parte desta longa caminhada que se encerra e que está representada por este texto, agradeço a Deus que me deu forças para superar os obstáculos e as pedras que se opuseram à realização desta missão.

À **FAPESP**, pelo apoio financeiro.

À **FINEP/PETROBRÁS** pelo projeto **CTPETRO-PAVIMENTOS** pelo apoio à pesquisa.

Ao *Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

Ao *Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

Ao *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC Centro de Nantes.*

À empresa **SCREG BELGIUM**, representada por Mr. Yves Decoene e Mr. Johan Trigalez.

Ao *Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

À empresa **ENGELOG S.A.**, representada pelo Eng. Décio de Souza

À empresa **SERVENG-CILVISAN S.A.**

À empresa **SARGON S.A.**

Agradeço à **Prof<sup>a</sup> Liedi Légi Bariani Bernucci**, orientadora deste trabalho, pelas oportunidades, pela confiança e pelas lições, aprendizado que levarei tanto para minha vida profissional quanto pessoal.

Ao **Mr. Yves Brosseaud**, chefe da Seção *Auscultation, Gestion et Entretien des Routes*, orientador dos meus dois estágios no LCPC (Centro de Nantes), por sua colaboração e dedicação para o bom desenvolvimento deste trabalho, a quem addresso minha admiração.

Ao **Eng. Octávio de Souza Campos** pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

Ao **Prof. José Alberto Quintanilha e Eduardo Jun Shinohara** pelo auxílio na análise estatística.

Ao **Prof. Orlando Strambi** por sua solicitude.

Aos mestres e amigos **Prof. Leto Momm e Prof. Antônio Fortunato Marcon** pelo incentivo constante.

Agradeço aos colegas do LTP, que durante esses três anos de convivência compartilharam muito mais do que idéias sobre técnicas de pavimentação e que hoje, também podem dispor da minha amizade: **Edson de Moura, Diomária Santos, Erasmo Alves, Walter Canales, Patrícia Barboza, Rosângela Motta, Fabiana da Conceição, Sidney Isidro Jr., Moisés Abdou e Pedro Lyra**. Também agradeço à amiga **Simonne Amaral** que fazia parte desta equipe no primeiro ano do curso de doutorado.

À Divisão MSC (*Matériaux et Structures des Chaussées*) do LCPC – Centro de Nantes: **Mr. Christian Such** (Chefe da Divisão), à **Mme Chantal de la Roche** (Chefe da Seção LMR – *Liants et Matériaux Routiers*) e ao **Mr. Francis Moutier**, sempre solícito aos meus questionamentos sobre a PCG e sobre a metodologia francesa; aos colaboradores **Nathalie Juignet e Jacques Kerveillant**, aos técnicos **Mr. François**

*Travers, Olivier Burban, René Guilloux, Sébastien Bouisson, Tanoë Porquet, Cédric Petiteau e Stéphane Bouron*; aos doutorandos e pesquisadores da divisão MSC (*Régis, Alain, Nam, Samad, Smail, Sergio, Rami e Pierre*), que além de colegas se tornaram amigos valorosos.

À Divisão ESAR (*Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes*): **Mr. Philippe Lepert** (Chefe da Divisão), **Mr. Minh-Tan Do** (Chefe da Seção *Surface des Chaussées et Dynamique des Véhicules*) e **Mr. Paul Marsac**.

Ao *Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées* (LRPC) da cidade de Angers: **Mr. Philippe Tijou, Mr. André Onillon** e toda equipe da Seção de Pavimentação.

Ao *Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées* (LRPC) da cidade de Autun: **Mme Louise Wendelling, Mr Jean-Luc Vitrac**, aos técnicos **Mr. Michel Bernard, Eric Maguet, Pascal Gineys et Michel Pawilik**.

À Concessionária *Autoroutes Paris Rhin Rhône* (SAPRR) e à empresa *APPIA Revillon/GERLAND Savoie-Léna*, que me autorizaram a acompanhar as obras de restauração da camada de rolamento da Auto-estrada A6.

Agradeço à minha família, que nem sempre pôde estar ao meu lado durante esta caminhada, mas que o fez em pensamento e em forma de incentivo, de maneira especial à minha mãe, **Raimunda**, que jamais duvidou da realização deste sonho, cuja ajuda foi fundamental para que eu pudesse realizá-lo.

Ao meu querido **Samuel**, que durante os dois últimos anos deste trabalho me dedicou uma atenção muito especial, que foi capaz de transpor barreiras geográficas e que se fazia presente nos momentos mais difíceis, sempre com a paciência, o amor e o carinho que o momento exigia. **Merci Chéri!**

## RESUMO

---

A tese apresenta o estudo de revestimentos asfálticos delgados a quente para pavimentos rodoviários do tipo BBTM, nas graduações 0/6 e 0/10, com diâmetro nominal máximo de 6 mm e 10 mm, respectivamente. Este estudo introduz uma nova tecnologia de restauração de pavimentos no Brasil e identifica as possíveis adaptações para a execução, aplicação e controle tecnológico para a utilização do BBTM em rodovias brasileiras de tráfego intenso e pesado. As atividades experimentais foram desenvolvidas no Brasil, no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP/EPUSP) e na França, no Centro de Nantes do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC). Além dos ensaios de dosagem da metodologia francesa (Ensaio PCG, Ensaio Duriez, Ensaio de Deformação Permanente e Evolução da Macrotextura) e ensaios suplementares (Ensaio Cântabro e a avaliação da textura sem contato - raio laser) em laboratório, a tese descreve o acompanhamento das obras de restauração (produção em usina, aplicação e controle tecnológico) de duas rodovias, uma no Brasil em BBTM 0/10, a Rodovia Presidente Castelo Branco e outra na França em BBTM 0/6, a Auto-estrada A6 (Paris-Lyon). No LTP foram realizados os ensaios disponíveis para a dosagem das misturas de BBTM (exceção feita à PCG) e o Ensaio Cântabro (resistência ao desgaste por abrasão). Essas misturas apresentaram resultados satisfatórios de resistência ao dano à umidade induzida, à deformação permanente e pequena redução da macrotextura durante a simulação do tráfego em laboratório. No LCPC, foram produzidas misturas de BBTM 0/6 e BBTM 0/10 (traço utilizado na Rodovia Presidente Castelo Branco), as quais apresentaram bons resultados de resistência à deformação permanente e pouca alteração da macrotextura. Ao comparar os traços de BBTM 0/10 verificou-se que garantir a descontinuidade na distribuição granulométrica das misturas é tão importante quanto atender os limites de porcentagem de vazios recomendados pelas normas. Durante as obras de restauração da rodovia brasileira foram fabricadas, com o BBTM 0/10 produzido na usina, placas para o ensaio de deformação permanente e avaliação da macrotextura, além de corpos-de-prova Marshall para investigar a possível quebra de agregados durante a compactação. Constatou que a Metodologia Marshall apresenta limitações para a dosagem de misturas asfálticas descontínuas. As avaliações da macrotextura identificaram uma certa heterogeneidade no início da obra. Simultaneamente às obras de restauração da rodovia francesa, foram feitos ensaios de verificação da dosagem em laboratório. A partir das avaliações da textura com o raio laser de placas extraídas do pavimento e fabricadas em laboratório, concluiu-se que o método de compactação empregado em laboratório é suficientemente representativo da compactação em campo.

Palavras-chave: pavimento, revestimento asfáltico delgado a quente, BBTM, mistura asfáltica descontínua.

## ABSTRACT

---

This thesis presents a study of very thin pavement wearing courses using gap-graded hot asphalt mixes (BBTM – *Béton Bitumineux Très Mince*), French gradations 0/6 and 0/10, with nominal maximum diameter of 6mm and 10mm, respectively. The research introduces a new technique of pavement maintenance in Brazil and identifies the adjustments required in the manufacturing and application processes, and in field control activities related to the use of BBTM in heavy traffic roads in Brazil. This research was conducted in Brazil, at the Laboratory of Pavement Technology of the *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo* (LTP/EPUSP) and in France, at the *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* in Nantes. The thesis describes the French standard laboratory tests performed (PCG – gyratory compactor shear test, Duriez test, the wheel tracking rutting test and an evaluation of surface characteristics) and supplementary essays (Cantabro test and texture evaluation by laser machine), as well as field control activities conducted during pavement construction in two roads: one using BBTM 0/10 as wearing course in Rodovia Castelo Branco, in Brazil, other on the Auto-route A6 (Lyon-Paris), in France, using BBTM 0/6. Laboratory tests conducted in Brazil, at the LTP, included most of those required to design the BBTM, except the PCG test, and a tentative evaluation of cohesion and water damage by the Cantabro test. BBTM mixtures produced at LTP have shown satisfactory results concerning moisture-induced damage, rutting, and the changes in macrotexture when submitted to a laboratory traffic simulator. At the LCPC, in France, tests for the design of BBTM 0/6 and BBTM 0/10 (using the same gradation of Rodovia Castelo Branco wearing course) were conducted. Results have also been satisfactory concerning rutting and evolution of macrotexture. Comparison of BBTM 0/10 mixtures with different grading curves indicated that maintaining the gap-grade for BBTM is as important as respecting the limits on void percentage set on French standards. Field control activities on the BBTM 0/10 test track of Rodovia Presidente Castelo Branco were conducted during the stages of mixture manufacturing, application and after conclusion of the asphalt layer, including extraction of samples to determine the percentage of voids. A significant heterogeneity in macrotexture was observed in the initial stages of the works. Samples of plant-manufactured mixtures were tested for rutting and assessment of changes in macrotexture. Similar samples were also used to verify the feasibility of using a compaction procedure following Marshall test standards for BBTM design; the results show the limitation of using Marshall methodology for the design of gap-graded mixtures, due to breaking of the aggregates. Field control activities performed during the pavement maintenance of the A6 (Lyon-Paris) expressway included similar tests and additional testing for the verification of mix design. Surface texture of laboratory-produced and field samples was assessed using a laser scanner; results indicate that compaction obtained in the laboratory satisfactorily reproduces field compaction.

## RÉSUMÉ

---

Le travail de thèse présenté ici est une étude des enrobés bitumineux à chaud très minces (BBTM) de granularité 0/6 et 0/10 dans le but d'introduire ce nouveau type de technologie pour l'entretien des routes brésiliennes à fort trafic. Cette étude identifie les possibles adaptations pour la production, la mise en oeuvre sur chantier et les essais de contrôle pour l'utilisation de tels BBTM. Les activités expérimentales ont été développées au Brésil, au sein du *Laboratório de Tecnologia de Pavimentação de l'Escola Politécnica de l'Universidade de São Paulo* (LTP/EPUSP) et en France, au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Centre de Nantes. En plus des essais classiques de formulation (Essai PCG, Essai Duriez, Orniéage, évaluation de la macrotexture) et de quelques essais supplémentaires en laboratoire (essai Cantabre et évaluation de la texture sans contact), cette thèse décrit les activités, de laboratoire et de contrôle sur chantier, entreprises lors du suivi des travaux de renouvellement des couches de roulement de deux routes: une au Brésil avec un BBTM 0/10 (Rodovia Presidente Castelo Branco) et une autre en France pour un BBTM 0/6 (Autoroute A6). Les essais de formulation (excepté l'essai PCG) et l'essai de Cantabre pour la tenue à l'eau ont tous été réalisés au LTP. Les mélanges de BBTM conçus au LTP présentent des résultats de résistance à l'orniéage, de tenue à l'eau et de perte de macrotexture (pendant la simulation de trafic en laboratoire) qui sont satisfaisants. Les formulations de BBTM 0/6 et de BBTM 0/10 (formule du BBTM 0/10 de l'Auto-route Presidente Castelo Branco) testées en France ont également donné de bons résultats d'orniéage et de perte de macrotexture. Pour la formulation du BBTM 0/10, ces essais ont montré la nécessité d'assurer la discontinuité granulométrique des mélanges étudiés et pas seulement le pourcentage de vides établie par les normes. Pendant le suivi du chantier de l'Autoroute Castelo Branco, des échantillons du mélange produit à la centrale d'enrobage nous ont servi à la réalisation de plaques (pour effectuer des essais d'orniéage et évaluer la macrotexture) et d'éprouvettes Marshall (pour vérifier la fracturation des granulats lors du compactage). Ces résultats ont montré les limites de la Méthodologie Marshall pour la formulation de enrobés à granulométrie discontinue en raison de la fracturation des granulats. Les essais de macrotexture montre, eux, une macrotexture très hétérogène au début du chantier. En parallèle du suivi du chantier de l'Autoroute A6, la vérification de la formule a été effectuée en laboratoire. La comparaison de la texture par une méthode sans contact (rayon laser) entre des plaques prélevées sur le chantier et des plaques fabriquées en laboratoire, amène à la conclusion que la méthode de compactage utilisée en laboratoire est assez représentative de celle sur chantier.

# SUMÁRIO

---

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b><i>i</i></b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b><i>ix</i></b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b><i>xi</i></b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO TEMÁTICO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	9
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	10
<b>2. BBTM (<i>BÉTON BITUMINEUX TRÈS MINCE</i>).....</b>	<b>12</b>
2.1 BREVE HISTÓRICO.....	12
2.2 CLASSES DE BBTM E PROPRIEDADES GERAIS.....	14
2.3 ESPECIFICAÇÕES.....	18
2.4 MATERIAIS PARA O BBTM.....	21
2.4.1 AGREGADOS.....	21
2.4.2 LIGANTES ASFÁLTICOS.....	23
2.5 PROJETO DA MISTURA.....	25
2.5.1 MÉTODO DO PROF. DURIEZ – TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO CALCULADO...	28
2.5.2 PRENSA DE COMPACTAÇÃO A CISCALHAMENTO GIRATÓRIO (PCG3 - <i>PRESSE À CISAILEMMENT GIRATOIRE</i> ).....	30
2.5.3 ENSAIO DURIEZ – DANO POR UMIDADE INDUZIDA.....	34
2.5.4 DEFORMAÇÃO PERMANENTE E EVOLUÇÃO DA MACROTEXTURA.....	35
2.6 PRODUÇÃO DA MISTURA.....	43
2.7 EXECUÇÃO.....	44
2.8 CONTROLE TECNOLÓGICO.....	46

<b>3. MATERIAIS PESQUISADOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE DOSAGEM.....</b>	<b>53</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	53
3.2 MISTURAS DE BBTM ESTUDADAS NO <i>LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES</i> – LCPC CENTRO DE NANTES.....	53
3.2.1 MATERIAIS PÉTREOS E LIGANTES ASFÁLTICOS (LCPC).....	54
3.2.2 DOSAGEM DO BBTM 0/6 (LCPC).....	55
3.2.3 DOSAGEM DO BBTM 0/10 (LCPC).....	64
3.3 MISTURAS DE BBTM ESTUDADAS NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DE PAVIMENTAÇÃO - EPUSP.....	69
3.3.1 MATERIAIS PÉTREOS E LIGANTES ASFÁLTICOS (LTP).....	69
3.3.2 DOSAGEM DO BBTM 0/6 (LTP).....	71
<b>4. ESTUDOS DE CASOS.....</b>	<b>84</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	84
4.2 ACOMPANHAMENTO DA RESTAURAÇÃO DO REVESTIMENTO DA AUTO-ESTRADA A6 (PARIS LYON) EM BBTM 0/6.....	84
4.2.1 HISTÓRICO DO TRECHO.....	85
4.2.2 SOLUÇÃO DE RESTAURAÇÃO – BBTM 0/6.....	87
4.2.3 MATERIAIS.....	88
4.2.4 VERIFICAÇÃO DA DOSAGEM.....	93
4.2.5 PRODUÇÃO.....	104
4.2.6 EXECUÇÃO.....	108
4.2.7 ENSAIOS DE CONTROLE TECNOLÓGICO.....	120
4.2.7.1 VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA E DO TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO..	121
4.2.7.2 EXTRAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA DO PAVIMENTO.....	124
4.2.7.3 AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA – METODO DA MANCHA DE AREIA.....	125

4.2.8 AVALIAÇÃO DA MACRO E DA MICROTTEXTURA EM LABORATÓRIO (AVALIAÇÃO ÓPTICA SEM CONTATO).....	125
4.3 TRECHO EXPERIMENTAL DE BBTM 0/10 NA RODOVIA PRESIDENTE CASTELO BRANCO.....	155
4.3.1 MATERIAIS.....	156
4.3.2 DOSAGEM.....	158
4.3.3 PRODUÇÃO.....	163
4.3.4 EXECUÇÃO.....	165
4.3.5 ENSAIOS DE CONTROLE TECNOLÓGICO.....	169
4.3.5.1 AVALIAÇÃO DA MACROTTEXTURA – MÉTODO DA MANCHA DE AREIA.....	170
4.3.5.2 AVALIAÇÃO DO QUOCIENTE DE IRREGULARIDADE E ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL.....	171
4.3.5.3 AVALIAÇÃO DO AFUNDAMENTO NA TRILHA DE RODA.....	176
4.3.6 VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA (QUEBRA DE AGREGADOS NA COMPACTAÇÃO MARSHALL) – EXTRAÇÃO DE LIGANTE ASFALTICO.....	178
<b>5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....</b>	<b>185</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>194</b>
<b>ANEXO</b>	

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Esquema do princípio de funcionamento da PCG3 (LCPC, 2003) ..	31
Figura 2.2 – PCG3.....	32
Figura 2.3 – Mistura dentro do molde metálico.....	32
Figura 2.4 – Misturadores Mecânicos.....	36
Figura 2.5 – Mesa Compactadora tipo LPC.....	37
Figura 2.6 – Compactação com cilindro metálico.....	37
Figura 2.7 – Simulador de Tráfego – LPC.....	38
Figura 2.8 – Medida dos afundamentos.....	39
Figura 2.9 – Materiais para o Ensaio de Mancha de Areia.....	41
Figura 2.10 – Espalhamento circular das esferas de vidro.....	41
Figura 2.11 – Mancha de Areia após 3.000 ciclos.....	41
Figura 2.12 – <i>Triboroute</i> .....	42
Figura 2.13 – Detalhe da sapata do <i>Triboroute</i> .....	42
Figura 2.14 – Aspecto final do BBTM 0/10 de Ponts des Cés (França).....	46
Figura 2.15 – BBTM 0/6 e BBTM 0/10 aplicados na pista experimental do LCPC.....	46
Figura 2.16 – Medida da temperatura.....	47
Figura 2.17 – Pesagem do conjunto recipiente+amostra+percloroetileno.....	48
Figura 2.18 – Broqueamento.....	49
Figure 2.19 – Corpo-de-prova extraído.....	49
Figura 2.20 – Espalhamento das esferas de vidro sobre a camada de BBTM recém-acabada.....	50
Figure 2.21 – Medida do diâmetro do círculo.....	50
Figura 2.22 – Avaliações da macrotextura a cada 20 m.....	51
Figura 2.23 – Pontos dos ensaios sobre as trilhas de roda.....	51
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/6 (LCPC).....	57
Figura 3.2 – Relação entre o módulo de riqueza (K) e o teor de ligante asfáltico para o BBTM 0/6 (LCPC).....	58

Figura 3.3 – PCG 2 (LCPC).....	59
Figura 3.4 – Compactação do BBTM 0/6 (LCPC) – PCG 2.....	60
Figura 3.5 – Interior do corpo-de-prova de BBTM 0/6 (LCPC) após a compactação.....	61
Figura 3.6 – Deformação permanente do BBTM 0/6 (LCPC).....	63
Figura 3.7 – Mancha de areia do BBTM 0/6 (LCPC) no ciclo 0 (a) e após 3.000 ciclos (b).....	64
Figura 3.8 – Misturador BBMAX 80.....	65
Figura 3.9 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/10 F50.....	67
Figura 3.10 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/10 F51.....	67
Figura 3.11 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/10 F52.....	68
Figura 3.12 – Compactação PCG3 do BBTM 0/10 – F50, F51 e F52.....	69
Figura 3.13 – Corpos-de-prova broqueados das placas – BBTM 0/6 (LTP).....	72
Figura 3.14 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/6 (LTP).....	73
Figura 3.15 – Comparação entre a estrutura interna das placas de BBTM 0/6 fabricadas no LCPC (França) e no LTP (Brasil).....	74
Figura 3.16 – Deformação permanente das placas de BBTM 0/6 (LTP) com 5,5% e 6,0% de ligante asfáltico.....	75
Figura 3.17 – Moldes para o Ensaio Duriez (LTP).....	80
Figura 3.18 – Prensa para a compactação dos corpos-de-prova do Ensaio Duriez.....	80
Figura 3.19 – Corpos-de-prova Duriez.....	81
Figura 3.20 – Aplicação da pressão de 47kPa nos copos-de-prova destinados à imersão em água.....	81
Figura 3.21 – Corpos-de-prova em imersão em água.....	81
Figura 3.22 – Ensaio de compressão simples dos corpos-de-prova Duriez.....	81
Figura 3.23 – Histograma da distribuição normal das resistências à compressão simples do Ensaio Duriez do BBTM 0/6 na França e no Brasil.....	83
Figura 4.1– Picnômetros vazios.....	90
Figura 4.2 – Pesagem do picnômetros com suas rolhas.....	90
Figura 4.3 – Óleo de parafina.....	91
Figura 4.4 – Pesagem do picnômetro+parafina.....	91



Figura 4.27 – Parte do tambor onde os agregados são aquecidos e em seguida misturados ao ligante asfáltico.....	107
Figura 4.28 – Silo anti-segregação (estocagem).....	107
Figura 4.29 – Carregamento dos caminhões.....	107
Figura 4.30 – Pesagem dos caminhões.....	108
Figura 4.31 – Chegada dos caminhões na obra.....	108
Figura 4.32 – Fresagem.....	109
Figura 4.33 – Camada de BBDr 0/14 existente.....	109
Figura 4.34 – Geogrelha aplicada ao longo da trinca longitudinal.....	110
Figura 4.35 – Detalhe da geogrelha.....	110
Figura 4.36 – Aplicação do BBSG 0/10 sobre a geogrelha.....	110
Figura 4.37 – Compactação do BBSG 0/10.....	110
Figura 4.38 – Pintura de ligação com salgamento no acostamento (emulsão modificada + agregados na fração 4/6mm).....	111
Figura 4.39 – Caminhão com o misturador e aplicador do ECF (mistura asfáltica a frio).....	112
Figura 4.40 – Aspecto do ECF dentro de um recipiente.....	112
Figura 4.41 – Aplicação do ECF.....	113
Figura 4.42 – Camada de ECF pronta.....	113
Figura 4.43 – Transferência da mistura do caminhão para o alimentador.....	114
Figura 4.44 – Transferência da mistura do alimentador para a vibroacabadora por meio de uma esteira adicional.....	114
Figura 4.45 – Conjunto de grandes parafusos helicoidais e de esteiras de degraus do alimentador.....	115
Figura 4.46 – Vibroacabadora de grande largura (12 m).....	115
Figura 4.47 – Conjunto de grandes parafusos helicoidais ao longo de toda a largura da vibroacabadora (a) e detalhe dos parafusos (b).....	116
Figura 4.48 – Defeito (riscos provenientes do arrancamento de parte dos agregados) ocasionados por uma falta de regulagem da mesa da vibroacabadora.....	116
Figura 4.49 – Vibroacabadora para o espalhamento do acostamento.....	117

Figura 4.50 – Vibroacabadora situada ao lado da vibroacabadora de grande largura na execução do refúgio de superlargura.....	117
Figura 4.51 – Compactação do BBTM 0/6 (três compactadores).....	118
Figura 4.52 – Compactadores o mais próximo possível da vibroacabadora.....	118
Figura 4.53 – Camada de BBTM 0/6 após a pintura da sinalização horizontal.....	118
Figura 4.54 – Medida da temperatura na vibroacabadora.....	121
Figura 4.55 – Coleta das amostras antes da partida dos caminhões para a obra (controle do construtor).....	121
Figura 4.56 – Coleta da amostra da mistura na vibroacabadora (controle exterior).....	121
Figura 4.57 – Amostra dentro do recipiente metálico.....	122
Figura 4.58 – Pesagem da amostra.....	122
Figura 4.59 – Amostra com percloroetileno.....	123
Figura 4.60 – Agitação da amostra.....	123
Figura 4.61 – Lavagem dos agregados com percloroetileno.....	123
Figura 4.62 – Agregados prontos para a secagem em estufa.....	123
Figura 4.63 – Ensaio de granulometria (peneiramento).....	124
Figura 4.64 – Pesagem dos agregados.....	124
Figura 4.65 – Medida do diâmetro da mancha de areia sobre o BBTM 0/6 da Auto-estrada A6.....	125
Figura 4.66 – Compactação com o cilindro metálico (LRPC de Autun).....	128
Figura 4.67 – Medida da HS das placas (a) e detalhe da textura (b).....	128
Figura 4.68 – Colocação do papel Kraft sobre a pintura de ligação.....	129
Figura 4.69 – Camada de BBTM 0/6 depois da primeira passagem do rolo compactador.....	129
Figura 4.70 – Recorte (a) e extração da placa (b).....	130
Figura 4.71 – Placa extraída de campo.....	130
Figura 4.72 – Medida da macrotextura da placa extraída .....	130
Figura 4.73 – Extração dos corpos-de-prova (a) e detalhe da placa após o broqueamento (b).....	133
Figura 4.74 – Corpos-de-prova extraídos ( $\phi = 225$ mm e espessura = 40 mm)....	133

Figura 4.75 – Equipamento Wehner & Schulze.....	134
Figura 4.76 – Polimento (cones revestidos de borracha).....	134
Figura 4.77 – Etapa de frenagem.....	134
Figura 4.78 – Sapatas de frenagem.....	134
Figura 4.79 – Detalhe do desgaste das sapatas de frenagem.....	134
Figura 4.80 – Coeficiente de atrito ( $\mu_{\text{estado inicial}}$ ).....	136
Figura 4.81 – Histograma distribuição normal do coeficiente de atrito WS.....	140
Figura 4.82 – Gráfico dos limites máximos, mínimos e média do coeficiente de atrito das amostras – <i>Interval Plot</i> .....	141
Figura 4.83 – Equipamento de medida da macrotextura sem contato – raio laser	142
Figura 4.84 – Imagens em 3D das amostras extraídas das placas de BBTM 0/6..	145
Figura 4.85 – Relação entre HS e Sq.....	146
Figura 4.86 – Relação entre Sq e Ssk.....	147
Figura 4.87 – Relação entre HS e Sq das placas antes e depois do ensaio de deformação permanente.....	148
Figura 4.88 – Imagens em 3D das placas de deformação permanente – modo de compactação Cooperação Franco-Alemã Coëx/LCPC.....	149
Figura 4.89 – Imagens em 3D das placas de deformação permanente – modo de compactação LCPC.....	149
Figura 4.90 – Relação entre Sq e Ssk das placas submetidas ao ensaio de deformação permanente.....	150
Figura 4.91 – Pêndulo Britânico.....	152
Figura 4.92 – Detalhe da sapata de borracha.....	152
Figura 4.93 – Comparação entre as sapatas.....	152
Figura 4.94 – Evolução do coeficiente de atrito BPN em função do polimento...	152
Figura 4.95 – Equipamento de micromedidas Stil.....	153
Figura 4.96 – Resultados do cálculo sobre o perfil de rugosidade.....	154
Figura 4.97 – Resultados do cálculo sobre o perfil de ondulação.....	154
Figura 4.98 – Distribuição Granulométrica do BBTM 0/10 – Trecho Experimental e Rodovia Presidente Castelo Branco.....	158
Figura 4.99 – Mistura acomodada no molde para a compactação com o cilindro metálico.....	161

Figura 4.100 – Interior da placa de BBTM 0/10.....	161
Figura 4.101 – Simulador de Tráfego LPC (LTP/EPUSP).....	162
Figura 4.102 – Deformação permanente da mistura de BBTM 0/10 do Trecho Experimental.....	162
Figura 4.103 – Mancha de areia ciclo 0 BBTM 0/10 do Trecho Experimental....	163
Figura 4.104 – Mancha de areia 3.000 ciclos BBTM 0/10 do Trecho Experimental.....	163
Figura 4.105 – Usina Gravimétrica SERVENG-CILVISAN.....	164
Figura 4.106 – Tela de controle das atividades da Usina Gravimétrica.....	164
Figura 4.107 – Primeira mistura de BBTM 0/10.....	165
Figura 4.108 – Trecho experimental imprimado.....	166
Figura 4.109 – Pintura de ligação do trecho da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	166
Figura 4.110 – Vibroacabadora Voëgele na aplicação do BBTM 0/10 no Trecho Experimental (a) e detalhe do <i>ski</i> para o controle da planicidade (b).....	166
Figura 4.111 – Vibroacabadora Voëgele utilizada na aplicação do BBTM do trecho da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	167
Figura 4.112 – Rolo compactador de chapa sem vibração – BBTM 0/10 do Trecho Experimental.....	167
Figura 4.113 – Compactadores utilizados no trecho da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	168
Figura 4.114 – Lubrificação dos rolos de chapa com água.....	168
Figura 4.115 – Detalhe da textura superficial do BBTM 0/10 Trecho Experimental.....	168
Figura 4.116 – Visão geral da camada de BBTM 0/10 concluída em uma das faixas da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	169
Figura 4.117 – Resultados de Mancha de Areia (HS) do BBTM 0/10 da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	171
Figura 4.118 – Perfilômetro CyberLaser.....	172

Figura 4.119 – Quociente de irregularidade na faixa 1 (esq) da pista oeste da Rodovia Presidente Castelo Branco antes e após BBTM 0/10 (Fonte: Empresa Serveng-Cilvisan).....	174
Figura 4.120 – Quociente de irregularidade na faixa 2 (central) da pista oeste da Rodovia Presidente Castelo Branco antes e após BBTM 0/10 (Fonte: Empresa Serveng-Cilvisan).....	175
Figura 4.121 – Quociente de irregularidade na faixa 3 (dir) da pista oeste da Rodovia Presidente Castelo Branco antes e após BBTM 0/10 (Fonte: Empresa Serveng-Cilvisan).....	175
Figura 4.122 – Treliza para a avaliação da flecha na trilha de roda (DNER 08/94 -PRO).....	177
Figura 4.123 – Aparelho Soxhlet instalado no LTP.....	179
Figura 4.124 – Verificação da granulometria de corpos de prova Marshall de BBTM0/10 compactados com 40, 50 e 75 golpes (Rodovia Presidente Castelo Branco).....	183

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 – Distribuição do BBTM na malha viária francesa.....	12
Tabela 2.2 – Porcentagem de utilização do BBTM em países europeus, exceto a França.....	13
Tabela 2.3 – Composição do BBTM (BROSSEAUD et al., 1997 b).....	15
Tabela 2.4 – Valores do módulo de riqueza (K) para o BBTM (XP P 98 137, 2001).....	19
Tabela 2.5 – Porcentagem de vazios (XP P 98 137, 2001).....	20
Tabela 2.6 – Características mecânicas (XP P 98 137, 2001).....	21
Tabela 2.7 - Características dos ligantes asfálticos convencionais franceses (EN 12591, 1999).....	24
Tabela 2.8 – Níveis de dosagem das misturas asfálticas francesas.....	26
Tabela 2.9 – Superfície específica dos agregados (LPC, 2004).....	29
Tabela 2.10 – Principais características da PCG 3 (LCPC, 2003).....	31
Tabela 2.11 – Classificação da macrotextura (NF 98 216-1, 1992).....	40
Tabela 2.12 – Temperatura de espalhamento (XP P 98 137, 2001).....	45
Tabela 3.1 – Distribuição granulométrica dos agregados – BBTM 0/6 (LCPC)...	56
Tabela 3.2 – Proporção de cada fração de agregado na composição do BBTM 0/6 (LCPC).....	56
Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica das curvas de BBTM 0/6 (LCPC).....	57
Tabela 3.4 – Folha de Compactação – BBTM 0/6.....	62
Tabela 3.5 – Proporção de cada fração de agregado e as características das misturas asfálticas de BBTM 0/10 estudadas.....	66
Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	70
Tabela 3.7 – Distribuição granulométrica das frações de agregados.....	70
Tabela 3.8 – Resultados da caracterização do asfalto modificado por 4% polímero (AMP).....	71
Tabela 3.9 – Composição do BBTM 0/6 (LTP).....	72
Tabela 3.10 – Evolução da macrotextura do BBTM 0/6 (LTP).....	75
Tabela 3.11 – Perda por abrasão no Ensaio Cântabro – BBTM 0/6 (LTP).....	78

Tabela 4.1 – Granulometria dos agregados.....	89
Tabela 4.2 – Proporção de cada fração de agregado na composição do BBTM 0/6 do primeiro trecho experimental.....	94
Tabela 4.3 – Proporção de cada fração de agregado na composição do BBTM 0/6 do segundo trecho experimental.....	94
Tabela 4.4 – Folha de compactação BBTM 0/6 – Tráfego leve (LRPC de Autun).....	102
Tabela 4.5 – Folha de compactação - Modo Cooperação Franco-Alemã Cöex/LCPC.....	126
Tabela 4.6 – Resultados de HS medidas sobre as placas.....	131
Tabela 4.7 – Identificação das amostras.....	132
Tabela 4.8 – Coeficiente de atrito em função do polimento ( $\mu_{ws}$ ).....	136
Tabela 4.9 – Resultados de HS, Sq e Ssk para cada amostra.....	144
Tabela 4.10 – Proporção de agregados na composição do Microlastic.....	156
Tabela 4.11 – Proporção de agregados na composição do BBTM 0/10 do trecho experimental e do trecho da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	157
Tabela 4.12 – Composição da curva do BBTM 0/10 do trecho experimental e da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	157
Tabela 4.13 – Parâmetros de dosagem do Microlastic 0/10.....	159
Tabela 4.14 – Propriedades de dosagem do BBTM 0/10.....	160
Tabela 4.15 – Resultados da mancha de areia de classificação da macrotextura BBTM 0/10 do Trecho Experimental.....	163
Tabela 4.16 – Valores médios de QI e classificação de cada faixa de tráfego da Pista Oeste da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	176
Tabela 4.17 – Resultados da classificação do estado da superfície.....	176
Tabela 4.18 – Porcentagem de vazios em função do número de golpes do compactador Marshall – BBTM 0/10 da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	183
Tabela 4.19 – Porcentagem de vazios de corpo-de-prova extraídos da camada de BBTM da Rodovia Presidente Castelo Branco.....	184

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRATI – Associação Brasileira de Empresas de Transportes Intermunicipais, Interestaduais e Internacionais de Passageiros
- AFNOR – *Association Française de Normatisation*
- AIPCR – *Association Mondiale de la Route*
- APL – *Analyseur de Profil en Long*
- APRR - *Autoroutes Paris Rhin Rhône*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- BBDR – *Béton Bitumineux Drainant*
- BBM – *Béton Bitumineux Mince*
- BBMAX – *Malaxeur thermo-régulé pour matériaux enrobés*
- BBSG – *Béton bitumineux semi grenu*
- BBTM – *Béton Bitumineux Très Mince*
- CCTP – *Cahier des Clauses Techniques Particulières du Marché*
- CFTR – *Comité Français pour les Techniques Routières*
- CNT – Confederação Nacional dos Transportes
- DERSA – Empresa de Desenvolvimento Rodoviário S/A
- DER-SP – Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
- DNIT – Departamento de Infra-Estrutura de Transportes
- EME – Enrobé à Module Elevé
- EVA – Etileno-Acetato de Vinila
- HS – *Hauteur au Sable*
- LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
- LPC – *Laboratoire des Ponts et Chaussées*
- LRPC – *Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées*
- LTP/EPUSP – Laboratório de tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- PCG – *Presse de Compactage à Cisaillement Giratoire*

PMT – *Profondeur Moyenne de Texture*

SBS – *Etireno-Butadieno-Estireno*

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

SMA – *Stone Matrix Asphalt*