

3. MATERIAIS PESQUISADOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE DOSAGEM

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as características dos materiais utilizados, os resultados e a discussão dos ensaios de dosagem aos quais foram submetidas as misturas de BBTM, estudadas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* na França (LCPC – Centro de Nantes).

As misturas são compostas ora por materiais brasileiros, empregados nos estudos do LTP-EPUSP, ora por franceses, no LCPC, tendo suas composições adaptadas às peculiaridades das frações de cada material. No LCPC foram produzidas misturas de BBTM 0/6, as quais foram submetidas aos ensaios de dosagem preconizados pela metodologia francesa de dosagem (Ensaio PCG, Ensaio Duriez, Deformação Permanente e Evolução da Macrotextura), além de misturas de BBTM 0/10, recompondo o traço da mistura aplicada no trecho experimental da Rodovia Presidente Castelo Branco e, em seguida, realizando ensaios PCG com a PCG3. No LTP foram produzidas misturas de BBTM 0/6, avaliando o desgaste por meio do ensaio Cântabro e da ação deletéria da água pelo ensaio Duriez e, realizando-se ensaios de deformação permanente e evolução da macrotextura.

3.2 MISTURAS DE BBTM ESTUDADAS NO *LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES* – LCPC CENTRO DE NANTES

Durante os dois estágios no LCPC (Centro Nantes), a doutoranda pôde conhecer mais detalhadamente a metodologia de dosagem francesa.

Os ensaios executados tiveram dois objetivos principais. O primeiro objetivo consistiu em realizar todos os ensaios recomendados pela metodologia francesa para revestimentos delgados - Ensaio PCG (PCG 2 – segunda geração das prensas de compactação a cisalhamento giratório), Ensaio Duriez e Deformação Permanente, sendo este último seguido pela Avaliação da Macrotextura – compondo misturas de BBTM 0/6.

O segundo objetivo consistiu em utilizar a terceira geração das prensas de compactação a cisalhamento giratório (PCG 3) recompondo o BBTM 0/10 do trecho experimental da Rodovia Presidente Castelo Branco (SP 280).

3.2.1 MATERIAIS PÉTREOS E LIGANTES ASFÁLTICOS (LCPC)

Os materiais utilizados no LCPC para compor as misturas, tanto os agregados quanto os ligantes asfálticos, são todos de origem francesa..

Os agregados são de diorito, provenientes da Jazida Noubleau, cuja qualidade vem sendo comprovada ao longo dos vários anos de exploração e aproveitamento em camadas de revestimento, que são ainda mais sensíveis às propriedades dos agregados. O diâmetro máximo dos agregados que compuseram as misturas foi de 6 mm para o BBTM 0/6 e de 10 mm para o BBTM 0/10.

Para a dosagem das misturas de BBTM 0/6 foi escolhido o ligante asfáltico Styrelf 13, modificado com 3% do polímero elastomérico SBS, distribuído pela empresa ELF – TOTAL SA. A ELF-TOTAL S.A em parceria com o LCPC desenvolveu o Styrelf 13, cuja modificação corresponde a uma reação química denominada reticulação, desta forma o polímero forma uma malha irreversível, conferindo ao ligante um esqueleto elástico e excelentes propriedades mecânicas, além de um ótimo comportamento à estocagem.

O Styrelf 13 é aplicado na Europa na composição de concretos asfálticos convencionais, delgados, muito delgados e drenantes, ou ainda em misturas de areia-asfalto, ricas em ligante e utilizadas para a correção de trincas.

Para a dosagem do BBTM 0/10 não foram utilizados ligantes modificados por polímero, mesmo que estes sejam recomendados pela norma francesa XP P 98-137 (2001) em caso de aplicação em rodovias de tráfego pesado, já que o objetivo era avaliar o comportamento dessa mistura durante a compactação giratória com a PCG3. Portanto, adotou-se um ligante asfáltico convencional (35/50), também produzido pela empresa ELF-TOTAL S.A.

3.2.2 DOSAGEM DO BBTM 0/6 (LCPC)

A produção das duas misturas asfálticas no LCPC foi feita em um misturador do tipo BBMAX 25 (Capítulo 2, Figura 2.4b), com capacidade de 25 kg. A temperatura de usinagem para as misturas em que o ligante adotado foi o Styrelf 13 é de 175°C .

Composição Granulométrica

BBTM 0/6

O início da dosagem consiste em determinar a distribuição granulométrica condizente com os critérios de dosagem estabelecidos pela norma XP P 98-137 (2001) para um BBTM 0/6 classe 1:

- ✓ Fração 4/6 : 70 a 80%;
- ✓ Fração 0/2: 20 a 27%;
- ✓ Finos totais: 7 a 9%;
- ✓ Teor de ligante asfáltico: 6,2 a 6,7%;
- ✓ Módulo de riqueza (K): $\geq 3,5$.

Inicialmente foram compostas três curvas granulométricas, escolhendo-se uma curva que mais se aproximava da “curva teórica” (curva usada frequentemente em projetos de BBTM 0/6 classe 1) e outras duas compostas com +7% e -7% da fração-areia (0/2), para verificar a influência desta fração no comportamento do BBTM 0/6 durante a compactação com a PCG.

As frações escolhidas encontram-se na Tabela 3.1. Na Tabela 3.2 consta a porcentagem em massa de cada fração de agregado para a composição das curvas e na Tabela 3.3 a distribuição granulométrica da curva teórica, da curva adotada e das curvas com variação de $\pm 7\%$ na fração-areia, representadas no gráfico da Figura 3.1.

Tabela 3.1 – Distribuição granulométrica dos agregados – BBTM 0/6 (LCPC)

Abertura das Peneiras (mm)	% Passante em massa		
	Jazida Noubleau 4/6 *MVR 2,833	Jazida Noubleau 0/2 *MVR 2,863	Jazida Airvault Finos (fíler calcário) *MVR 2,706
20	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0
14	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	100,0	100,0
10	100,0	100,0	100,0
8	100,0	100,0	100,0
6,3	87,2	100,0	100,0
5	46,5	100,0	100,0
4	13,9	100,0	100,0
3,15	9,8	100,0	100,0
2	6,3	96,3	100,0
1	5,0	63,8	100,0
0,5	3,8	44,7	100,0
0,25	2,4	31,9	100,0
0,125	1,6	23,3	93,5
0,063	1,1	17,1	87

*MVR – massa específica do agregado (g/cm^3)

Tabela 3.2 – Proporção de cada fração de agregado na composição do BBTM 0/6 (LCPC)

Agregado Fração	% em massa		
	Curva +7% areia	Curva adotada (Média)	Curva +7% areia
4/6	66,5	73,5	80,5
0/2	31,0	24,0	17,0
Finos	2,5	2,5	2,5

Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica das curvas de BBTM 0/6 (LCPC)

Abertura das Peneiras (mm)	*Curva +7% fração-areia	*Curva adotada (Média)	*Curva Teórica	*Curva -7% fração-areia
20	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0	100,0
14	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	100,0	100,0	100,0
10	100,0	100,0	100,0	100,0
8	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	91,5	90,6	95,0	89,7
5	64,4	60,7	65,0	56,9
4	42,7	36,7	37,3	30,7
3,15	40,0	33,7	34,5	27,4
2	36,6	30,3	30,2	24,0
1	25,6	21,5	20,6	17,3
0,5	18,9	16,0	16,0	13,1
0,25	14,0	11,9	12,0	9,8
0,125	10,6	9,1	9,0	7,6
0,063	8,2	7,1	7,3	5,9

* % passante

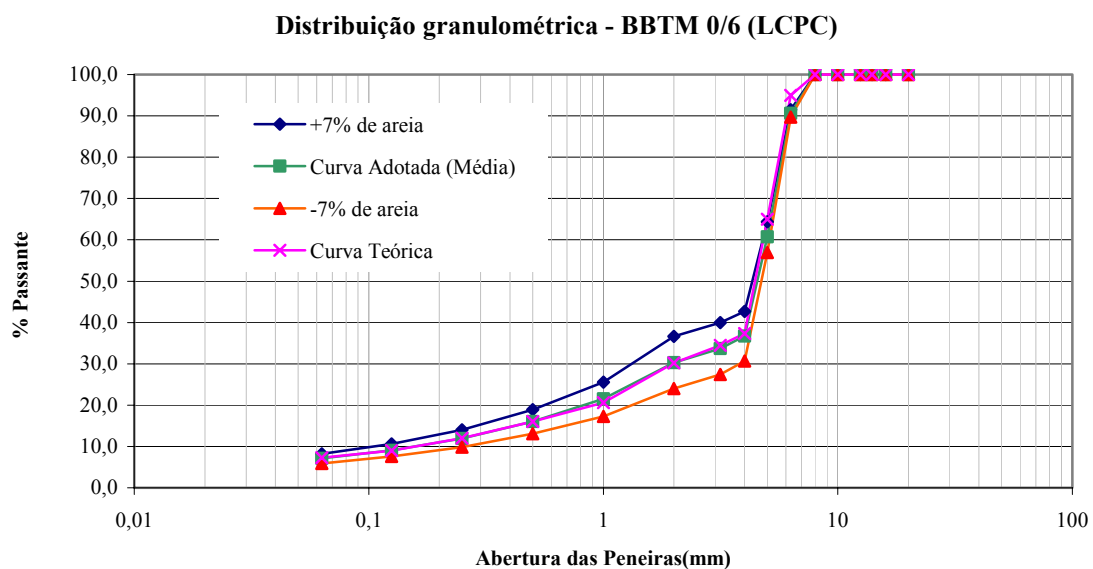


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/6 (LCPC)

Após a composição granulométrica, calculou-se a superfície específica total dos agregados e o teor de ligante asfáltico para cada mistura, pela Fórmula do Professor Duriez. Segundo a recomendação da XP P 98 137 adotou-se, com valor de $K \geq 3,4$, 3,84 para todas as misturas de BBTM. Para este valor de K , obteve-se um teor de

6,0% para a curva média, 6,15% para a composição com +7% da fração-areia, e 5,83% para a composição com -7% da fração-areia.

Para ilustrar a variação do teor de ligante asfáltico com o valor de K adotado confeccionou-se o gráfico da Figura 3.2, partindo-se do K_{\min} (3,4) recomendado pela norma XP P 98 137 (2001), até o teor máximo de ligante asfáltico usual para o BBTM 0/6 Classe 1, que é em torno de 4,5. Observa-se que uma pequena variação no valor de K corresponde a grandes alterações no teor de ligante asfáltico. Vale ressaltar que a relação demonstrada no gráfico da Figura 3.2 foi feita para ilustrar a tendência e a sensibilidade do teor de ligante frente à variação do K de Duriez, uma vez que foram utilizados apenas os valores da mistura de BBTM 0/6 estudada e, de acordo com a Fórmula do Prof. Duriez, a determinação do teor de ligante também depende da composição granular, portanto, não é geral para todas as misturas.

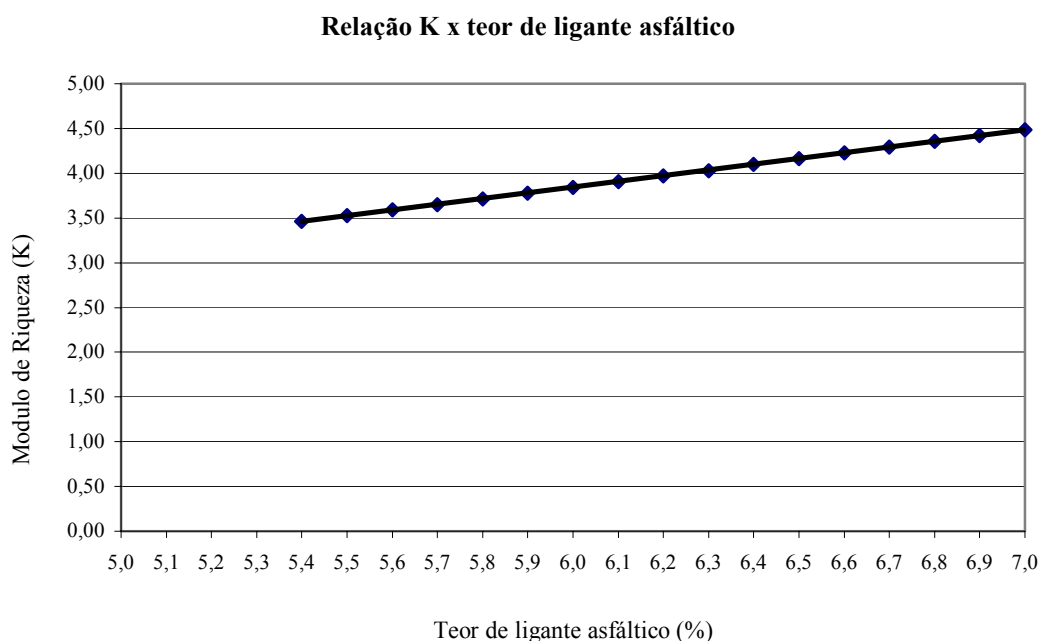


Figura 3.2 – Relação entre o módulo de riqueza (K) e o teor de ligante asfáltico para o BBTM 0/6 (LCPC)

Ensaio PCG 2

Depois de fabricadas, as misturas de BBTM 0/6 foram submetidas ao primeiro ensaio do Nível 1 do estudo de dosagem, o Ensaio PCG, por meio do qual determinou-se a porcentagem de vazios das misturas avaliadas.

A mistura é posta dentro de um molde cilíndrico, com 160 mm de diâmetro, que é encaixado na PCG 2 (Figura 3.3).



Figura 3.3 – PCG 2 (LCPC)

De acordo com os resultados obtidos após os 25 giros tem-se para o BBTM 0/6:

- ✓ 18,9% de vazios para a curva média;
- ✓ 23,3% de vazios para a mistura com - 7% da fração-areia;
- ✓ 14,8% de vazios para a mistura com + 7% da fração-areia.

Pôde-se então perceber que, com a variação de ± 7 da fração-areia (0/2) houve um desvio de aproximadamente 4% na porcentagem de vazios e duas misturas apresentaram porcentagens que atendem aos limites estabelecidos pela norma, ou seja, entre 12 e 20%. Porém, adotou-se a curva média por estar mais próxima da curva teórica.

A evolução de cada composição durante a compactação é mostrada no gráfico da Figura 3.4.

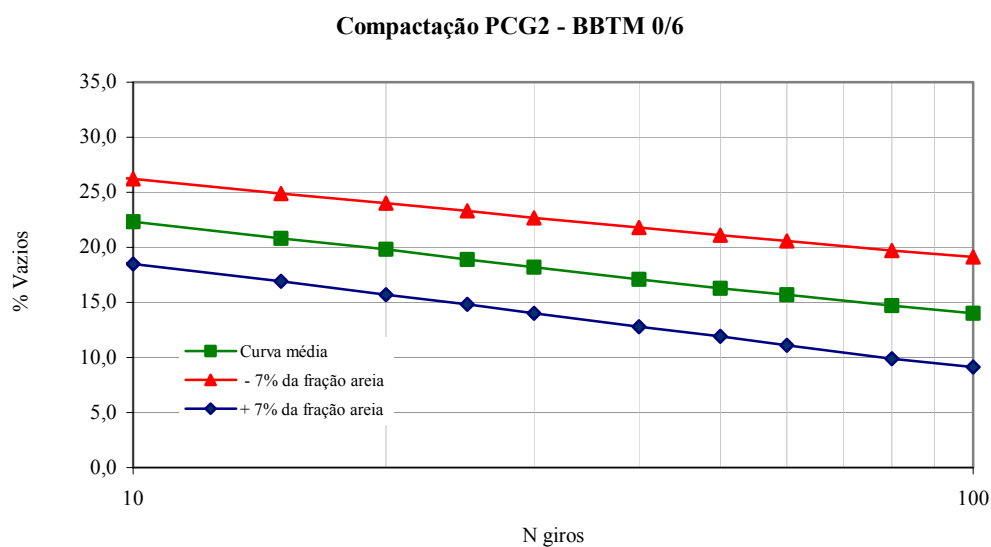


Figura 3.4 – Compactação do BBTM 0/6 (LCPC) – PCG2

A figura 3.5 mostra a distribuição dos materiais no interior de um dos 3 corpos-de-prova de BBTM 0/6 com 18,9% de vazios, cortados axialmente após a compactação, demonstrando a existência de maior volume de vazios no centro do corpo-de-prova que nas bordas. Ressalta-se que a PCG é empregada tão somente para a dosagem e estudo da variação de compacidade da mistura frente à energia de compactação. Os franceses não fazem uso dos corpos-de-prova da PCG para outros ensaios devido à heterogeneidade na distribuição dos vazios, intrínseca ao método. A média de volume de vazios dos corpos-de-prova tem grande relação com o volume de vazios em campo, para uma dada espessura da camada, embora não represente exatamente o arranjo granular em campo.



Figura 3.5 – Interior do corpo-de-prova de BBTM 0/6 (LCPC) após a compactação

Ensaio Duriez – Dano por Umidade Induzida

Este ensaio é muito importante para misturas asfálticas com elevado volume de vazios, tais como o BBTM, pois avalia a sensibilidade da mistura ao contato contínuo com a água. O efeito da água na integridade da mistura é avaliada pela relação r/R , como visto no item 2.5.3.

Os valores médios para a massa, diâmetro, altura e volume dos corpos-de-prova de BBTM 0/6 moldados foram respectivamente 1003 g, 80,1 mm, 88,7 mm e 447,2 cm³. Obtiveram-se 9,2% de vazios residuais, 22,1% de vazios ocupados por ar+ligante e 58,3% de vazios preenchidos apenas por ligante asfáltico.

A resistência (R) dos corpos-de-prova não-condicionados em água foi de 9,7 MPa e dos condicionados foi de 8,8 MPa, resultando na relação $r/R = 0,91$. Segundo a norma XP P 98-137 (2001), a relação r/R deve ser igual ou superior a 0,8. Portanto, a relação obtida para o BBTM 0/6 estudado é satisfatória, mostrando que a mistura tem pequena propensão ao descolamento da película de ligante asfáltico do agregado por ação da umidade.

Deformação Permanente e Evolução da Macrot textura

O BBTM 0/6 é um revestimento delgado cuja compactação em campo é feita por rolos compactadores de chapa. Portanto, com o intuito de aproximar ao máximo as condições de laboratório às de campo, as placas para o ensaio de deformação permanente foram compactadas na Mesa Compactadora LPC com um cilindro metálico encaixado no pneu da mesa.

A folha de compactação com a seqüência de passadas para a compactação do BBTM 0/6 encontra-se na Tabela 3.4 e corresponde à compactação padrão para revestimentos delgados para rodovias de tráfego pesado, sendo denominada neste texto “compactação modo LCPC”.

Tabela 3.4 – Folha de Compactação – BBTM 0/6

Av	Ar	C	Altura (mm)	Pressão Pneu (bar)	Pressão Eixo (bar)	Posição
		1	67	6	1,2	Bloqueada
		1	60	6	1,2	Bloqueada
		2	59	6	2,5	Livre
		2	56	6	2,5	Livre
		2	54	6	2,5	Livre
		2	52	6	2,5	Livre
		2	52	6	2,5	Livre
		2	50	6	2,5	Livre
1			50	6	2,5	Bloqueada
	1		50	6	2,5	Bloqueada
		1	50	6	2,5	Bloqueada

Cilindro Metálico

Av : *Avant*- Para frente

Ar : *Arière*- Para trás

C : *Centre* - Centro

Depois de climatizadas a 60°C, as placas foram submetidas a ciclos de passagem do pneu do Simulador de Tráfego LPC e após cada seqüência de ciclos, mediu-se a deformação (afundamento) resultante da passagem do pneu. Os afundamentos são

normalmente medidos a 30, 100, 300, 1.000 e 3.000 para revestimentos delgados, porém decidiu-se estender o ensaio até 30.000 ciclos.

A porcentagem da deformação tomada como referência é de no máximo 20%, conforme recomendação da norma XP P 98-137 (2001) para o BBTM 0/6, aos 3.000 ciclos.

Como se pode observar no gráfico da Figura 3.6 o BBTM 0/6 apresentou deformações inferiores a 20% ao final dos 30.000 ciclos e aos 3.000 ciclos a deformação registrada foi de 6,4%, sendo portanto provável seu bom desempenho quando solicitado pelas cargas provenientes do tráfego dos veículos.

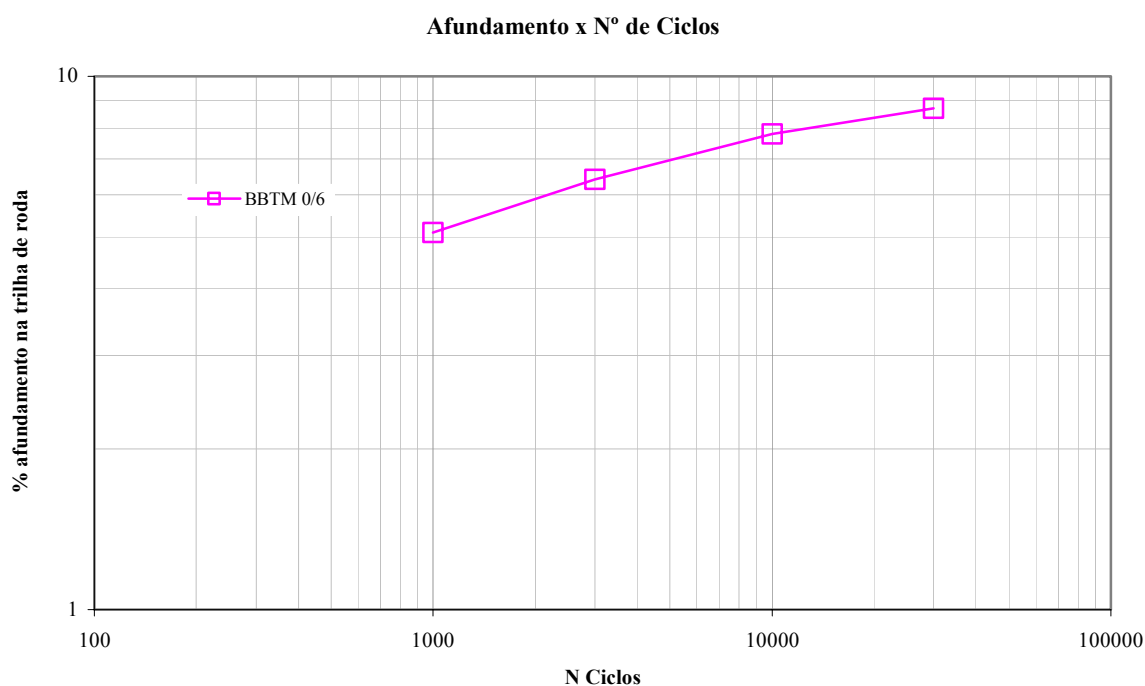


Figura 3.6 – Deformação permanente do BBTM 0/6 (LCPC)

Por meio da simulação do tráfego em laboratório foi possível avaliar a redução da macrotextura das placas de BBTM 0/6, medindo-se HS no ciclo 0 (HS_{inicial}) e após os 3000 ciclos (HS_{3000}), como ilustrado na Figura 3.7 (a e b).



Figura 3.7 – Mancha de areia do BBTM 0/6 (LCPC) no ciclo 0 (a) e após 3.000 ciclos (b)

A HS média inicial medida nas placas de BBTM 0/6 foi de 1,3 mm, classificando a textura superficial como rugosa ou aberta. Após os 3.000 ciclos, HS do BBTM 0/6 reduziu-se para 0,83 mm, mantendo-se rugosa e apresentando uma perda de 34%.

3.2.3 DOSAGEM DO BBTM 0/10 (LCPC)

A dosagem do BBTM 0/10 não foi composta por todos os ensaios determinados para o Nível 1 e 2 do estudo de dosagem, pois além da recomposição do traço do BBTM 0/10 produzido no Brasil um dos objetivos era se familiarizar com o funcionamento da PCG 3.

Os ensaios estavam previstos para serem realizados no LCPC em Nantes, porém devido a problemas técnicos foram transferidos para o LRPC (*Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées*) da cidade de Angers.

A produção das duas misturas foi feita em um misturador do tipo BBMAX 80 (Figura 3.8), com capacidade de 80 kg. A temperatura de usinagem da mistura com o ligante puro 35/50 foi de 160°C.



Figura 3.8 – Misturador BBMAX 80

Composição Granulométrica

A recomposição do BBTM 0/10 do trecho experimental da Rodovia Castelo Branco teve por objetivo verificar a granulometria e a porcentagem de vazios quando compactada com a PCG, haja vista que é uma mistura asfáltica que não possui parâmetros de dosagem Marshall, mas que no Brasil foi dosada por esta metodologia.

Para o estudo do BBTM 0/10 foram compostos três traços:

- ✓ F50 – recomposição o mais fiel possível ao traço original do BBTM 0/10 do trecho experimental;
- ✓ F51 – traço com 2% de finos (fíler calcáreo);
- ✓ F52 – tentativa de recomposição de um BBTM 0/10 classe 1 clássico de acordo com as recomendações da norma francesa XP P 98-137 ($K > 3,4$, 70 a 80% da fração 6/10, 20 a 27% da fração 0/2 e 7 a 9% de finos totais).

As proporções de cada fração utilizada para compor as misturas estudadas e suas respectivas características encontram-se na Tabela 3.5. As distribuições granulométricas de cada mistura são ilustradas nos gráficos das Figuras 3.9, 3.10 e 3.11.

Tabela 3.5 – Proporção de cada fração de agregado e as características das misturas asfálticas de BBTM 0/10 estudadas

Fracão agregado	% em massa		
	BBTM 0/10 F50	BBTM 0/10 F51	BBTM 0/10 F52
6/10 Noubleau	68,0	70,0	74,0
4/6 Noubleau	4,0	3,0	0,0
2/4 Noubleau	5,0	4,0	0,0
0/2 Noubleau	17,0	21,0	23,0
Fíler Airvault	6,0	2,0	3,0
Teor de ligante asfáltico (35/50)	5,5 ppc ¹	5,1 ppc ¹	5,3 ppc ¹
Módulo de Riqueza (K)	3,45	3,44	3,46
² MVR dos agregados	2,829	2,835	2,833
² MVR da mistura	2,593	2,613	2,604

¹ppc = Peso de ligante / peso de agregados

²MVR – massa específica (g/cm³)

Os gráficos das Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 mostram que a descontinuidade na granulometria da mistura F50, assim como a curva teórica e da mistura F51, não é muito acentuada.

A única mistura, cuja distribuição granulométrica apresentou uma descontinuidade característica de um BBTM 0/10 clássico foi a própria mistura F52, embora seja muito semelhante à mistura F50.

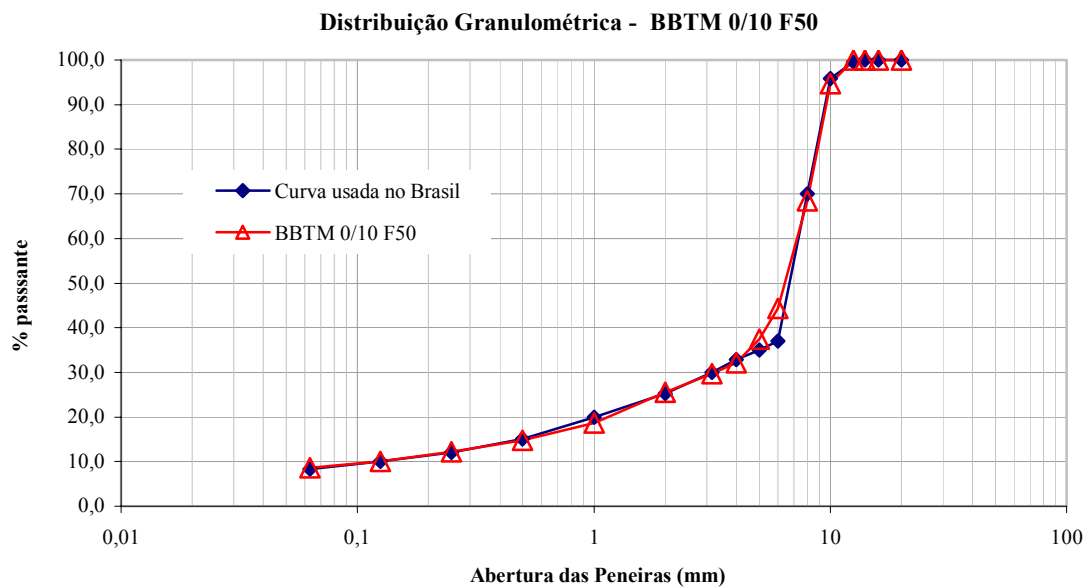


Figura 3.9 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/10 F50

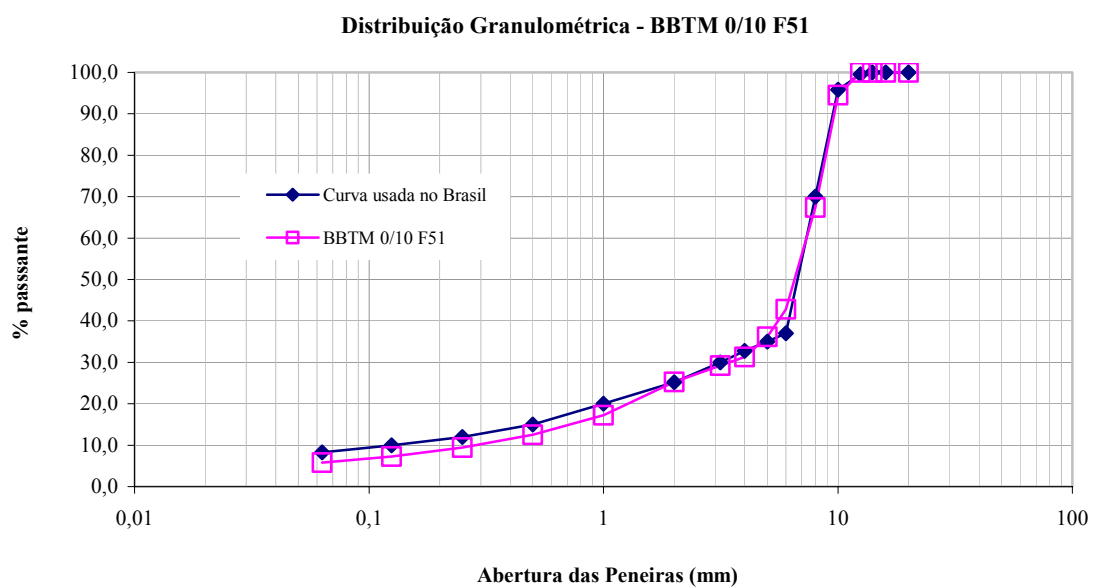


Figura 3.10 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/10 F51

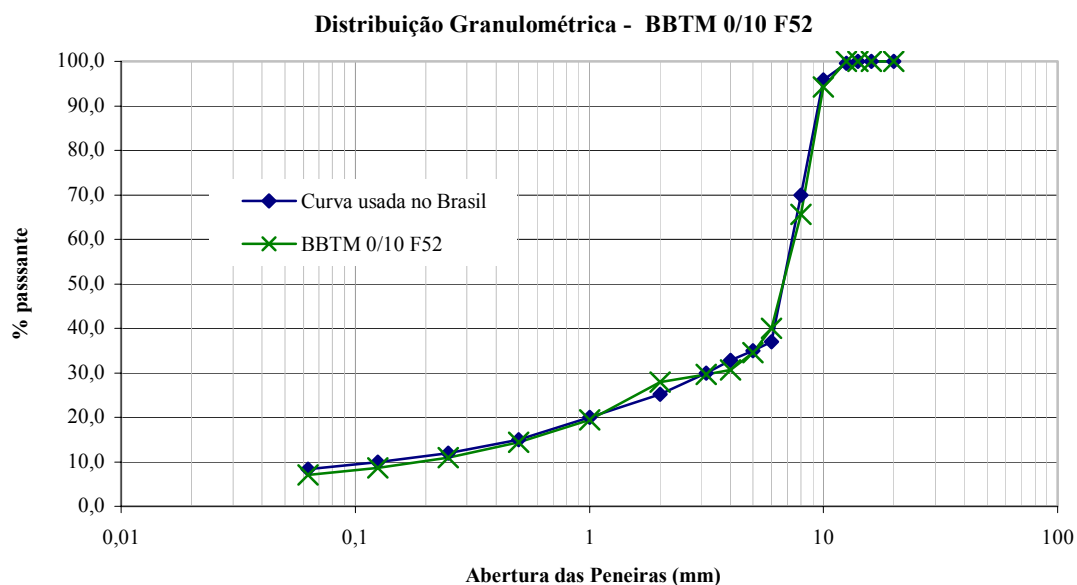


Figura 3.11 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/10 F52

Ensaio PCG3

A partir dos resultados obtidos no ensaio PCG com as misturas de BBTM 0/6 pôde-se verificar que nenhuma das três misturas estudadas apresentou uma porcentagem de vazios condizente com a porcentagem estabelecida na norma para um BBTM 0/10 classe 1 aos 25 giros da PCG, isto é, de 10 a 18%. Todas as porcentagens obtidas foram superiores à 18% (F50 – 18,8%, F51 – 19,8% e F52 – 18,5%), como é ilustrado na Figura 3.12.

Esses resultados mostram que além da porcentagem de vazios é preciso atentar para a estrutura e para a distribuição granulométrica da mistura e para a forma dos agregados, sobretudo quando se trata de uma distribuição descontínua como a do BBTM, cuja descontinuidade é fundamental e indispensável para uma boa trabalhabilidade (redução da porcentagem de vazios sob uma compactação padrão).

Compactação PCG 3 - BBTM 0/10 F50, F51 e F52

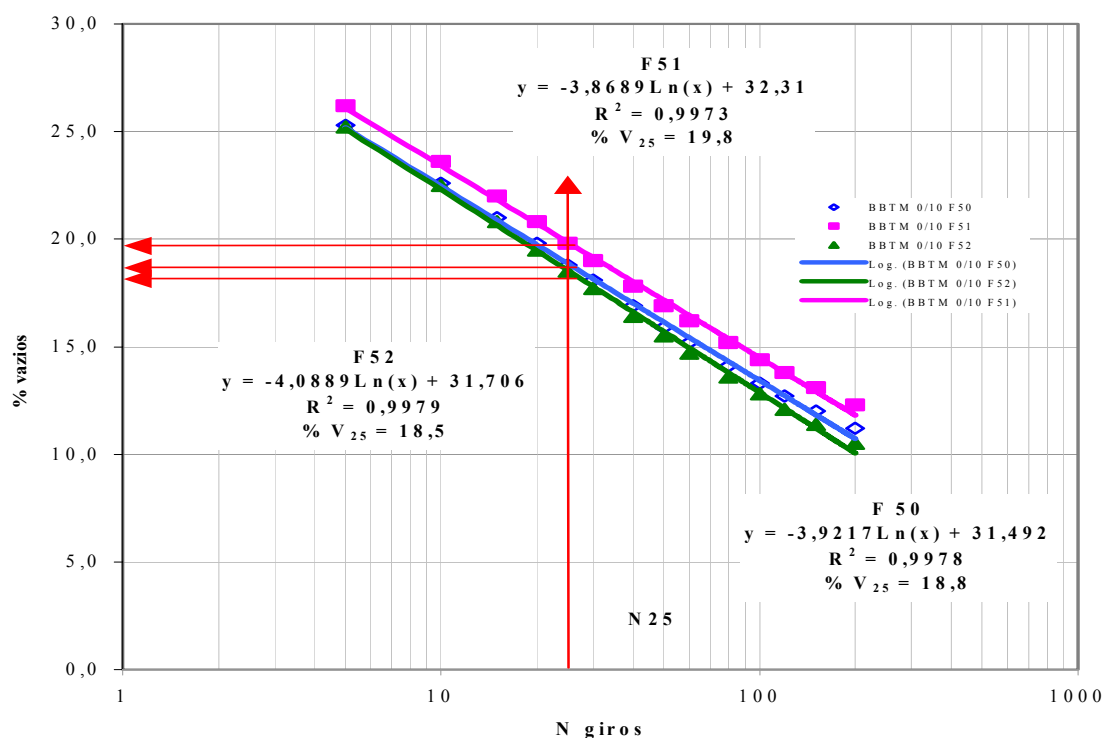


Figura 3.12 – Compactação PCG3 do BBTM 0/10 – F50, F51 e F52

3.3 MISTURAS DE BBTM ESTUDADAS NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DE PAVIMENTAÇÃO - EPUSP

3.3.1 MATERIAIS PÉTREOS E LIGANTES ASFÁLTICOS (LTP)

Os materiais pétreos utilizados para a composição das misturas de BBTM 0/6 são todos nacionais.

Todos os agregados utilizados são de origem granítica, britados, de forma cúbica e provenientes da Pedreira Sargon S/A, localizada na Av. Airton Santos Heras Galvez - km 5, na cidade de Santa Isabel – SP.

Inicialmente tentou-se utilizar três tipos de agregados (Tabela 3.6): Pedrisco 00, Pó de Pedra Integral, Pó de Pedra Fundo e Fíler, sendo este último composto por uma fração de material passante na peneira N° 200 (0,0075 mm) – resultante do peneiramento do Pó de Pedra Fundo – e da Cal Hidratada CH1.

Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica dos agregados

Abertura das Peneiras (mm)	% Passante em massa		
	Pedrisco 00	Pó de Pedra Integral	Pó de Pedra fundo
9,5	100,00	100,00	100,00
6,300	99,66	99,91	100,00
4,750	90,79	95,23	100,00
2,000	16,83	64,43	100,00
1,180	9,17	54,37	99,97
0,590	5,74	41,39	78,07
0,425	4,89	35,65	65,85
0,300	4,19	30,70	54,75
0,177	3,43	24,31	41,09
0,150	3,00	20,43	33,01
0,075	2,12	13,22	20,01

Devido às características particulares da distribuição granulométrica do BBTM 0/6, não foi possível utilizar os agregados nas frações mostradas na Tabela 3.6 e como não se dispunha de outros agregados, foi necessário fracioná-los em 12 frações (passantes e retidas em peneiras de aberturas o mais próximo possível umas das outras), cujas respectivas distribuições granulométricas encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Distribuição granulométrica das frações de agregados

Abertura das Peneiras (mm)	pas 8	pas 6,3	pas 5	pas 4	pas 2	pas 1,2	pas 1	pas 0,59	pas 0,42	pas 0,25	pas 0,177	pas 0,15
	ret 6,3	ret 5	ret 4	ret 2	ret 1,2	ret 1	ret 0,59	ret 0,42	ret 0,25	ret 0,177	ret 0,15	ret 0,075
8,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	7,7	95,5	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
5,0	2,6	28,8	98,7	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	2,4	0,3	8,7	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	2,4	0,2	0,2	9,0	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,2	2,4	0,2	0,2	0,9	9,6	98,7	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,0	2,4	0,2	0,2	0,9	0,5	6,7	97,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,59	2,4	0,2	0,2	0,8	0,4	0,7	5,2	98,6	99,9	100,0	100,0	100,0
0,42	2,4	0,2	0,2	0,8	0,4	0,7	0,7	6,2	89,6	99,9	100,0	100,0
0,25	2,4	0,2	0,2	0,8	0,4	0,7	0,6	1,3	3,8	88,8	99,8	100,0
0,177	2,4	0,2	0,2	0,8	0,3	0,7	0,6	1,0	0,9	3,7	97,1	99,9
0,15	2,4	0,2	0,2	0,8	0,3	0,6	0,6	1,0	0,8	1,6	8,2	97,4
0,075	2,4	0,2	0,2	0,8	0,2	0,6	0,5	0,8	0,8	1,2	2,7	4,5

Na composição do BBTM 0/6 foi utilizado apenas um tipo de ligante asfáltico, modificado por 4 % de polímero SBS (AMP), cuja caracterização encontra-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultados da caracterização do asfalto modificado por 4% polímero (AMP)

Ensaio	AMP
Ponto de amolecimento (°C)	63,8
Penetração (dmm)	50
Ductilidade a 25°C (cm)	> 110
ECA, variação em massa (%)	0,007
ECA, % penetração original	71
Viscosidade a 135°C (cP)	1020
Viscosidade a 145°C (cP)	746
Viscosidade a 175°C (cP)	244
Recuperação Elástica, 25°C (%)	93
Recuperação Elástica por torção, 25°C(%)	76
Ponto de Fulgor	> 280
Estabilidade a 163°C, 5 dias, ΔPa	1,0

Fonte: Concessionária NovaDutra.

3.3.2 DOSAGEM DO BBTM 0/6 (LTP)

Embora o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação tenha adquirido uma PCG3, não foi possível realizar os ensaios com este equipamento em tempo hábil para a sua inclusão na tese. Como a metodologia de dosagem francesa e, por conseqüência, a norma XP P 98-137 (2001), não apresentam os parâmetros de dosagem Marshall para a mistura de BBTM 0/6, foi utilizado um método adaptado, no qual ao invés de corpos-de-prova Marshall foram compactadas placas com dimensões de 500 x 180 x 50 mm.

Foram escolhidos dois teores de ligante asfáltico, 5,5% e 6,0%, com os quais foram fabricadas três placas para cada teor. Duas placas foram destinadas ao ensaio de deformação permanente e uma para a extração de corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro igual a 100 mm (Figura 3.13), para a determinação da porcentagem de vazios por meio da pesagem hidrostática.



Figura 3.13 – Corpos-de-prova broqueados das placas – BBTM 0/6 (LTP)

A curva teórica do BBTM corresponde à curva estudada no LCPC em Nantes durante o estágio da doutoranda em 2004, nas proporções apresentadas na Tabela 3.9 em termos de porcentagem e de forma ilustrativa no gráfico da Figura 3.14.

Tabela 3.9 – Composição do BBTM 0/6 (LTP)

Fração de agregado (passante e retido)	% em massa
Passante na pen abert. 8,0 mm e retida na pen abert. 6,3 mm	6,4
Passante na pen abert. 6,3 mm e retida na pen abert. 5,0 mm	45,8
Passante na pen abert. 5,0 mm e retida na pen abert. 4,0 mm	12,4
Passante na pen abert. 4,0 mm e retida na pen abert. 2,0 mm	5,8
Passante na pen abert. 2,0 mm e retida na pen abert. 1,2 mm	7,2
Passante na pen abert. 1,2 mm e retida na pen abert. 1,0 mm	1,3
Passante na pen abert. 1,0 mm e retida na pen abert. 0,590 mm	4,2
Passante na pen abert. 0,590 mm e retida na pen abert. 0,420 mm	2,2
Passante na pen abert. 0,420 mm e retida na pen abert. 0,250 mm	3,2
Passante na pen abert. 0,250 mm e retida na pen abert. 0,177 mm	1,9
Passante na pen abert. 0,177 mm e retida na pen abert. 0,150 mm	0,4
Passante na pen abert. 0,150 mm e retida na pen abert. 0,075 mm	2,3
Fíler	6,0
Cal CH1	1,0

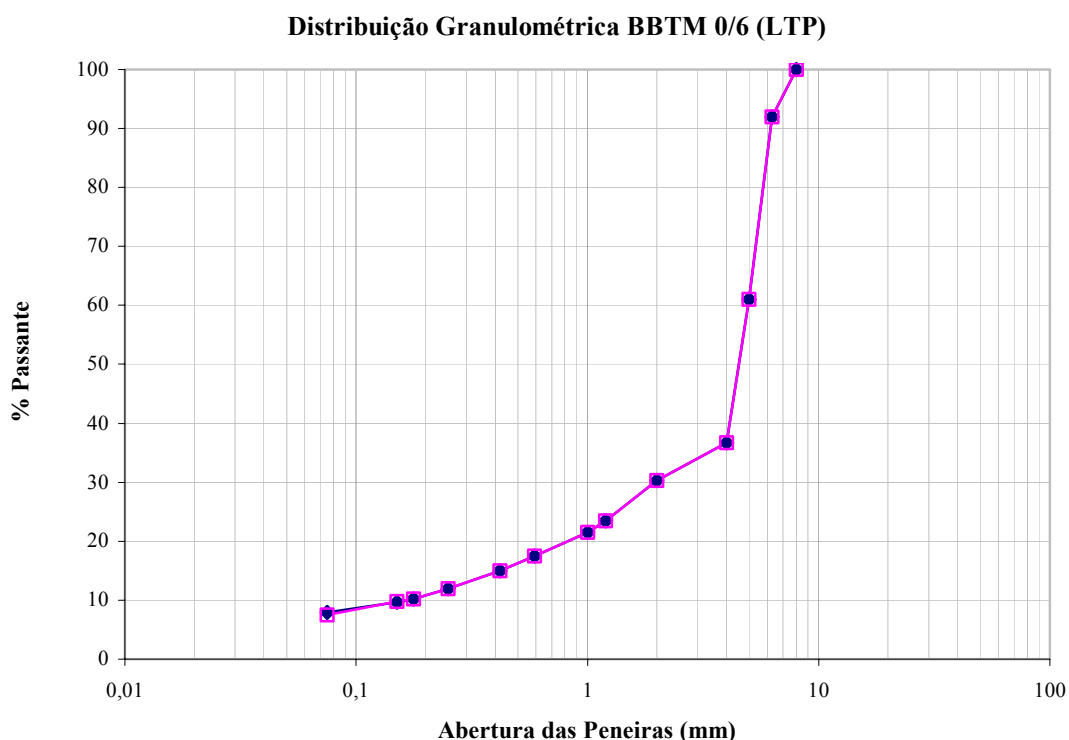


Figura 3.14 – Distribuição granulométrica do BBTM 0/6 (LTP)

Com os corpos-de-prova broqueados das placas foi feita a pesagem hidrostática, a partir da qual pôde-se determinar a porcentagem de vazios para os dois teores. Para os corpos-de-prova com teor de 5,5% obteve-se 10,2% e 10,7% de vazios para o teor de 6%. Estes valores são inferiores à porcentagem mínima recomendada para um BBTM 0/6 classe1.

Embora a distribuição granulométrica seja exatamente a mesma que foi utilizada em Nantes e um dos teores ser inferior e outro igual ao adotado para este BBTM 0/6, o fracionamento dos agregados, a forma dos agregados ou o método de compactação não foram capazes de obter a porcentagem de vazios desejada. As diferenças na porcentagem de vazios pode ser visualizada na Figura 3.15, onde os vazios no interior da placa fabricada em Nantes são bem perceptíveis (circulados em destaque).

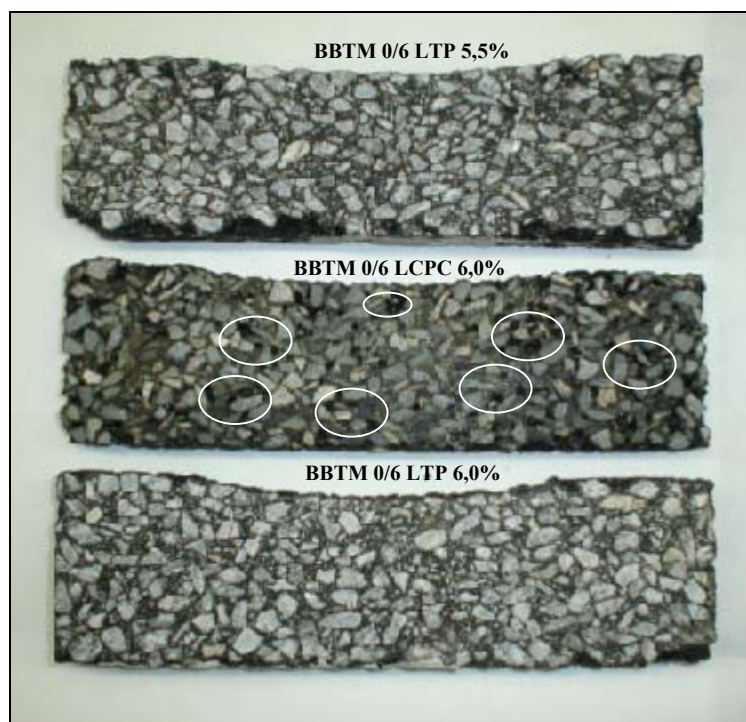


Figura 3.15 – Comparação entre a estrutura interna das placas de BBTM 0/6 fabricadas no LCPC (França) e no LTP (Brasil)

Deformação Permanente e Evolução da Macrotextura

O gráfico da Figura 3.16 mostra a evolução da deformação permanente das placas de BBTM 0/6 submetidas ao Simulador de Tráfego LPC e a porcentagem de afundamento após 3.000 ciclos (fim do ensaio).

Tanto o afundamento final das placas com teor de 5,5% (afundamento de 3,4%) quanto o das placas com teor de 6,0% (afundamento de 5,2%) apresentaram valores de acordo com o esperado para este tipo de mistura, sendo muito inferiores ao limite máximo de 20%.

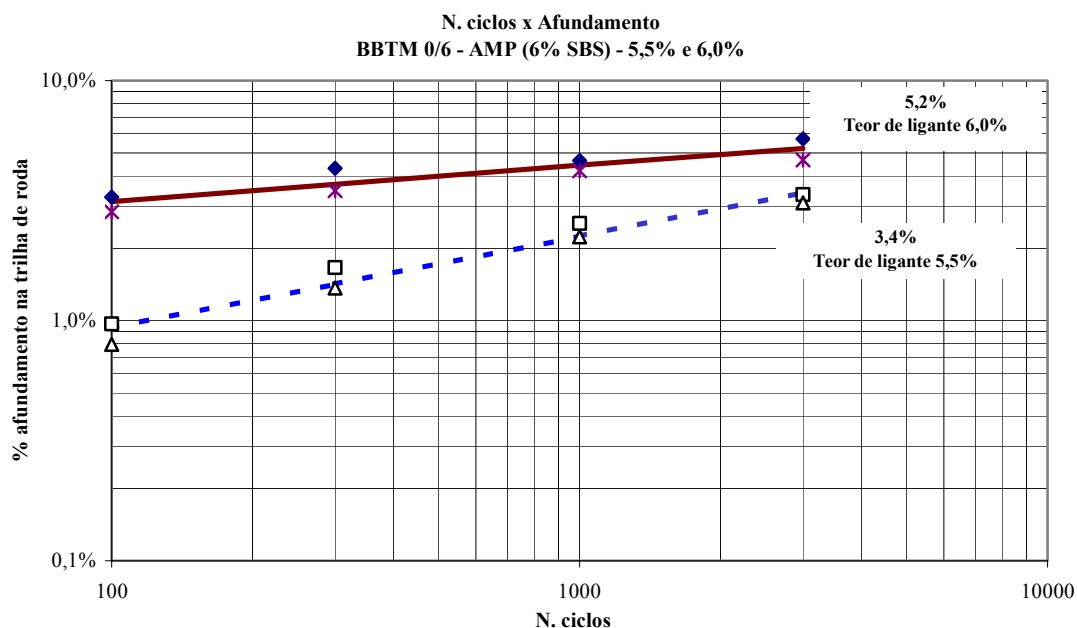


Figura 3.16 – Deformação permanente das placas de BBTM 0/6 (LTP) com 5,5% e 6,0% de ligante asfáltico

Os valores de HS no ciclo 0 (início do ensaio de deformação permanente), aos 3.000 ciclos (final do ensaio) e a perda de macrotextura com a simulação do tráfego são mostrados na Tabela 3.10. Nota-se que embora a porcentagem de redução da macrotextura das superfícies das placas com teor de 6,0% tenha sido superior (17%) à redução da macrotextura das placas com teor de 5,5% (14%), a redução de ambas não foi suficiente para mudar a classificação da macrotextura, permanecendo rugosa.

Tabela 3.10 – Evolução da macrotextura do BBTM 0/6 (LTP)

BBTM 0/6 – 5,5%				
Ciclos	Placa 2 HS (mm)	Placa 3 HS (mm)	Classificação Textura	Redução da Macrotextura (%)
0	0,96	0,95	Grosseira	14
3.000	0,80	0,85	Grosseira	
BBTM 0/6 – 6,0%				
0	1,01	0,95	Grosseira	17
3.000	0,82	0,80	Grosseira	

Ensaio Cântabro – perda por desgaste e dano por umidade induzida

Este ensaio foi desenvolvido na Espanha na região da Cantábria com o objetivo de limitar a desagregação de misturas asfálticas porosas, testando-as quanto ao desgaste ou perda de massa na máquina de abrasão Los Angeles.. No Brasil este ensaio foi introduzido como parâmetro de dosagem da Camada Porosa de Atrito (CPA). De acordo com a norma DNER-ES 386/99 (1999) o Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito (CPA) deve apresentar no máximo 25% de perda em massa após o Ensaio Cântabro.

Recentemente, este ensaio foi especificado pela ABNT (NBR 15140, 2004) para testar desgaste ou desagregação para qualquer tipo de mistura asfáltica, seja aberta como uma mistura de CPA, sejam descontínuas ou bem-graduadas, não definindo um limite aceitável, uma vez que este limite para a perda de massa depende do tipo de mistura (NBR 15140, 2004).

A realização deste ensaio para avaliar o comportamento ao desgaste do BBTM, embora não existam parâmetros do seu comportamento para o Ensaio Cântabro, é uma tentativa de estabelecer um procedimento de teste de desagregação simples que pudesse ser realizado em usinas ou laboratórios de obra..

O ensaio para esta pesquisa foi realizado segundo recomendações da norma espanhola NLT 362/92 (1992) em detrimento à norma brasileira, pois esta última não prevê o condicionamento em água.

Para avaliar o desgaste em função do número de golpes do compactador Marshall foram produzidos oito corpos-de-prova com 25 golpes de compactação em cada face e oito corpos-de-prova com 50 golpes em cada face formando dois grupos. Esses corpos-de-prova foram produzidos com 5,5% de ligante modificado por polímero (AMP), o mesmo utilizado para a produção das placas. Para comparar o efeito do ligante modificado foram também produzidos oito corpos-de-prova com 5,5% de um

ligante asfáltico convencional 50/70, compactados com 25 golpes do compactador Marshall.

Depois da pesagem dos corpos-de-prova, cada grupo foi dividido em dois lotes com quatro corpos-de-prova. O primeiro lote foi colocado em uma câmara de climatização a 25°C durante 24 horas. O segundo lote passou por dois tipos de condicionamento: inicialmente foi imerso em água a 60°C, onde ficou por 24 horas e depois foi retirado da água e mantido em uma câmara de climatização a 25°C, também durante 24 horas.

Depois do condicionamento à baixa severidade dos dois lotes, os corpos-de-prova, um a um, foram inseridos no tambor da máquina de abrasão Los Angeles e, em seguida, foram submetidos a 300 revoluções da máquina a uma velocidade constante e controlada entre 30 rpm e 33 rpm.

Após as 300 revoluções os corpos-de-prova foram novamente pesados, sendo possível calcular a perda de peso por meio da expressão 3.1.

$$A = \frac{M - M'}{M} \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

A: perda de peso por abrasão (%);

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

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

A perda por abrasão resultante para os dois grupos de corpos-de-prova (25 e 50 golpes) apresentou a mesma tendência, isto é, a perda dos corpos-de-prova condicionados em imersão foi ligeiramente mais elevada que os não-condicionados, tanto para os corpos-de-prova produzidos com ligante asfáltico modificado por polímero quanto para os produzidos com ligante asfáltico 50/70. Todos os resultados

encontram-se na Tabela 3.11, onde é possível verificar o ganho de resistência à abrasão com a utilização do AMP.

Em relação ao número de golpes, a perda dos corpos-de-prova compactados com 25 golpes foi ligeiramente superior à perda dos corpos-de-prova compactados com 50 golpes.

Tabela 3.11 – Perda por abrasão no Ensaio Cântabro a 25°C – BBTM 0/6 (LTP)

5,5% AMP							
25 Golpes							
A% - não-condicionamento C				A% - Condicionamento 24 horas em imersão a 60°C			
3,8	3,5	4,7	2,7	3,7	5,1	4,5	4,4
Média			3,7	Média			4,4
50 Golpes							
A% - não-condicionamento				A% - Condicionamento 24 horas em imersão a 60°C			
2,9	3,4	3,0	3,7	3,7	3,7	4,5	3,8
Média			3,2	Média			3,8
5,5% Ligante asfáltico convencional 50/70							
25 Golpes							
A% - não-condicionamento				A% - Condicionamento 24 horas em imersão a 60°C			
10,3	6,6	9,5	9,8	10,7	9,8	9,8	11,8
Média			9,0	Média			10,5

A partir dos resultados da Tabela 3.11 foi realizada uma análise estatística para avaliar a pertinência do número de golpes do compactador Marshall e da aceleração da desagregação pelo condicionamento à baixa severidade.

De acordo com análise da variância das amostras, que por sua vez são pequenas sob o ponto de vista estatístico, pôde-se concluir que o grupo de corpos-de-prova produzidos com o AMP e compactados com 50 golpes foi o único que apresentou diferença entre o valor de perda de massa sem condicionamento e do valor com o condicionamento. Caso seja feita a relação entre a média de perda de massa no ensaio Cântabro com condicionamento prévio e a média sem condicionamento prévio, encontrar-se-á para ambos os casos uma relação de 0,84. Embora o valor da relação mostre que haja uma pequena perda devido ao condicionamento, estatisticamente somente no caso dos corpos-de-prova com 50 golpes de compactação pode-se afirmar que as médias com e sem condicionamento são

diferentes. O universo de amostras deste último caso é mais homogêneo e a variação entre os valores de desgaste é menor que a diferença entre as médias.

O que se pode extrair destes resultados é que a compactação com 25 golpes de cada lado leva à confecção de amostras menos similares entre si, devendo-se adotar 50 golpes para tornar o universo dos corpos-de-prova mais homogêneo. Outra análise é que o condicionamento causa uma maior perda de massa nas misturas em comparação com as amostras não-condicionadas. No entanto, como a relação entre a média das perdas de massa é relativamente elevada, pode-se julgar que a mistura asfáltica é resistente aos danos por umidade induzida, e que não deve sofrer desagregação por problemas de adesividade, pelo menos a curto prazo. Deve-se realizar um estudo para estabelecimento de limites de perda de massa e limites para a relação de desgaste condicionado e não-condicionado.

A mesma análise também foi confirmada para os corpos-de-prova produzidos com o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) e compactados com 25 golpes, ou seja, a introdução de asfalto modificado por polímero SBS auxiliou sobremaneira na diminuição de perda de massa no ensaio Cântabro, passando de 9,0% (misturas com CAP 50/70) para apenas 3,2% (misturas com asfalto modificado por polímero), corroborando os estudos de MOURA (2001) que mostrou que os asfaltos modificados por polímeros melhoram as características de adesividade agregado/ligante.

Ensaio Duriez – Dano por Umidade Induzida

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento descrito no capítulo 2. Como o diâmetro nominal máximo do BBTM 0/6 é inferior a 14 mm foram utilizados moldes para a compactação com $80 \pm 0,1$ mm de diâmetro e 190 mm de altura (Figura 3.17) para produzir 10 corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram compactados em uma prensa (Figura 3.18) com a aplicação de uma carga estática de $60 \text{ kN} \pm 5\%$ com êmbolos móveis na base e no topo, ou seja tanto o pistão inferior quanto o superior são deslocados durante a compactação, comprimindo ou densificando o corpo-de-prova .



Figura 3.17 – Moldes para o Ensaio Duriez (LTP)



Figura 3.18 – Prensa para a compactação dos corpos-de-prova do Ensaio Duriez

Os valores médios para a massa, o diâmetro, altura e volume dos corpos-de-prova (Figura 3.19) foram de 1001 g, 79,7 mm, 91,8 mm e $458,3 \text{ cm}^3$, respectivamente.

Após a pesagem e a medida de suas dimensões os corpos-de-prova foram divididos em dois grupos para o condicionamento durante sete dias: cinco corpos-de-prova para a conservação em uma câmara a 18°C e 50% da umidade relativa do ar e; 5 corpos-de-prova que, antes de serem condicionados à imersão em água, foram postos em um recipiente para aplicação de uma pressão residual de 47 kPa (Figuras 3.20 e 3.21).

Passados os sete dias de condicionamento, todos os corpos-de-prova foram rompidos à compressão simples (Figura 3.22).



Figura 3.19 – Corpos-de-prova Duriez



Figura 3.20 – Aplicação da pressão de 47kPa nos copos-de-prova destinados à imersão em água



Figura 3.21 – Corpos-de-prova em imersão em água



Figura 3.22 – Ensaio de compressão simples dos corpos-de-prova Duriez

Os resultados da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova apresentaram-se de forma contrária ao esperado, obtendo-se $r = 7,6$ MPa e $R = 7,3$ MPa, isto é, a resistência média dos corpos-de-prova condicionados em água foi ligeiramente superior, mostrando um ganho aparente de resistência. A palavra aparente é empregada para colocar em dúvida o valor absoluto, pois é sabido que a presença da água não pode beneficiar a resistência de misturas asfálticas.

Para verificar a similaridade dos resultados e a possibilidade de não ter havido perda de resistência com a imersão em água foi feita uma análise estatística da variância dos resultados, concluindo-se que 7,3 MPa e 7,6 MPa são estatisticamente

semelhantes. Ou seja, a mistura asfáltica brasileira demonstra resistência ao dano por umidade induzida. Estes resultados são similares aos encontrados com o desgaste Cântabro.

Para se certificar de que os resultados obtidos no ensaio Duriez são coerentes fez-se uma nova análise estatística, onde foram calculados, entre outras variáveis, os coeficientes de variação das resistências do ensaio realizado no Brasil (LTP/EPUSP) e do ensaio realizado na França, ressaltando que a curva granulométrica é a mesma mas os materiais (ligantes asfálticos e agregados) são diferentes. O objetivo desta comparação foi exclusivamente de analisar se os erros no procedimento brasileiro superavam os erros inerentes ao ensaio na França, local de grande experiência na execução destes ensaios.

Os resultados estatísticos mostraram que os ensaios conduzidos no Brasil apresentam pequena variação de resultados de resistência, com coeficiente de variação na faixa de 3 a 5%, e são comparáveis à variação de resultados obtidos na França. Em um dos universos, o coeficiente de variação francês é bastante baixo (2,2%) e para o outro universo (sem imersão em água), os valores franceses são mais elevados (aproximadamente 10%), mostrando serem mais heterogêneos que os brasileiros nesta condição.

Por meio do gráfico da Figura 3.23, é possível observar que a amostra da resistência dos corpos-de-prova sem imersão, do ensaio realizado na França, tem um desvio padrão maior que as demais amostras, com um comportamento diferente do histograma da amostra da resistência dos corpos-de-prova com imersão. Isto já não ocorre com tanta ênfase com o histograma das resistências dos ensaios realizados no Brasil, mostrando que os ensaios foram realizados seguindo um procedimento laboratorial adequado.

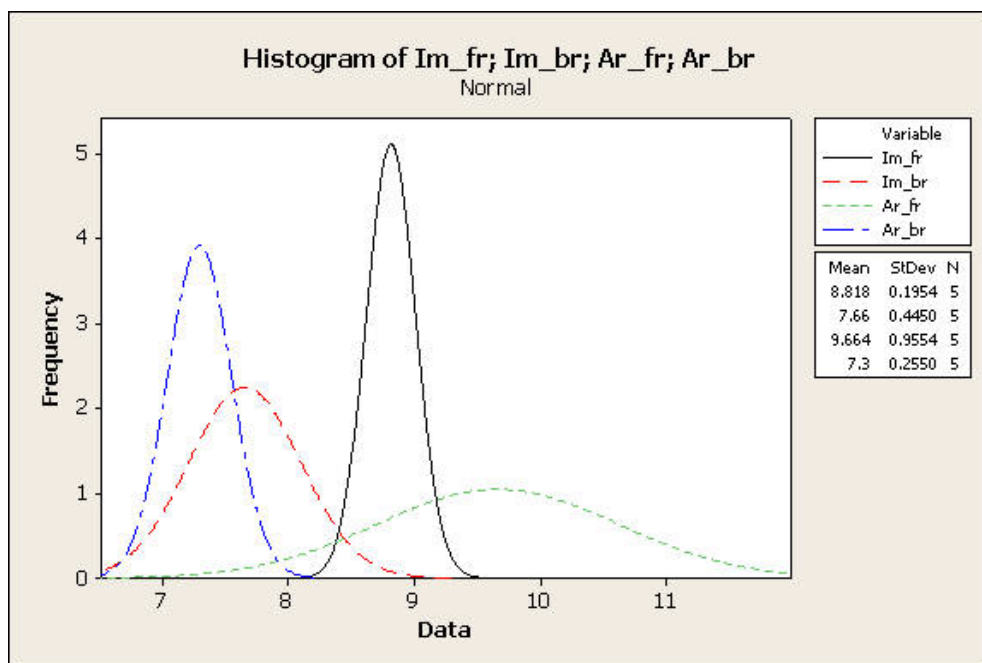


Figura 3.23 – Histograma da distribuição normal das resistências à compressão simples do Ensaio Duriez do BBTM 0/6 na França e no Brasil

Vale ressaltar que esse não é um ensaio comumente realizado no Brasil e que ainda está em fase de adaptação, sendo necessária à execução de novos ensaios para identificar as mudanças que se façam necessárias e aferir os equipamentos, principalmente em relação à compactação dos corpos-de-prova.