

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Fábio Hirsch

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS PREPARADAS COM DIFERENTES TIPOS
DE LIGANTES**

Ijuí/RS

2007

Fábio Hirsch

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS PREPARADAS COM DIFERENTES TIPOS
DE LIGANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Ijuí

2007

FOLHA DE APROVAÇÃO

**Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua
forma final pelo professor orientador e pelos membros da
banca examinadora.**

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr. - Orientador

Banca Examinadora

Prof. Luís Eduardo Modler, M. Eng.
UNIJUÍ/DeTec

Prof. Cristina Eliza Pozzobon, M. Eng.
UNIJUÍ/DeTec

Dedico este trabalho aos meus pais, Valmir e Ines por todo o amor e ensinamentos, a minha irmã, Andressa pela alegria de viver e a minha namorada Carine, amor da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Desejo extremar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho. Seja através da orientação técnica, seja através do apoio, do incentivo e da amizade, muitas pessoas tiveram papel importante no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradecer a Deus pelo dom da vida e proteção.

Ao Prof. Luciano Pivoto Specht, orientador deste trabalho, pela amizade e companheirismo, pela confiança, participação e incentivo à pesquisa.

Ao coordenador do curso de Engenharia Civil, Prof. Luís Eduardo Modler, pelo apoio no que fosse preciso durante o curso.

Ao amigo e companheiro de projeto de pesquisa, Thiago de Matos Rozek, pelo apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Diego Hartmann, pela ajuda no desenvolvimento gráfico e pelo entusiasmo em substituir-me como bolsista.

Ao laboratorista e amigo Luis Donato, pelo apoio na realização de todas as moldagens e incentivo e ajuda no desenvolvimento do permeâmetro, sem você não seria possível a realização deste trabalho de conclusão.

A laboratorista Salete Zaltron, por todo o apoio e ensinamentos nos ensaios de laboratório, em todo o curso.

Aos bolsistas, do Laboratório de Pavimentação da UFRGS, Diego Treichel e Vinicius da Silva Alves, sem vocês teria sido tudo mais complicado.

A Pedreira Tabbille, pelo fornecimento dos agregados necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

As empresas Betunel – Tecnologias em Asfaltos e Greca Asfaltos pelo fornecimento dos ligantes asfálticos utilizados na pesquisa.

A empresa Brascola, pelo fornecimento do silicone necessário para a realização dos ensaios de permeabilidade.

Por fim, agradeço a minha família, aos meus pais, Valmir e Ines, pela oportunidade de estudar, pelo amor e ensinamentos. A minha irmã, Andressa, pela alegria e vontade viver que sempre me passou. A minha namorada Carine pelo amor, apoio e confiança. Esta conquista é de todos vocês.

RESUMO

Este estudo visa avaliar os parâmetros de dosagem Marshall, o comportamento mecânico, as propriedades de adesividade e as propriedades hidráulicas de misturas asfálticas produzidas com diferentes tipos de ligantes (CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha) adicionados à mesma composição mineral. A moldagem dos corpos-de-prova das misturas foi realizada através da metodologia Marshall. Isso permitiu verificar qual a influência do tipo de ligante nos parâmetros de dosagem Marshall (propriedades volumétricas, estabilidade e fluência). Com as mesmas amostras avaliou-se qual a influência do tipo e teor de ligante e volume de vazios nas propriedades hidráulicas. Com a determinação do teor de ligante de projeto, foram moldadas amostras para a análise do comportamento mecânico (resistência à tração e módulo de resiliência) e verificação das propriedades de adesividade (Metodologia Lottman Modificada e Metodologia Cantabro). A dosagem Marshall mostrou que a mistura com ligante Asfalto-Borracha consome aproximadamente 25% mais ligante em relação às misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero. Quanto ao comportamento mecânico, observou-se que as amostras com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero, respectivamente, apresentam valores de resistência à tração 50% e 85% mais elevados em comparação a mistura com Asfalto-Borracha. Para os valores de módulo, notou-se que a mistura com CAP 50/70 apresentou o melhor desempenho. Essa análise de resistência à tração e módulo de resiliência é bastante complexa, visto que, dependendo da estrutura onde o revestimento está assente, valores maiores ou menores são tolerados. Quanto às propriedades de adesividade, a metodologia Lottman mostrou que todas as misturas possuem excelentes características quanto à desagregação, e o ensaio perda de massa (Metodologia Cantabro) mostrou que misturas com ligante Asfalto-Borracha apresentam melhores desempenhos, seguidas das amostras com Asfalto-Polímero e CAP 50/70. Destaca-se que para a determinação do coeficiente de permeabilidade k foi desenvolvido um equipamento no Laboratório de Engenharia Civil – LEC da UNIJUÍ. Com isso, o grau de permeabilidade nas amostras estudadas foi classificado como sendo médio nas amostras com Asfalto-Polímero e baixo nas amostras com CAP 50/70 e Asfalto-Borracha. A partir deste estudo ficou evidente a importância e a influência dos modificadores asfálticos nas propriedades do concreto asfáltico.

Palavras-chaves: Pavimentação, misturas asfálticas, ligantes modificados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Classificação dos agregados para pavimentação.....	20
Figura 2:	Ajuste granulométrico da mistura.....	44
Figura 3:	Localização da jazida e do derrame basáltico.....	45
Figura 4:	Curvas granulométricas dos agregados utilizados.....	47
Figura 5:	Método Marshall – Esquema.....	53
Figura 6:	Estado de tensões gerado no ensaio de resistência à tração.....	55
Figura 7:	Equipamento para ensaio de resistência à tração.....	56
Figura 8:	Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência.....	57
Figura 9:	Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência.....	58
Figura 10:	Equipamento de módulo de resiliência ligado a um microcomputador..	59
Figura 11:	Vista interna do equipamento de módulo de resiliência.....	59
Figura 12:	Metodologia Lottman Modificada.....	61
Figura 13:	Execução do ensaio de desgaste Cantabro.....	62
Figura 14:	Aspecto dos corpos-de-prova após o ensaio de desgaste Cantabro.....	63
Figura 15:	Equipamento de permeabilidade.....	66
Figura 16:	Seqüência para a realização do ensaio de condutividade hidráulica.....	67
Figura 17:	Volume de vazios <i>versus</i> teor de ligante.....	71
Figura 18:	Vazios do agregado mineral <i>versus</i> teor de ligante.....	72
Figura 19:	Relação betume vazios <i>versus</i> teor de ligante.....	73
Figura 20:	Relação entre o teor de ligante e estabilidade.....	75
Figura 21:	Relação entre o teor de ligante e fluência.....	76
Figura 22:	Valores de resistência à tração em comparação ao tipo de ligante.....	79
Figura 23:	Valores de módulo de resiliência em relação ao tipo de ligante.....	80
Figura 24:	Valores de resistência à tração em relação ao tipo de ligante.....	82
Figura 25:	Valores de resistência retida à tração em relação ao tipo de ligante.....	83
Figura 26:	Valores de perda de massa em relação ao tipo de ligante.....	84
Figura 27:	Permeabilidade <i>versus</i> ao volume de vazios.....	86
Figura 28:	Permeabilidade <i>versus</i> ao teor de ligante.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Características dos agregados utilizados.....	47
Quadro 2:	Características do ligante convencional CAP 50/70.....	48
Quadro 3:	Características do ligante modificado com polímero (Asfalto-Polímero).	48
Quadro 4:	Características do ligante modificado com borracha reciclada de pneus (Asfalto-Borracha).....	49
Quadro 5:	Especificação do Método Marshall - DAER/RS – ES P 16/98.....	52
Quadro 6:	Classificação dos solos segundo seu grau de permeabilidade.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Quantidade de amostras preparadas.....	43
Tabela 2:	Especificação e composição granulométrica da mistura - Faixa B DAER/RS.....	44
Tabela 3:	Valores médios das análises granulométricas dos agregados.....	46
Tabela 4:	Temperaturas de mistura e compactação.....	49
Tabela 5:	Estimativa de teores de ligante para cada mistura.....	51
Tabela 6:	Propriedades volumétricas das misturas com ligante CAP 50/70.....	69
Tabela 7:	Propriedades volumétricas das misturas com ligante Asfalto-Polímero..	70
Tabela 8:	Propriedades volumétricas das misturas com ligante Asfalto-Borracha..	70
Tabela 9:	Valores de estabilidade e fluência para o ligante CAP 50/70.....	74
Tabela 10:	Valores de estabilidade e fluência para o ligante Asfalto-Polímero.....	74
Tabela 11:	Valores de estabilidade e fluência para o ligante Asfalto-Borracha.....	75
Tabela 12:	Tabela resumo das propriedades da dosagem Marshall.....	77
Tabela 13:	Valores de R_t e M_r das misturas em relação ao tipo de ligante.....	78
Tabela 14:	Resultados dos ensaios da Metodologia Lottman Modificada.....	81
Tabela 15:	Resultados dos ensaios de perda de massa cantabro.....	83
Tabela 16:	Permeabilidade das amostras com ligante CAP 50/70.....	85
Tabela 17:	Permeabilidade das amostras com ligante Asfalto-Polímero.....	85
Tabela 18:	Permeabilidade das amostras com ligante Asfalto-Borracha.....	86

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AB: Asfalto-Borracha

ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AP: Asfalto-Polímero

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto betuminoso usinado a quente

CNT: Confederação Nacional do Transporte

D_A : Densidade Aparente

DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DMT: Densidade Máxima Teórica

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EVA: Copolímero Etano-Vanila-Acetil

LEC: Laboratório de Engenharia Civil

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

Mr: Módulo de resiliência

PM: Perda de massa

RBV: Relação Betume Vazios

Rt: Resistência à tração por compressão diametral

RRt: Resistência retida à tração

SBR: Borracha de butadieno estireno

SBS: Copolímero Estireno – Butadieno – Estireno

SUPERPAVETM: *Superior Performance Asphalt Pavements*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIJUÍ: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VV: Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA DA PESQUISA.....	13
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3	QUESTÃO DE ESTUDO.....	13
1.4	OBJETIVOS.....	14
1.4.1	Objetivo geral.....	14
1.4.1	Objetivos específicos.....	14
1.5	JUSTIFICATIVA.....	15
1.6	SISTEMATIZAÇÃO DA PESQUISA.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	AGREGADOS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	19
2.2	MATERIAIS BETUMINOSOS.....	24
2.2.1	Cimentos asfálticos.....	26
2.2.2	Asfaltos diluídos.....	27
2.2.3	Emulsões asfálticas.....	28
2.2.4	Asfaltos modificados.....	28
2.3	PAVIMENTOS.....	30
2.3.1	Pavimentos flexíveis.....	31
2.3.2	Pavimentos rígidos.....	31
2.3.3	Camadas típicas de um pavimento flexível.....	32
2.4	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.....	33
2.4.1	Revestimentos asfálticos por penetração.....	33
2.4.2	Revestimentos asfálticos por mistura.....	34
2.4.2.1	Dosagem de misturas asfálticas.....	35
2.4.2.2	Produção.....	36
2.5	MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	39
2.5.1	Trincamento por fadiga.....	39
2.5.2	Afundamento de trilha de roda.....	40
2.5.2	Perda de adesividade.....	40

3	METODOLOGIA.....	42
3.1	CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO.....	42
3.2	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	42
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	45
3.3.1	Agregados minerais.....	45
3.3.2	Ligantes asfálticos.....	47
3.4	PROCEDIMENTO DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	49
3.4.1	Dosagem Marshall.....	49
3.4.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	54
3.4.3	Ensaio de módulo de resiliência.....	56
3.4.4	Ensaio de adesividade - Metodologia Lottman Modificada.....	60
3.4.5	Resistência ao desgaste - Metodologia Cantabro.....	62
3.4.6	Ensaio de condutividade hidráulica.....	64
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	68
4.1	DOSAGEM MARSHALL.....	68
4.1.1	Propriedades volumétricas das misturas.....	69
4.1.2	Estabilidade e Fluência.....	74
4.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	77
4.2.1	Resistência à tração e Módulo de resiliência.....	77
4.3	PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE.....	81
4.3.1	Resistência ao efeito deletério da água.....	81
4.3.2	Resistência ao desgaste.....	83
4.4	PROPRIEDADES HIDRÁULICAS.....	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
5.1	CONCLUSÕES.....	88
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS.....	92
	ANEXO A.....	99
	ANEXO B.....	103
	ANEXO C.....	116
	ANEXO D.....	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DA PESQUISA

O tema da pesquisa é: Pavimentação asfáltica.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Estudo do comportamento de misturas asfálticas tipo concreto asfáltico para utilização como revestimento de pavimentos.

1.3 QUESTÃO DE ESTUDO

As questões que balizaram o desenvolvimento desta pesquisa foram:

- a. Qual a influência do tipo de ligante nos parâmetros de dosagem Marshall e no comportamento mecânico em misturas de concreto asfáltico?
- b. Qual a influência nas propriedades de adesividade em misturas de concreto asfáltico preparadas com diferentes tipos de ligantes?
- c. Qual a influência do tipo e teor de ligante e do volume de vazios nas propriedades hidráulicas das misturas em concreto asfáltico?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Para que sejam desenvolvidos novos materiais, em qualquer área do conhecimento, é relevante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar e analisar comparativamente os parâmetros de dosagem Marshall, o comportamento mecânico, as propriedades de adesividade e as propriedades hidráulicas de misturas em concreto asfáltico, preparadas com diferentes tipos de ligantes adicionados a uma mesma composição mineral.

1.4.2 Objetivos específicos

Este estudo teve os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Determinar qual a influência do tipo de ligante nos parâmetros de dosagem Marshall das misturas asfálticas;
- ✓ Analisar qual a influência do tipo de ligante no comportamento mecânico das misturas asfálticas;
- ✓ Determinar qual a influência do tipo de ligante nas propriedades de adesividade das misturas asfálticas;
- ✓ Projetar, construir e operar um permeâmetro de carga variável para determinação da condutividade hidráulica (permeabilidade), das misturas asfálticas preparadas com os diferentes tipos de ligantes, no Laboratório de

Engenharia Civil - LEC da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ;

1.5 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de transportes são elementos estruturantes da vida econômica e social dos países. Eles proporcionam os deslocamentos de cargas e de passageiros, realizados pelos mais distintos modos de transporte. Ao analisar-se o sistema viário brasileiro, observa-se uma forte demanda ao uso do modal rodoviário. Esta característica faz com que a infra-estrutura das estradas assumam papel fundamental na mobilidade em nosso país, onde o transporte de aproximadamente 61,1% das cargas e 95% dos passageiros ocorre por via rodoviária, segundo pesquisa da CNT (2006).

Diante da grande importância do transporte rodoviário para o país, dados do boletim estatístico da CNT (2006) revelam o baixo percentual de rodovias pavimentadas. Apresentando uma malha total de 1.610.076km, apenas 196.094km das rodovias são pavimentadas, ou seja, 12,2% do total da malha existente. A razão para tal fato está diretamente relacionada com a escassez de recursos públicos e com os altos custos dos materiais empregados na pavimentação de estradas.

Uma pesquisa realizada pela CNT (2006) avaliou 100% da malha rodoviária federal pavimentada e também os principais trechos sob gestão estadual e sob concessão, revelando que, de um total de 84.382km analisados, 54,6% da extensão das rodovias pesquisadas encontram-se com o pavimento em estado crítico (regular, ruim, péssimo), 70,3% estão com problemas na sinalização e 40,5% não possuem acostamento.

As condições do revestimento de um pavimento revelam a capacidade de suportar as cargas provenientes do tráfego a que está submetido, além das condições de conforto e segurança oferecidas aos usuários da rodovia. Os pavimentos asfálticos brasileiros têm tido seu comportamento comprometido em algumas situações onde o aumento do volume de veículos e do excesso de cargas são elevados, causando

deterioração prematura e, em conseqüência, aumento nos custos dos transportes. De acordo com uma pesquisa do DNER (1998) *apud* Vasconcelos (2004), uma rodovia em mau estado de conservação representa no custo total do transporte: 58% a mais no consumo de combustível, 38% de aumento nos custos de manutenção dos veículos, além de dobrar o tempo de viagem, provocar um acréscimo de 50% no número de acidentes e aumentar os custos de manutenção da própria infra-estrutura.

A péssima situação da malha viária brasileira pode ser atribuída a diversos fatores além do revestimento em si, como a falta de plano de manutenção, sobrecarga de caminhões, fundações não apropriadas, falta de drenagem adequada, materiais sem a qualidade desejada, geometria inadequada, má sinalização, processo construtivo, etc.

Uma adequada infra-estrutura viária com revestimento asfáltico além de proporcionar benefícios diretos aos usuários com a melhoria dos níveis de conforto e segurança, e ainda a redução dos custos operacionais dos veículos, incrementa o progresso sócio-econômico do país, repercutindo positivamente na qualidade de vida, estruturação espacial das comunidades, disponibilidade de transporte coletivo, promovendo o escoamento da safra agrícola e incremento às riquezas nacionais.

O asfalto tem sido o principal material cimentante utilizado na construção de rodovias e vias urbanas, entretanto, o aumento do número de veículos comerciais e da carga transportada por eixo tem levado à ruptura prematura dos pavimentos, resultando em aumento dos custos de manutenção, engarrafamentos e atrasos aos usuários.

Com o aumento do custo dos materiais de construção, entre eles os derivados de petróleo, a redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações ambientais impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imprescindível que os pesquisadores procurem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo. Assim, muitos modificadores têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades dos ligantes, gerando grandes benefícios para a engenharia rodoviária e aos usuários.

Conforme Morilha (2004) a adição de modificadores nos ligantes asfálticos, sendo polímeros, proporcionam melhorias físicas, químicas e reológicas ao ligante

asfáltico tradicional capazes de aumentar a sua durabilidade, por meio da recuperação elástica, aumento da resistência à deformação permanente e ao envelhecimento. Também, segundo Specht (2004), a adição de materiais poliméricos traz vários benefícios aos ligantes asfálticos, como a redução da suscetibilidade térmica e o aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas, além de contribuir para uma melhor resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado.

A quantidade de resíduos sólidos provenientes da indústria de borracha e do descarte de pneumáticos tem motivado vários estudos acerca da reutilização e reciclagem deste material em ligantes asfálticos, motivados, principalmente, pelo grande volume gerado e seu longo período de degradação (400 a 800 anos) o que contribui para a eliminação do passivo ambiental gerado pelo descarte dos pneumáticos no meio ambiente. Numerosas pesquisas têm verificado a incorporação de fragmentos de borracha proveniente da reciclagem de pneus em ligantes asfálticos ou diretamente no CBUQ, dentre elas, Oda (2000), Bertollo (2002), Specht (2004), Pinheiro (2004).

Apesar da utilização da borracha reciclada de pneumáticos inservíveis em pavimentos ser uma possível solução para atenuar o problema da deposição desse resíduo, cabe salientar que o principal objetivo da inclusão de pó de pneus em cimento asfáltico ou misturas modificadas é a melhoria das propriedades dos materiais de pavimentação.

Segundo Wesseling (2005) a utilização constante de recursos naturais (exploração de jazidas e derivados de petróleo) na pavimentação asfáltica traz para o setor de pavimentação a necessidade de combinar soluções de engenharia e preservação do meio ambiente, uma vez que na pavimentação são empregados grandes volumes de materiais. Desta maneira, pode-se dar destino a vários resíduos industriais, como: borracha de pneus, polímeros, areia de fundição, escória de aciaria, entre outros.

Torna-se evidente a importância do estudo de novos materiais e/ou novas combinações para que seja possível o desenvolvimento de novos materiais que possam apresentar bom desempenho e custo atrativo.

1.6 SISTEMATIZAÇÃO DA PESQUISA

O relatório dessa pesquisa é composto de cinco capítulos, organizados de forma sistemática com o objetivo de obter-se uma melhor compreensão do estudo desenvolvido.

No primeiro capítulo é apresentado o tema da pesquisa, sua delimitação, a questão de estudo, os objetivos gerais e específicos e a justificativa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, que aborda os assuntos relacionados ao tema da pesquisa, tais como: agregados para pavimentação, materiais betuminosos, pavimentos, revestimentos asfálticos (por penetração e por mistura), dosagem de misturas asfálticas, mecanismos de degradação de pavimentos asfálticos, entre outros.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada na pesquisa, envolvendo a forma de coleta dos dados, os materiais utilizados e os procedimentos de cada ensaio realizado e descrição de equipamentos.

O quarto capítulo é constituído da tabulação e graficação resultante dos dados obtidos em cada ensaio, seguida da análise e comparação dos resultados gráficos.

O quinto e último capítulo diz respeito às considerações finais, onde são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões de estudos para outros trabalhos de pesquisa.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa, seguidas dos anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo está apresentado o embasamento teórico dessa pesquisa, abordando assuntos como: agregados para pavimentação, materiais betuminosos, pavimentos, revestimentos asfálticos (por penetração e por mistura), dosagem de misturas asfálticas, mecanismos de degradação de pavimentos asfálticos, entre outros.

2.1 AGREGADOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Segundo Senço (1997), agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, com propriedades adequadas a compor camadas ou misturas para utilização nos mais diversos tipos de obra. Seu emprego no ponto de vista da engenharia, em especial, os serviços de pavimentação, o uso dos agregados são destinados a misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamento, lastros de obras e outros.

Conforme Pinto (1998), os materiais pétreos usados em pavimentação normalmente conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são aqueles utilizados como se encontram na natureza, como o pedregulho e os seixos rolados, ao passo que os segundos compreendem os que necessitam de uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória e a argila expandida.

Os agregados representam a maior parcela constituinte de um pavimento, chegando a valores superiores a 90% em peso do conjunto asfalto agregado. Logo, as propriedades dos agregados utilizados nas misturas asfálticas preparadas a quente são muito importantes para o desempenho dos pavimentos (WESSELING, 2002).

Specht (2004) relata que os defeitos dos pavimentos, como desagregação e deformação permanente, podem estar diretamente relacionados à escolha inadequada

dos agregados. Desse modo, é fundamental que os agregados possuam propriedades geométricas físico-químicas e mecânicas adequadas e que garantam o bom desempenho do pavimento.

DNER (1996) classifica os agregados usados em pavimentação, segundo a sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos (gradação), apresentado na Figura 1.

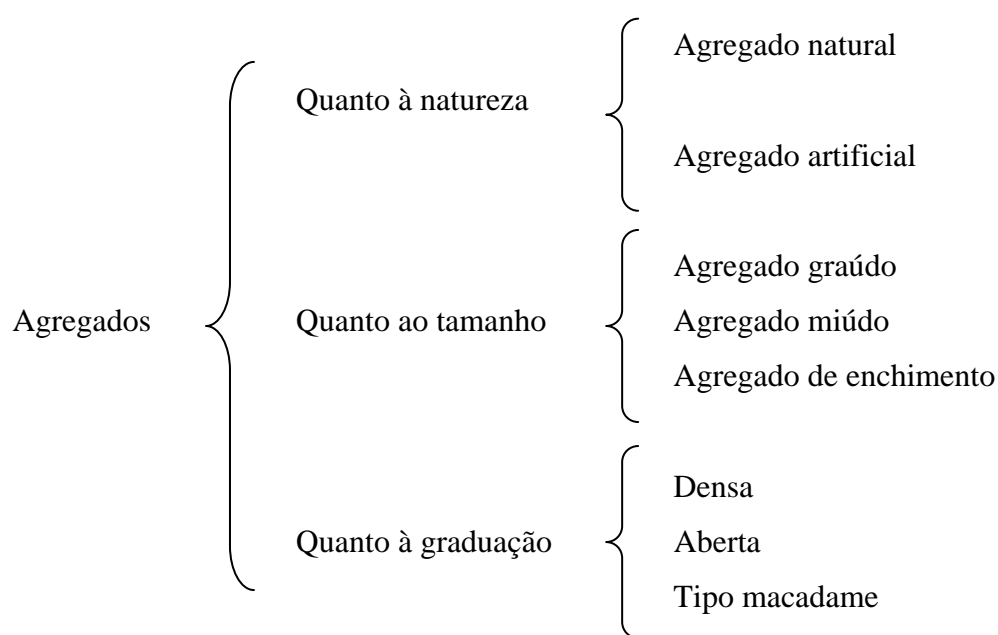


Figura 1: Classificação dos agregados para pavimentação

Fonte: DNER (1996)

Quanto à natureza das partículas:

- Agregados naturais: São constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos rolados, britas, areias, etc.
- Agregados artificiais: São aqueles em que os grãos são os produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material: escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida.

Quanto ao tamanho individual dos grãos:

- Agregado graúdo: É o material retido na peneira n° 10 (2,0 mm): britas, cascalhos, seixos, etc.
- Agregado miúdo: É o material que passa na peneira n° 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira n° 200 (0,075 mm): pó-de-pedra, areia, etc.
- Agregado de enchimento ou material de enchimento (fíler): É o que passa pelo menos 65% na peneira n° 200 (0,075 mm): cal extinta, cimento portland, pó de chaminé, etc.

Wesseling *et al.* (2003) relata que o fíler, ou material de enchimento, tem recebido dos pesquisadores uma atenção especial devido à importância que essa fração tem demonstrado ter nas características das misturas, e conseqüentemente, no desempenho dos concretos asfálticos. Destaca, também, a importância do tipo e teor de fíler em relação às propriedades mecânicas das misturas betuminosas.

Muitas pesquisas em nível nacional (Santana (1995), Motta e Leite (2000), Leite e Motta (2002), Wesseling *et al.* (2003)) e internacional (Taybali *et al.* (1998), Kandhal (1992), Ishai e Craus (1996)) têm ressaltada a importância da fração fíler no comportamento mecânico e na durabilidade das misturas asfálticas.

Estudos conduzidos por Beck (2005) e Specht *et al.* (2006a) indicam que a inclusão de diferentes teores de fílers nas misturas, apesar de estarem em acordo com a especificação, resulta em significativas alterações nas propriedades das misturas asfálticas. Conforme dados da dosagem Marshall, o aumento do teor de fíler reduz o consumo de ligante de projeto (considerando como parâmetro volume de vazios igual a 4%). Mostram ainda, que essa observação é mais marcante em misturas preparadas com ligante convencional do que em misturas preparadas com ligante asfalto-borracha.

Também segundo Specht *et al.* (2006) uma parcela do fíler atua como material inerte (fíler agregado), enquanto outra parcela, denominada fíler ativo, fica em suspensão no ligante asfáltico, alterando significativamente as propriedades reológicas

do mástique. Estudos conduzidos por Taybali *et al.* (1998) indicam que o aumento da quantidade de fíler nas misturas não compromete o desempenho em termos de deformação permanente. Tal comportamento pode ser explicado pelo incremento de rigidez do mástique que compõem a mistura. Todavia Santana (1995) alerta que misturas com quantidades excessivas de finos têm maior possibilidade de ruptura por fadiga.

Leite e Motta (2002) e Wesseling *et al.* (2003) mostraram que não apenas a quantidade de fíler é importante, mas também as características do material utilizado. Quanto mais fino maior a parcela de fíler que atuará como fíler ativo na mistura.

As especificações nacionais possuem uma faixa bastante ampla de possibilidade de inserção de fíler em misturas, que vão de 4 a 10% da massa total dos agregados minerais e a especificação para material de enchimento (DNER, 1997) ser bastante genérica, muitas vezes, as instalações de produção de massa asfáltica não possuem dispositivos adequados para controlar a quantidade de finos que efetivamente entra na mistura. A especificação Superpave (FHWA, 2001) delimita a relação *dust-to-binder* entre 0,6 e 1,6. Vale ressaltar que está relação é obtida através do ligante efetivo onde se desconta a parcela absorvida pelo agregado.

Ressalta-se a importância do controle de finos durante o projeto e durante a execução de misturas asfálticas dada sua forte influência nas propriedades do concreto asfáltico e conseqüentemente em seu desempenho *in situ*.

Quanto à distribuição ou graduação dos grãos:

- Agregado de graduação densa: é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- Agregado de graduação aberta: É aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

- Agregado tipo macadame: É aquele que possui partículas de um único tamanho, trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

Segundo Senço (1997), a forma externa dos agregados é fator importante a definir suas propriedades e comportamento sob a ação do tráfego, pois é evidente o melhor comportamento de um grão cúbico ou esférico em relação a um grão alongado ou chato. Para definir as características ligadas a forma dos agregados, pode-se associar essas características aos índices de grau de esfericidade e grau de arredondamento.

O grau de arredondamento está ligado à resistência mecânica e à abrasão da rocha-mãe, bem como às solicitações das partículas ao longo do tempo, suas características podem ser:

- Angulosos: têm todos os cantos vivos e não indicam nenhum desgaste por abrasão;
- Subangulares: cantos mais suaves, embora de raio de curvatura bem pequeno, indicam que a maior parte do agregado não sofreu abrasão;
- Subarredondados: cantos bem arredondados, superfícies ainda pouco sujeita a abrasão;
- Arredondados: aproximam-se da esfera; toda a superfície já sofreu abrasão.

O grau de esfericidade define-se como a característica dos grãos de terem forma aproximada da esfera. Suas características podem ser:

- Esferoidais: como o nome indica, são grãos que guardam certa simetria em relação ao centro e os que mais se aproximam da esfera;
- Achatados: um plano de apoio aproximadamente circular como pequenas espessuras; assemelham-se a um disco;

- Prismáticos: têm dimensão predominante em relação às outras duas; assemelham-se a um bastão;
- Lamelares: É o caso que mais deve chamar a atenção. Define-se como pedra lamelar como aquela em que a maior dimensão é superior a seis vezes o menor dimensão.

Specht *et al.* (2006b) destacam que, outro fator bastante relevante e que influencia o comportamento e desempenho do concreto asfáltico é a forma dos agregados, notavelmente dos agregados graúdos, que quando se apresentam predominantemente alongados tendem a fraturar-se, por flexão, durante o processo de compactação e desta forma deixam sem cobertura do mástique uma parcela dos agregados, reduzindo a cimentação e possibilitando a entrada de água e ar que levam a aceleração dos processos de perda de adesão/coesão e de envelhecimento das misturas.

2.2 MATERIAIS BETUMINOSOS

O asfalto é, sem dúvida, um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem. Escavações arqueológicas revelam o seu emprego em épocas anteriores à nossa Era. Assim, na Mesopotâmia, o asfalto era usado como aglutinante em trabalhos de alvenaria e construção de estradas. Os reservatórios de água e as salas de banhos eram impermeabilizados com asfalto. Citações bíblicas revelam o seu emprego como impermeabilizante na Arca de Noé e como material aglutinante na Torre de Babel. Os Egípcios utilizaram o asfalto em trabalho de mumificação. A história nos mostra que o asfalto tende a se perpetuar ao longo dos séculos (SENÇO, 1997).

Revisando a história, mais recentemente, Senço (1997), aponta que o uso de asfaltos naturais, provenientes de jazidas, foi usado primeiramente pelos franceses, em 1802. Os americanos, em 1838, e os ingleses, em 1869, executaram pavimentações de ruas e pátios. Somente em 1870 os americanos executaram o primeiro pavimento com mistura fina, o *sheet asphalt*, também com asfalto natural.

No Brasil, a produção de asfalto iniciou-se em 1944, na refinaria Ipiranga, com petróleo importado geralmente da Venezuela. Até então, utilizava-se, nos serviços de pavimentação, o asfalto importado de Trinidad, acondicionado em tambores de cerca de 200 litros. A partir daí, o uso de asfalto na construção de estradas é crescente e está presente em mais de 97% das rodovias pavimentadas no Brasil, segundo pesquisa da CNT (2006).

Com o objetivo de estabelecer uma distinção entre os termos referentes ao asfalto e ao betume, a NBR 7208 de 1982 esclarece:

- Betume: Mistura de hidro-carbonetos de consistência sólida, líquida ou gasosa, de origem natural ou pirogênica, completamente solúvel em bissulfeto de carbono, frequentemente acompanhados de seus derivados não-metálicos;
- Ligante betuminoso: Produto à base de betume com acentuadas propriedades aglomerantes;
- Asfalto: Material sólido ou semi-sólido, de cor entre preta e parda escura, que ocorre na natureza ou é obtida pela destilação do petróleo, que se funde gradualmente pelo calor e no qual os constituintes predominantes são os betumes;
- Asfalto de petróleo: Asfalto obtido pela destilação de petróleo asfáltico;
- Cimento asfáltico: Asfalto sólido ou semi-sólido de consistência adequada à pavimentação;

Segundo DNER (1996), em serviços de pavimentação são empregados os seguintes tipos de materiais betuminosos: cimentos asfálticos, asfaltos diluídos, emulsões asfálticas e asfaltos modificados por polímeros.

2.2.1 Cimentos asfálticos

O cimento asfáltico é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, podendo ser obtido por destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas. O cimento asfáltico de petróleo recebe o símbolo de CAP e o cimento asfáltico natural recebe o símbolo de CAN. São semi-sólidos à temperatura ambiente, e necessitam de aquecimento para terem consistência apropriada ao envolvimento de agregados, possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de revestimentos de pavimentos, podendo ser obtido pela destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural, encontrado em jazidas.

O cimento asfáltico pode ser considerado um material viscoelastoplástico e termosensível, ou seja, aquele que possui uma parcela viscosa, uma elástica e outra plástica; é sensível à mudança de temperatura, em altas temperaturas (acima de 100°C) se torna plástico, quando recebe um carregamento, o material deforma e não volta ao estado original. O cimento asfáltico atua como um fluido viscoso e em baixas temperaturas (abaixo de 0°C), o cimento se torna elástico, atuando como uma borracha: quando recebe um carregamento, o material se deforma, quando o carregamento é retirado, o material volta ao estado original (SPECHT, 2004).

Os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são classificados segundo seu grau de “dureza” retratado no ensaio de penetração (DOU, 2005). A penetração de um CAP é definida como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico, sob condições especificadas de carga, tempo e temperatura, ou seja, 100g, 5s e 25°C (NBR 6576/98). Quanto menor é a penetração, “mais duro” é o cimento asfáltico.

Conforme publicado no Diário Oficial da União, em 13 de julho de 2005, em função da necessidade de atualização das especificações dos cimentos asfálticos de petróleo comercializados por diversas empresas e fabricantes, fica especificado que os cimentos asfálticos são classificados segundo a penetração, sendo: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, normalizados pela NBR 6576 e ASTM D 5. Outro fato relevante é que os produtores, importadores e distribuidores de cimento asfáltico de petróleo (CAP) devem assegurar que: a temperatura do produto não ultrapasse 177°C e não seja inferior a 40°C, durante o manuseio e o transporte e, o produto não apresente espuma quando aquecido até 177°C, durante o carregamento e o recebimento, para a avaliação de contaminação pela presença de água.

2.2.2 Asfaltos diluídos

Os asfaltos diluídos ou “cut-backs” são diluições de cimentos asfálticos em solventes derivados do petróleo de volatilidade adequada, quando há necessidade de eliminar o aquecimento do CAP, ou utilizar um aquecimento moderado.

Os solventes funcionam somente como veículos para utilizar o CAP em serviços de pavimentação. A evaporação total do solvente após a aplicação do asfalto diluído deixa como resíduo o CAP que desenvolve, então, as propriedades cimentícias necessárias. A essa evaporação dá-se o nome de cura do asfalto diluído, basicamente dividida em:

- Cura Rápida (CR ou RC, em inglês): Asfalto diluído composto de cimento asfáltico e um diluente de alta volatilidade do tipo nafta ou gasolina;
- Cura Média (CM ou MC, em inglês): Asfalto diluído composto de cimento asfáltico e um diluente de média volatilidade do tipo querosene;
- Cura Lenta (CL ou SC, em inglês): Asfalto diluído composto de cimento asfáltico e óleos de baixa volatilidade.

2.2.3 Emulsões asfálticas

A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou, então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com ajuda de um agente emulsificante. São obtidas combinando com água o asfalto aquecido, em um meio intensamente agitado, e na presença dos emulsificantes, que têm o objetivo de dar uma certa estabilidade ao conjunto, de favorecer a dispersão e de revestir os glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-a em suspensão.

Para a fabricação das emulsões são utilizados equipamentos que realizam uma agitação intensa a fim de obter as dispersões mais finas e mais estáveis possíveis. São utilizados na fabricação os moinhos coloidais, moinhos de bolas, homogeneizadores, agitadores mecânicos, misturadores, emulsionadores por injeção, etc.

Para garantir o transporte e armazenagem, as emulsões devem ter um mínimo de estabilidade à ruptura, que é garantida pela quantidade e qualidade do emulsificante empregado. Quanto a velocidade de ruptura, as emulsões asfálticas classificam-se em:

- Ruptura Rápida (RR): emulsões asfálticas aniônicas de ruptura rápida;
- Ruptura Média (RM): emulsões asfálticas aniônicas de ruptura média;
- Ruptura Lenta (RL): emulsões asfálticas aniônicas de ruptura lenta.

2.2.4 Asfaltos Modificados

Os asfaltos modificados por polímeros são obtidos a partir da incorporação do polímero ao CAP, em unidade apropriada, podendo ou não envolver reação química. Os cimentos asfálticos que se prestam a modificação são aqueles que apresentam compatibilidade com o polímero a ser empregado. Os polímeros mais amplamente utilizados na modificação de asfaltos para fins rodoviários são: SBS (copolímero de

estireno butadieno), SBR (borracha de butadieno estireno) e EVA (copolímero de etileno acetato de vinila) (SPECHT, 2004).

Segundo Liberatori *et al.* (2004) os polímeros usualmente dividem-se em duas categorias genéricas: elastômeros e plastômeros. Os elastômeros resistem à deformação por alongamento e recuperam sua forma original rapidamente quando a solicitação é removida. Tais polímeros adicionam pouca resistência ao asfalto até que este seja esticado, mas a sua capacidade de recuperação elástica aumenta com o alongamento. Os principais elastômeros utilizados na modificação do cimento asfáltico são o estireno-butadieno-estireno (SBS), o estireno-isopreno-estireno (SIS), o látex de borracha natural e a borracha de estireno-butadieno (SBR). Os plastômeros formam uma rede tridimensional rígida, que resiste fortemente à deformação. Estes polímeros exibem uma rápida resistência ao carregamento, mas fraturam com as deformações. Os principais plastômeros utilizados na modificação dos asfaltos são o copolímero de etil-vinil-acetato (EVA), o polietileno/polipropileno, o etileno-propileno (EPDM) e o cloreto de polivinila (PVC).

Segundo Specht e Ceratti (2004) um dos fatores que diferem a utilização, em larga escala, dos asfaltos modificados por SBS e EVA e por borracha de pneu moída é a estabilidade. Quando se prepara uma mistura em planta industrial (SBS e EVA) o produto pode ficar estocado e entregue na obra. Normalmente, a preparação do ligante modificado com borracha é *just in time*, preparada no canteiro de obras e utilizada imediatamente. No Brasil está sendo utilizado o processo úmido através da tecnologia *terminal blending*, onde a mistura é efetuada em uma unidade central e transportada até o local de aplicação.

Os modificadores se caracterizam por apresentarem algumas proposições de melhorar as características do CAP: redução da susceptibilidade térmica; redução do envelhecimento; melhor adesão e coesão; material mais resistente a trincamento por fadiga (TF) e afundamento de trilha de roda (ATR).

Para Fabbri *et al.* (2005) um ligante modificado ideal deve melhorar o comportamento da mistura em serviço, sua susceptibilidade ao tempo de aplicação de carga deve ser baixa, enquanto que a resistência à deformação permanente (em altas

temperaturas) e a resistência a trincas térmicas (em baixas temperaturas) e de fadiga devem ser altas, mantendo-se, no mínimo, as mesmas qualidades de adesão dos ligantes convencionais.

King *et al.* (1992) *apud* Fabbri *et al.* (2005) destaca que a modificação de um ligante deve conferir às misturas características de fluidez que facilitem a mistura, o espalhamento e a compactação, e aumentar a faixa de trabalho plástico, de tal forma que se mantenham características de flexibilidade mesmo em baixas temperaturas.

2.3 PAVIMENTOS

Conforme Medina e Motta (2005), pavimento é a estrutura construída após a terraplenagem e destinada, técnica e economicamente, a:

- Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- Melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento;
- Resistir a intempéries e proteger as camadas inferiores da água.

De maneira mais simples pode-se definir pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente, que assenta sobre um semi-espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito.

Specht (2004) define pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente. O desempenho de um pavimento é condicionado por um complexo conjunto de fatores, dentre eles as propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constituem.

Specht *et al.* (2005) retrata que as camadas de revestimento incluem componentes de alto custo e, por isso, merecem atenção especial. Dentre os fatores que influenciam o desempenho de uma camada asfáltica pode-se citar: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção e restauração.

2.3.1 Pavimentos flexíveis

Segundo o DNER (1996), pavimento flexível é uma estrutura constituída de uma ou mais camadas de espessura finita, assente sobre um semi-espaço, cujo revestimento é do tipo betuminoso. Em um pavimento flexível, o dimensionamento é comandado pela resistência do subleito. No geral, o pavimento flexível é constituído das seguintes camadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

Pavimentos flexíveis são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga (SENÇO, 1997).

2.3.2 Pavimentos rígidos

Pavimentos rígidos são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações (MEDINA E MOTTA, 2005). Os pavimentos rígidos são dimensionados, pela resistência do próprio pavimento.

O pavimento rígido é constituído de:

- Placa de concreto de cimento: Camada que desempenha ao mesmo tempo o papel de revestimento e de base;
- Sub-base: Camada empregada, com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do subleito, ou evitar o fenômeno de bombeamento de solos subjacentes à placa de concreto de cimento.

2.3.3 Camadas típicas de um pavimento flexível

A seguir estão descritas as definições de cada uma das camadas constituintes da estrutura de um pavimento:

- Regularização do Subleito: Camada de espessura variável, executada quando se torna necessário preparar o leito da estrada para receber o pavimento; a regularização não constitui, propriamente, uma camada do pavimento, pois tem espessura variável, podendo ser nua em um ou mais pontos da seção transversal.
- Reforço do Subleito: Camada existente, no caso de pavimentos muito espessos, executada com o objetivo de reduzir a espessura da própria sub-base.
- Sub-Base: Camada complementar à base, com as mesmas funções desta e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir a espessura da base.
- Base: Camada destinada a resistir diretamente as ações dos veículos e a transmiti-las, de forma conveniente, ao subleito.

- Revestimento: Camada destinada a resistir diretamente as ações danosas do tráfego, a impermeabilizar o pavimento, a melhorar as condições de rolamento, no que se refere ao conforto e à segurança, e a transmitir, de forma atenuada, as ações do tráfego às camadas inferiores.

2.4 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Capa de rolamento ou revestimento é a camada que tem a função de receber diretamente os esforços provenientes do tráfego e transmití-los às camadas inferiores, proporcionar uma superfície de rolamento regular, de tráfego confortável e com textura anti-derrapante. Deve, ainda, impermeabilizar o pavimento protegendo as camadas inferiores e conferir resistência a intempéries.

Nos pavimentos flexíveis, o revestimento é resultante da mistura a quente, em usina, de agregado mineral graúdo, miúdo, material de enchimento (fíler) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente, podendo ainda conter aditivos.

Segundo o DNER (1996), os revestimentos asfálticos são constituídos pela associação de agregados e materiais betuminosos e esta associação pode ser feita de duas maneiras clássicas: por penetração e por mistura.

2.4.1 Revestimentos asfálticos por penetração

Nos revestimentos de penetração distinguem-se os de penetração direta (macadame betuminoso) e os de penetração invertida, enquadrando-se nesse grupo os tratamentos superficiais simples, duplo, triplo e capas selantes.

- Penetração Direta: São os revestimentos executados através do espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria apropriada, sendo cada camada, após compressão, submetida a uma aplicação de

material betuminoso e recebendo, ainda, a última camada, uma aplicação final de agregado miúdo.

- Penetração invertida: São os revestimentos executados através de uma ou mais aplicações de material betuminoso, seguida(s) de idênticos números de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometria apropriadas. Conforme o número de camadas chamam-se: tratamento superficial simples (o ligante asfáltico é espargido sobre a base do pavimento e imediatamente coberto por uma única e uniforme camada de agregado), tratamento superficial duplo (o ligante asfáltico é espargido sobre a base do pavimento e imediatamente coberto por uma única e uniforme camada de agregado, após repete-se uma vez o procedimento) e tratamento superficial triplo (o ligante asfáltico é espargido sobre a base do pavimento e imediatamente coberto por uma única e uniforme camada de agregado, após repete-se mais duas vezes procedimento).

2.4.2 Revestimentos asfálticos por mistura

Nos revestimentos por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes da compressão. Conforme os seus respectivos processos construtivos, são adotadas ainda as seguintes designações: pré-misturado a frio (quando os tipos de agregados e de ligantes utilizados permitem que o espalhamento seja feito à temperatura ambiente) e pré-misturado a quente (quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados na pista ainda quentes).

A designação, concreto betuminoso usinado a quente ou concreto asfáltico, tem sido reservada para pré-misturados a quente de graduação densa, em que são feitas rigorosas exigências no que diz respeito a equipamentos de construção e índices tecnológicos como granulometria, teor de betume, estabilidade, volume de vazios, etc.

2.4.2.1 Dosagem de misturas asfálticas

O projeto de um concreto asfáltico para pavimentação constitui um estudo de seleção e dosagem dos materiais constituintes, com a finalidade de enquadrá-los economicamente nas especificações estabelecidas (SENÇO, 2001).

Os principais métodos de projeto são:

- **Método Marshall** – É baseado nas medidas de estabilidade e fluência Marshall, além de propriedades volumétricas da mistura.
- **Método Hubbard-Field** – Este ensaio foi um dos primeiros a avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. O ensaio consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova quando forçado através de um orifício circular, sendo que esta carga é considerada o valor da estabilidade Hubbard-Field. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento.
- **Método Hveem** – O método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O método Hveem possui duas vantagens reais. Primeiramente, o método de compactação pulsante em laboratório é vista pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com o CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente – em campo. Segundo, o parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo de prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada (MOTTA, 2000).
- **Método triaxial de Smith** – O termo triaxial refere-se à condição em que a pressão de suporte é aplicada ao longo da superfície lateral do corpo de prova cilíndrico, enquanto cargas axiais são aplicadas em sua base. Esse tipo

de ensaio é geralmente aplicado para as classes de materiais que se apresentam plásticos no estudo natural.

Cada um desses métodos possui critérios próprios que objetivam o estabelecimento de relações entre os ensaios de laboratório e os resultados obtidos no campo, sob condições usuais de serviço.

Hirsch *et al.* (2006) destaca a grande importância da temperatura da água na pesagem hidrostática (pesagem imersa em água) dos corpos-de-prova preparados através da metodologia Marshall, para a determinação das propriedades volumétricas das misturas. Relata que, é de grande relevância o controle da temperatura da água no recipiente em $25 \pm 1^\circ\text{C}$, pois resultados do estudo indicaram que a temperatura da água de imersão altera de maneira muito expressiva todas as propriedades volumétricas do CA, o que pode levar a equívocos na análise das propriedades durante o projeto e controle de qualidade de execução.

2.4.2.2 Produção

A produção do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), assim como as demais misturas betuminosas para as quais se exige um controle de dosagem e homogeneização bastante efetivo, são produzidos em usinas próprias, cujo desenvolvimento tecnológico vem apresentando melhorias substanciais, a cada ano que passa. São dois tipos de usinas:

- **Usinas descontínuas:** que apresentam produção descontínua; gravimétricas.
- **Usinas contínuas:** que apresentam produção contínua; volumétricas.

As partes constituintes das usinas:

Silos frios: Destinam-se a receber os diversos agregados que vão ser utilizados no preparo das misturas;

Correias transportadoras: A função é conduzir os agregados provenientes dos alimentadores para o pé do elevador a frio;

Elevador frio: Usualmente é do tipo de caçamba. Tem por finalidade recolher a mistura de agregados transportada pela correia e introduzi-la no secador;

Secador: A função do secador é de remover ao máximo possível a umidade da mistura de agregados, bem como aquecê-los na temperatura especificada para a mistura. Consiste o secador de um longo cilindro animado de movimento de rotação. Um conjunto de canaletas internas, dispostas paralelamente ao eixo do secador, faz com que a mistura de agregados passe obrigatoriamente por um fluxo de gases quentes proveniente da chama do maçarico.

Sistema Coletor de pó: São instalados sistemas coletores de pó nas usinas, a fim de reduzir os inconvenientes que resultariam do lançamento de pó na atmosfera, bem como para possibilitar a recuperação de uma parcela de finos que são retirados dos agregados no secador.

Elevador Quente: O elevador quente tem a constituição análoga á do elevador frio, sendo recoberto para evitar perdas de temperatura por parte do agregado aquecido.

Silos Quentes: Os silos quentes, como sugere a própria denominação, são destinados a receber os agregados aquecidos provenientes do secador. Ao número de silos quentes de que a usina dispõe está condicionado o número de frações em que será dividida a mistura de agregados.

Introdução do fíler: O fíler é único componente da mistura asfáltica que não é aquecido.

O fíler é armazenado em silos a parte, sendo pesado e transportado através de um elevador e descarregado diretamente no misturador. Em certos tipos de usinas contínuas, o fíler é armazenado em um pequeno silo, e a quantidade do produto a ser incorporada na mistura é regulada por intermédio da abertura do portão existente na

parte inferior do silo referido, o material sai do portão citado e levado por um parafuso sem-fim e introduzido no pé do segundo elevador quente.

Em outras usinas contínuas, o silo de fíler é colocado diretamente sobre o misturador e a quantidade de material é regulada da mesma maneira, por intermédio da abertura de um portão.

Balança: Nas usinas intermitentes, o estágio final da dosagem dos agregados é efetuado sob a forma de pesadas cumulativas em uma balança, acham-se localizadas nas comportas dos silos quentes.

Na maioria das usinas intermitentes a quantidade de ligante correspondente a cada “traço” é determinada em bases volumétricas, em algumas, porém, o ligante é dosado da mesma forma que os agregados, em uma balança.

Misturador: Os agregados aquecidos e convenientemente proporcionados na balança (usinas intermitentes) ou provenientes dos portões dos silos quentes (usinas contínuas) são introduzidas no misturador.

O misturador consiste essencialmente de dois eixos paralelos, providos de palhetas e animados de movimento de rotação. Estes movimentos têm sentidos opostos, de forma a promover a ascensão do material localizado entre eles e, em seguida, lançá-lo de encontro às paredes dos misturadores.

Nas usinas contínuas, a incorporação do ligante aos agregados (ou a mistura de agregados mais fíler) tem lugar, de forma contínua, pouco antes de eles penetrarem no misturador.

Depósitos: Servem para armazenar por pouco tempo a mistura, antes da descarga nos veículos transportadores.

2.5 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A degradação de pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, como consequência se dá o afundamento de trilha de roda, fissuras de fadiga e de retração térmica e perda de adesividade, resultando na perda de adesão entre o ligante e os agregados (desagregação). As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas estão mais relacionadas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes.

As misturas asfálticas são frequentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimentos. Os mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis, se refletem no revestimento e permitem identificar dois modos distintos de sollicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material (associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas) e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (SPECHT, 2004).

2.5.1 Trincamento por fadiga

A repetição de cargas das rodas dos veículos solicita à flexão a camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso. Iniciam-se trincas, geralmente na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície. Em revestimentos muito espessos, de 20cm ou mais, podem iniciar-se as trincas na superfície pela curvatura convexa próximo às rodas (MEDINA e MOTTA, 2005).

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e deformações dos pavimentos asfálticos, diminuindo seu desempenho. Sabe-se, também, que misturas asfálticas com elevadas percentagens de volume de vazios são mais susceptíveis a trincamento de fadiga.

2.5.2 Afundamento de trilha de roda

É coerente a observação de que o defeito mais freqüente nos pavimentos flexíveis, no Brasil, é o trincamento da camada superior de concreto asfáltico. O trincamento se desenvolve pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente.

Mas, também ocorrem deformações permanentes, irreversíveis, nas trilhas de rodas dos caminhões nas estradas, corredores de ônibus urbanos, e nos pátios de estacionamento de revestimentos asfálticos. Specht et al. (2006) destaca que misturas asfálticas produzidas com reduzidos índices de volume de vazios levam a excessivas deformações permanentes, para misturas asfálticas densas o volume de vazios recomendado está na faixa de 3 a 5%.

O afundamento da trilha de roda é resultante do somatório das deformações permanentes que ocorrem a cada passagem de um veículo, sendo acumulativo, podendo-se ter dois tipos de afundamento de trilha de roda em pavimentos com revestimentos em misturas asfálticas: um resultante da contribuição de todas as camadas e subleito, e outro resultante de deformação exclusiva da própria mistura asfáltica.

Pode-se então verificar que, além das condições do tráfego e condições ambientais, as propriedades da própria mistura são de suma importância no entendimento do fenômeno e conseqüentemente no controle de sua ocorrência em campo. Destaca-se, também, a utilização de ligantes modificados na tentativa de melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos.

2.5.3 Perda de adesividade

A perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de um mistura betuminosa pode ser associada a dois mecanismos: perda de adesão e perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado e ao

descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado. Estes dois fatores estão intimamente relacionados e, então, o dano causado pela umidade em misturas asfálticas é a combinação entre estes dois fatores.

Inúmeros fatores influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade. Hicks (1991) *apud* Specht (2004) relata que um dos fatores importantes é o volume de vazios, misturas com volume de vazios entre 6 e 13% (aproximadamente) não são nem impermeáveis, nem drenantes e são as mais susceptíveis ao dano por umidade induzida. Outro fator que deve ser mencionado é a eficiência do sistema de drenagem de um pavimento, capaz de evitar o acúmulo de água junto ao revestimento e a umidade ascendente por capilaridade.

Dentre as várias metodologias aplicáveis à verificação das características de adesividade de misturas asfálticas estão os métodos empíricos que se baseiam na análise visual, onde o contato entre o ligante asfáltico e o agregado é avaliado visualmente e procura-se correlacionar os resultados com o possível desempenho da mistura em campo. Exemplos são os métodos DNER – ME 78/94 e DNER – ME 79/94. O segundo grupo de ensaios é baseado no comportamento mecânico das misturas onde amostras de concreto asfáltico são submetidas a um condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada ou simular o que ocorre em campo. Neste grupo estão, dentre outras, as Metodologias Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) e Cantabro (CEC 325/86). Specht et al. (2006) e Rozek et al. (2006) trazem, respectivamente, uma revisão das metodologias Lottman e Cantabro.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo teve como propósito pesquisar e analisar qual a influência da utilização de diferentes tipos de ligantes, adicionados a uma mesma composição mineral, no comportamento de misturas asfálticas tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

A pesquisa é de ordem quantitativa, uma vez que foram realizados ensaios no Laboratório de Engenharia Civil – LEC, da UNIJUÍ e no Laboratório de Pavimentação – LAPAV, da UFRGS cujos resultados foram tabelados e graficados, como também, serviram para a análise dos parâmetros de dosagem Marshall, análise do comportamento mecânico, das propriedades de adesividade e das propriedades hidráulicas das misturas em concreto asfáltico.

3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O planejamento do experimento contemplou a dosagem, em laboratório, de três projetos de misturas em concreto asfáltico, através da metodologia Marshall – utilizando-se a faixa B do DAER/RS para a composição granulométrica dos agregados e três diferentes tipos de ligantes asfálticos: ligante convencional (CAP 50/70), asfalto modificado com polímero SBS (Asfalto-Polímero) e modificado com borracha reciclada de pneus (Asfalto-Borracha), para a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall e avaliação das propriedades hidráulicas.

Após a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall, tendo-se determinado o teor de ligante de projeto, foram moldadas amostras de cada mistura para a verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por

compressão diametral e ensaio de módulo de resiliência) e para a verificação das propriedades de adesividade (Metodologia Lottman Modificada e ensaio Cantabro).

Cumprе salientar que, para a verificação das propriedades hidráulicas, (coeficiente de permeabilidade k) das três misturas em concreto asfáltico, foram utilizadas as mesmas amostras moldadas para a realização da dosagem Marshall. Ressalta-se ainda, que a utilização dessas amostras antecedeu a etapa de rompimento para verificação da estabilidade e fluência.

Na Tabela 1, estão apresentados resumidamente o números de amostras que foram preparadas para a realização de todos os ensaios, moldados através da metodologia Marshall.

Tabela 1: Quantidade de amostras preparadas

<i>Procedimentos</i>	<i>Tipo de ligante</i>		
	<i>CAP 50/70</i>	<i>Asfalto-Polímero</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>
<i>Dosagem Marshall e Propriedades Hidráulicas</i>	15 amostras	15 amostras	15 amostras
<i>Rt e Mr</i>	4 amostras	4 amostras	4 amostras
<i>Metodologia Lottman</i>	6 amostras	6 amostras	6 amostras
<i>Ensaio Cantabro</i>	3 amostras	3 amostras	3 amostras
<i>Total por ligante</i>	28 amostras	28 amostras	28 amostras
<i>Total geral</i>	84 amostras		

O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995) e de acordo com ASTM D 6926-04 e ASTM D 6927-05.

Na Tabela 2 está apresentada a composição granulométrica do material que foi ajustada de tal forma que a mistura ficou no centro da faixa “B” do DAER/RS ou na faixa IV B do Instituto do Asfalto, com tamanho máximo de granulares de 19mm, devido ser está a mais utilizada no Estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 2 está apresentado o ajuste granulométrico da mistura.

Tabela 2: Especificação e composição granulométrica da mistura – Faixa B DAER/RS

<i>Especificação e composição granulométrica da mistura – Faixa B DAER/RS</i>					
<i>Peneira</i>	<i>mm</i>	<i>Limite da faixa</i>	<i>Centro da faixa</i>	<i>Faixa de trabalho</i>	<i>Mistura</i>
<i>3/4"</i>	<i>19,1</i>	100	100	100 – 100	100
<i>1/2"</i>	<i>12,7</i>	80 – 100	90	84 – 96	90
<i>3/8"</i>	<i>9,5</i>	70 – 90	80	74 – 86	80
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	50 – 70	60	54 – 66	60
<i>n 8</i>	<i>2,38</i>	35 – 50	42,5	38,5 – 48,5	42,5
<i>n 30</i>	<i>0,59</i>	18 – 29	23,5	19,5 – 29	23,5
<i>n 50</i>	<i>0,297</i>	13 – 23	18	14 – 23	18
<i>n 100</i>	<i>0,149</i>	8 – 16	12	9 – 16	12
<i>n 200</i>	<i>0,074</i>	4 – 10	7	5 - 10	7

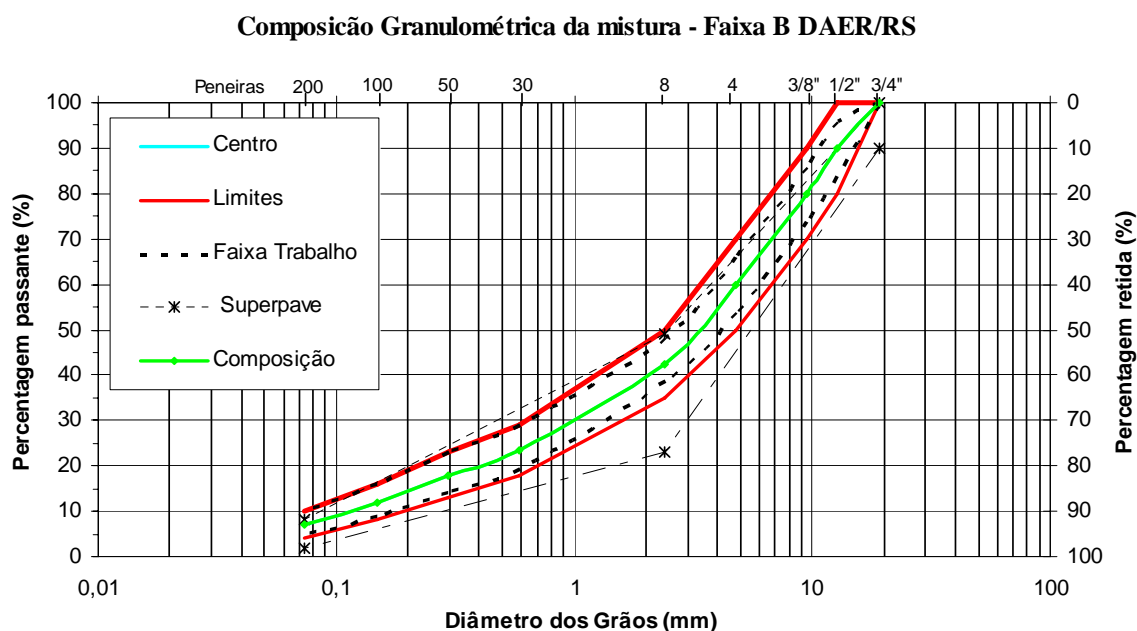


Figura 2: Ajuste granulométrico da mistura

A dosagem e a moldagem das amostras, juntamente com a obtenção dos parâmetros de dosagem Marshall, as propriedades hidráulicas e a metodologia Lottman Modificada foram realizados no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ e os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e ensaio Cantabro foram realizados no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.3.1 Agregados minerais

O material pétreo utilizado na pesquisa foi fornecido pela Pedreira Tabbille Ltda, que possui sua unidade industrial no município de Coronel Barros e sua unidade comercial na cidade de Ijuí/RS. O material pétreo é uma rocha basáltica básica da formação Serra Geral, semelhante àquela encontrada em outros pontos do Estado e considerada a mais representativa desta região do país. A localização da jazida e a representatividade do derrame basáltico no Estado do Rio Grande do Sul podem ser observados na Figura 3. O derrame basáltico cobre aproximadamente 54% do território gaúcho. Foi utilizado também areia de várzea de grãos duros e arredondados, vinda da região de Santa Maria/RS e fornecido pela mesma empresa.

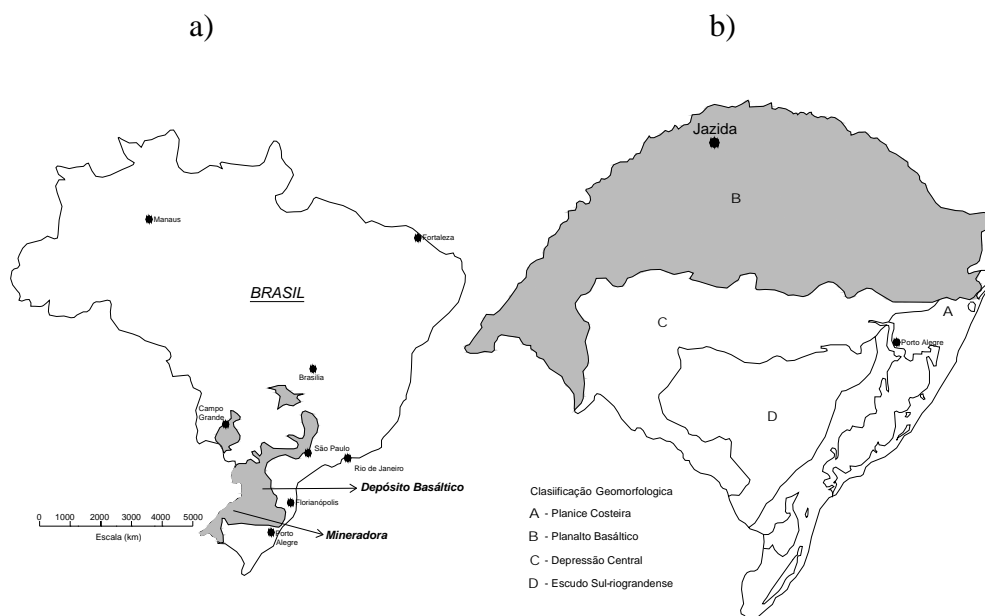


Figura 3: Localização da jazida e do derrame basáltico

a) no Brasil

b) no Estado do Rio Grande do Sul

Fonte: Specht (2004)

Segundo ABGE (1998) os basaltos são rochas ígneas vulcânicas mais abundantes e sua maior ocorrência é na forma de derrames. No Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde perfazem mais de 90% das rochas vulcânicas aí existentes. A mineralogia essencial é o plagioclásio cálcico (labradorita) (35-50%), augita (20-40%), magnetita ou ilemita (5-10%) e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. A textura é afanítica, microgranular, por vezes amigroidal.

A coleta do material foi feita em uma única oportunidade, trazida às proximidades do Laboratório de Engenharia Civil – LEC com o auxílio de uma unidade escavotransportadora e um caminhão. Posteriormente os granulares foram secados e armazenados em sacos impermeáveis. A rocha tem aparência de sã com pouquíssima argila ou material deletério.

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados médios das análises granulométricas realizadas nos agregados, utilizados na pesquisa. Na Figura 4 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados.

Tabela 3: Valores médios das análises granulométricas dos agregados

<i>Peneira</i>		<i>Percentagem passante em massa (%)</i>			
<i>n°</i>	<i>mm</i>	<i>Brita ¾</i>	<i>Pedrisco</i>	<i>Pó-de-Pedra</i>	<i>Areia</i>
<i>3/4"</i>	<i>19,1</i>	97,4	100,0	100,0	100,0
<i>1/2"</i>	<i>12,7</i>	43,5	100,0	100,0	100,0
<i>3/8"</i>	<i>9,5</i>	18,4	100,0	100,0	99,9
<i>1/4"</i>	<i>6,35</i>	5,0	78,0	100,0	99,9
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	1,4	61,1	91,2	99,9
<i>n 8</i>	<i>2,38</i>	1,1	17,8	65,1	99,2
<i>n 30</i>	<i>0,59</i>	1,0	4,8	26,5	91,5
<i>n 50</i>	<i>0,297</i>	0,9	4,1	18,8	21,9
<i>n 100</i>	<i>0,149</i>	0,8	3,6	14,3	2,4
<i>n 200</i>	<i>0,074</i>	0,7	3,0	10,7	0,8

Nota: os ensaios de granulometria foram feitos com lavagem dos agregados na #200

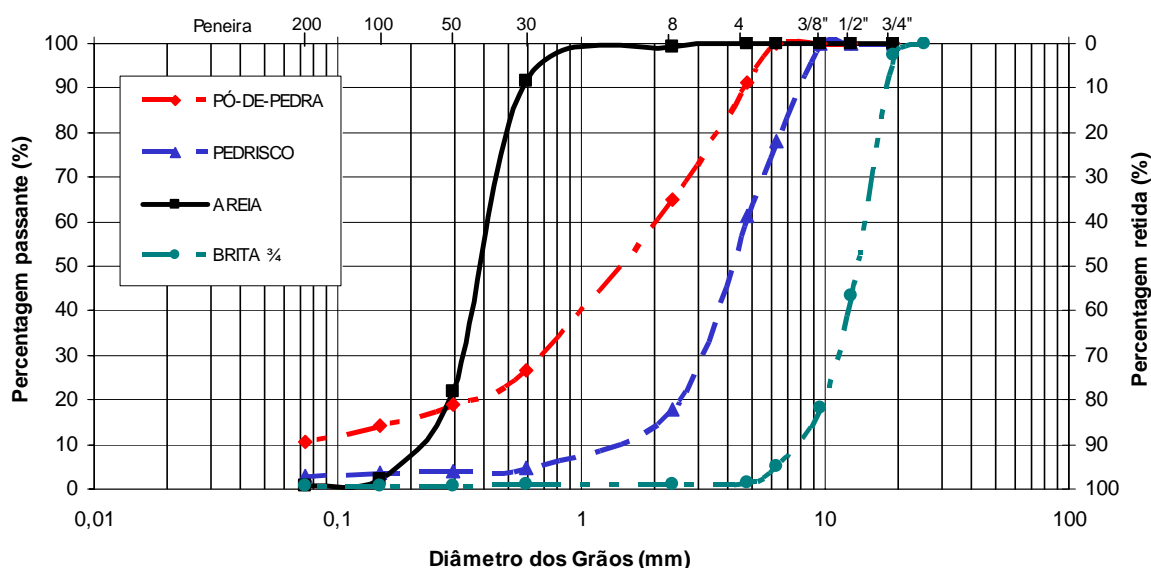


Figura 4: Curvas granulométricas dos agregados utilizados

No Quadro 1 estão apresentadas algumas características dos agregados utilizados nesta pesquisa.

Quadro 1: Características dos agregados utilizados

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Agregado Graúdo (>2mm)</i>	<i>Agregado Miúdo (<2mm)</i>
<i>Absorção</i>	DNER 081/98	1,228%	---
<i>Massa Específica Real do Grão</i>	DNER 081/98	3,033kN/m ³	2,973 kN/m ³
<i>Massa Específica Aparente do Grão</i>	DNER 081/98	2,924 kN/m ³	---
<i>Índice de Lamelaridade</i>	DAER 108/01	21,8	---
<i>Desgaste ou Perda à Abrasão¹</i>	NBR 465/84	28%	---

Nota: ¹ Ensaio realizado no LAPAV

3.3.2 Ligantes Asfálticos

Foram utilizados nesta pesquisa três diferentes tipos de cimentos asfálticos, ligante convencional (CAP 50/70) e asfalto modificado por polímero SBS (Estireno – Butadieno - Estireno), fornecidos pela empresa Betunel – Tecnologias em Asfaltos, localizada no estado de São Paulo e asfalto modificado por borracha reciclada de pneus, asfalto-borracha (ECOFLEX B), fornecido pela empresa Greca Asfaltos, localizada na cidade de Esteio/RS. A caracterização dos cimentos asfálticos realizadas,

respectivamente, pela Petrobras, Betunel e Greca Asfaltos, se encontram nos quadros a seguir, sendo que a densidade de todos os ligantes foram conferidos no Laboratório de Engenharia Civil – LEC da UNIJUÍ.

Os cimentos asfálticos foram armazenados em laboratório em local seco e arejado em latas de 3,6 litros.

Nos Quadros 2 e 3 estão apresentadas, respectivamente, as propriedades do ligante convencional (CAP 50/70) e do ligante modificado com polímero SBS (Asfalto-Polímero), fornecidos pela empresa Betunel, e no Quadro 4 estão apresentadas as propriedades do Asfalto-Borracha. As fichas completas das características dos ligantes asfálticos utilizados encontram-se no ANEXO A.,

Quadro 2: Características do ligante convencional CAP 50/70

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>CAP 50/70</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	NBR 6560	46 mín.	48,6
<i>Penetração (0,1mm)</i>	NBR 6576	50 - 70	51
<i>Visc. Brookfield 135 GC – SP21 20RPM</i>	MB 517	274 mín.	317
<i>Visc. Brookfield 150 GC – SP21 20RPM</i>	MB 517	112 mín.	164
<i>Visc. Brookfield 177 GC – SP21 20RPM</i>	MB 517	57 a 285	69
<i>Ductilidade 25°C</i>	NBR 6293	60 mín.	>150
<i>Massa Específica (g/cm³)²</i>	DNER –M 16/64	---	1,009
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	NBR 11341	235 mín.	>296

Quadro 3: Características do ligante modificado com polímero (Asfalto-Polímero)

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Asfalto-Polímero</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	NBR 6560	60 - 85	66
<i>Penetração (0,1mm)</i>	NBR 6576	45 - 80	70
<i>Visc. Brookfield 135 GC – SP21 20RPM</i>	MB 517	850 - 3000	1115
<i>Visc. Brookfield 150 GC – SP21 20RPM</i>	MB 517	2000 máx.	543
<i>Visc. Brookfield 177 GC – SP21 20RPM</i>	MB 517	1000 máx.	266
<i>Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C, %</i>	NBR 15086	85 mín.	93
<i>Massa Específica (g/cm³)²</i>	DNER –M 16/64	---	1,007
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	NBR 11341	235 mín.	>35

Quadro 4: Características do ligante modificado com borracha reciclada de pneus

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultados</i>
<i>Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1 mm</i>	DNER-ME 003/94	25 a 75	54
<i>Ponto de amolecimento, °C</i>	DNER-ME 247/94	50 a 70	60
<i>Recuperação Elástica</i>	DNER-ME 382/99	40 a 70	63
<i>Ponto de Fulgor, °C</i>	DNER-ME 148/99	235 (mínimo)	265
<i>Densidade Relativa, 25°C/25°C</i>	DNER-ME 16/94	Anotar	1.033
<i>Viscosidade Brookfield à 175°C, cP</i>	ASTM D 2669-87	1000 - 2000	1.650

Na Tabela 4 estão apresentadas às temperaturas de mistura e de compactação de cada mistura em concreto asfáltico que foram determinados através do ensaio de viscosidade.

Tabela 4: Temperaturas de mistura e de compactação

<i>Tipo de Ligante</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	
	<i>Mistura</i>	<i>Compactação</i>
<i>CAP 50/70</i>	149 - 155	137 - 142
<i>Asfalto-Polímero</i>	164 - 173	152 - 157
<i>Asfalto-Borracha</i>	170 - 180	160 - 170

3.4 PROCEDIMENTO DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.4.1 Dosagem Marshall

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são feitos quase que exclusivamente em acordo com a metodologia Marshall. O Método Marshall foi desenvolvido na década de 30 por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi nos Estados Unidos. Esse método foi idealizado para efeito da determinação do teor de ligante que deveria ser usada na composição de mistura betuminosa, destinadas a serviços de pavimentação rodoviária (OGURTSOVA, 1999).

Durante o período da segunda guerra mundial, o exército dos EUA passou a procurar um método simples, prático e eficiente para a tarefa de dosagem e controle da qualidade das misturas asfálticas preparadas a quente, para uso na pavimentação de pistas de aeroportos militares. A razão determinante dessa necessidade foi o crescente aumento das cargas e pressões dos pneus impostos pela aviação militar, devido ao desenvolvimento de pesados aviões de bombardeio (SPECHELT, 2004).

O estudo desta questão foi encaminhado ao Corpo de Engenheiros do Exército Americano que, após uma análise comparativa entre os métodos disponíveis até então, optou pelo método Marshall, por sua rapidez, simplicidade e relativa eficiência, aliado a sua portabilidade e fácil disponibilidade dos equipamentos necessários à realização dos ensaios requeridos. Em face disso, uma extensa pesquisa foi desenvolvida sobre o método Marshall, por esse órgão, posteriormente, o referido método teve seu uso adotado pelo exército e acabou tornando-se internacionalmente conhecido e utilizado.

Beck (2005) cita a simplicidade, rapidez de execução e o baixo custo dos equipamentos requeridos pelo ensaio Marshall como fatores que proporcionaram a propagação deste método para diversos organismos rodoviários do mundo todo, inclusive no Brasil.

A seguir é descrito, de forma sucinta, o processo de moldagem de corpos-de-prova de misturas betuminosas através do Método Marshall:

- a. Preparação e separação de material granular para a confecção de no mínimo 15 corpos-de-prova (3 para cada teor de ligante);
- b. Estimativa da percentagem de ligante para os ternos de corpos-de-prova;
- c. Moldagem por compactação dinâmica, com o equipamento de Marshall dos ternos de corpos de prova com os teores de ligantes estimados; Nesta pesquisa as amostras foram preparadas manualmente com compactação de 75 golpes por face e frequência de 0,8s;

- d. Extração dos corpos-de-prova dos moldes cilíndricos e cura, ao ar livre, durante 24 horas;
- e. Pesagem e cubagem dos corpos-de-prova para a determinação dos elementos para o cálculo de suas características físicas (massa específica aparente, volume de vazios, relação betume vazios); Tomou-se o cuidado na pesagem hidrostática (peso imerso) de equalizar a temperatura da água em $25\pm 1^{\circ}\text{C}$;
- f. Imersão dos corpos-de-prova em banho-maria, a 60°C , durante 30 minutos, após as amostras são imediatamente submetidos as ensaio Marshall, para a determinação de suas propriedades mecânicas (estabilidade e fluência);
- g. Plotagem das curvas de variação de volume de vazios (%), relação betume/vazios (%), vazios de agregado mineral (%), densidade máxima teórica (g/cm^3), densidade aparente (g/cm^3), estabilidade e fluência, em função da quantidade de ligante utilizada e, posterior determinação do teor de ligante de projeto em função dos critérios definidos pelo DAER/RS;

As estimativas de percentagem de ligante de projeto para as três misturas estudadas estão apresentadas na Tabela 5. O teor de ligante de projeto foi determinado em função do volume de vazios de 4%. A faixa de variação compreende a moldagem de 3 corpos-de-prova para cada 0,5% de teor de ligante adicionado.

Tabela 5: Estimativa de teores de ligante para cada mistura

<i>Tipo de Ligante</i>	<i>Teor de Ligante</i>
	<i>Faixa de variação (%)</i>
<i>CAP 50/70</i>	4,5 – 6,5
<i>Asfalto-Polímero</i>	5,0 – 7,0
<i>Asfalto-Borracha</i>	5,5 – 7,5

O valor da carga máxima suportada pelos corpos-de-prova é conhecido como estabilidade Marshall e a deformação de ruptura de fluência. Além desses dois parâmetros são também calculados, a densidade, o volume de vazios, os vazios de agregado mineral e a relação betume/vazios. Os valores limites dos parâmetros Marshall são normalizados por diversos órgãos rodoviários, DNER – ME 043/95 e DAER/RS – ES - P 16/98. Os parâmetros da especificação do DAER/RS para tráfego pesado e leve estão apresentados no Quadro 5, sendo que nesta pesquisa a análise foi realizada com a especificação para tráfego pesado.

Quadro 5: Especificação do Método Marshall - DAER/RS – ES – P 16/98

<i>Método de Projeto Marshall</i>	<i>Tráfego Pesado</i>		<i>Tráfego Leve</i>	
	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>1. Número de golpes em cada face do CP</i>	75		50	
<i>2. Estabilidade (kgf)</i>	800	--	500	--
<i>3. Fluência (1/100")</i>	8	16	8	16
<i>4. Vazios de ar (%) Camada de rolamento</i>	3	5	3	5
<i>5. Relação betume/vazios Camada de rolamento</i>	75	82	75	82

Maiores detalhes sobre o referido método de dosagem Marshall podem ser encontrados em: Pinto (1991), Senço (1997), Ogurtsova (1999), Specht (2004), Wesseling (2005), Beck (2005), Specht *et al.* (2006).

Na Figura 5 está apresentada toda a seqüência adotada para a realização do método Marshall, realizado no Laboratório de engenharia Civil – LEC da UNIJUÍ.

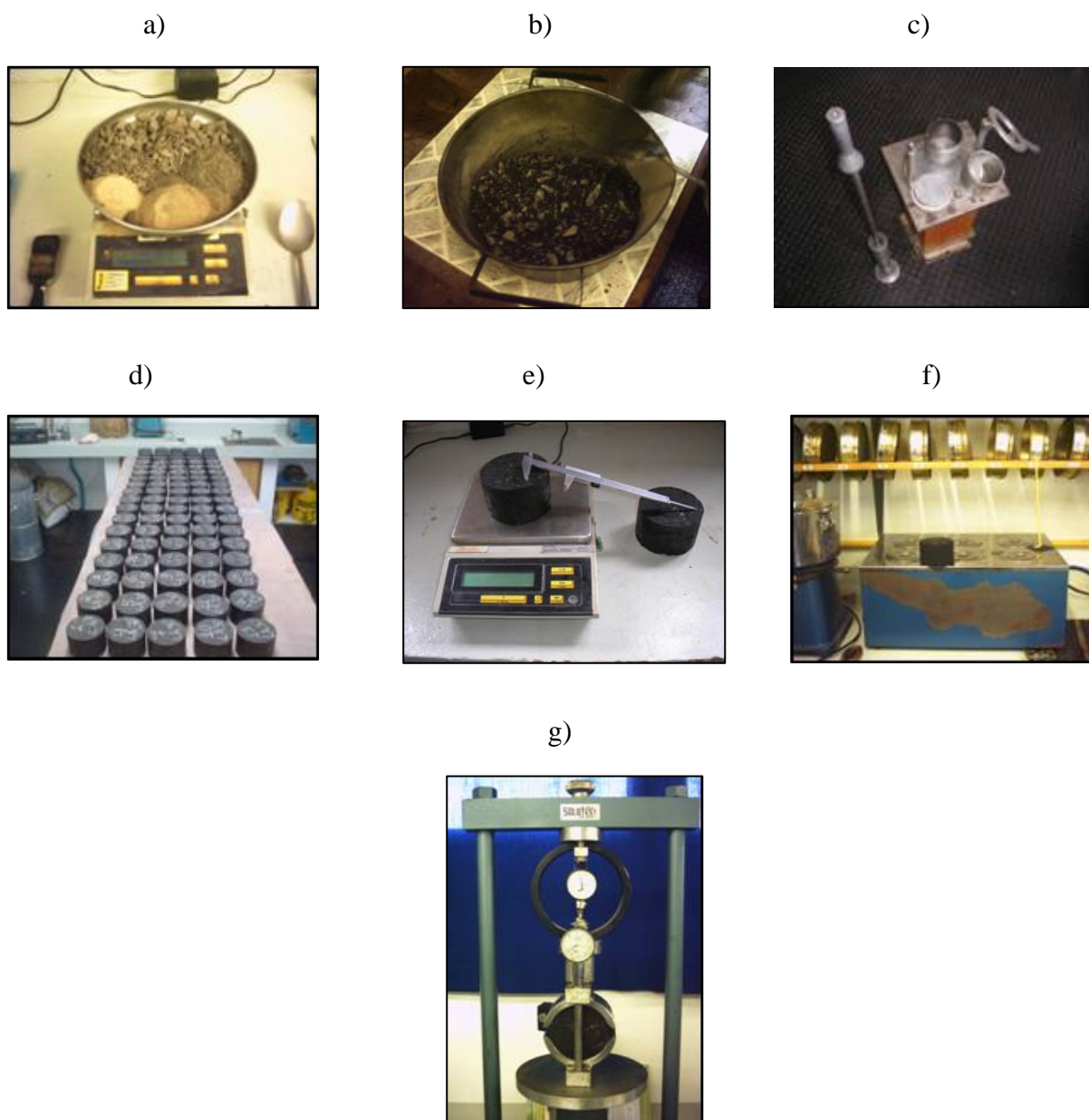


Figura 5: Método Marshall – Esquema

- a) Preparação, separação e pesagem do material granular;
- b) Mistura com a estimativa do teor de ligante;
- c) Soquete Marshall para compactação dinâmica;
- d) Extração dos CP's após 24 horas;
- e) Pesagem e cubagem;
- f) Banho-maria a 60°C durante 30 minutos;
- g) Prensa para compressão diametral;

3.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento portland, através de solicitação estática. É conhecido em vários centros de pesquisa no exterior como “ensaio brasileiro” (MEDINA e MOTTA, 2005).

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral nas amostras com diâmetro 10,20 cm e altura variável, moldadas através do método Marshall, seguiu as prescrições da norma DNER-ME 138/94 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga. O ensaio procede-se da seguinte maneira:

- a. Medir a altura (h) do corpo-de-prova com um paquímetro em quatro posições diametralmente opostas; adotando como altura a média aritmética das quatro leituras;
- b. Medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com um paquímetro, em três posições; adotar como diâmetro a média aritmética das três leituras;
- c. Colocar o corpo-de-prova na estufa, ou sistema de refrigeração, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura requerida (25, 30, 45 ou 60°C). Nesta pesquisa foi adotada 25°C;
- d. Ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter o corpo-de-prova em posição;
- e. Aplicar a carga progressivamente, com velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura do corpo-de-prova segundo o plano diametral vertical e anotar o valor da carga de ruptura. Com o valor obtido

é calculada a resistência à tração do corpo-de-prova rompido a compressão diametral.

A formulação utilizada para o cálculo da resistência a tração por compressão diametral (R_t) é a seguinte:

$$R_t = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h}$$

onde: F = Força aplicada; h = altura do corpo-de-prova; d = diâmetro do corpo-de-prova.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento de compressão em amostras cilíndricas onde o carregamento é aplicado em planos paralelos, diametralmente opostos. Esta configuração de carga gera um plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao da aplicação da carga.

O estado biaxial de tensões, gerado na amostra durante o carregamento, está esquematicamente apresentado na Figura 6. Foi utilizado uma prensa para a determinação da resistência á tração, apresentada na Figura 7. Esta configuração de sollicitação é verificada também nos ensaios de módulo de resiliência (SPECTH, 2004).

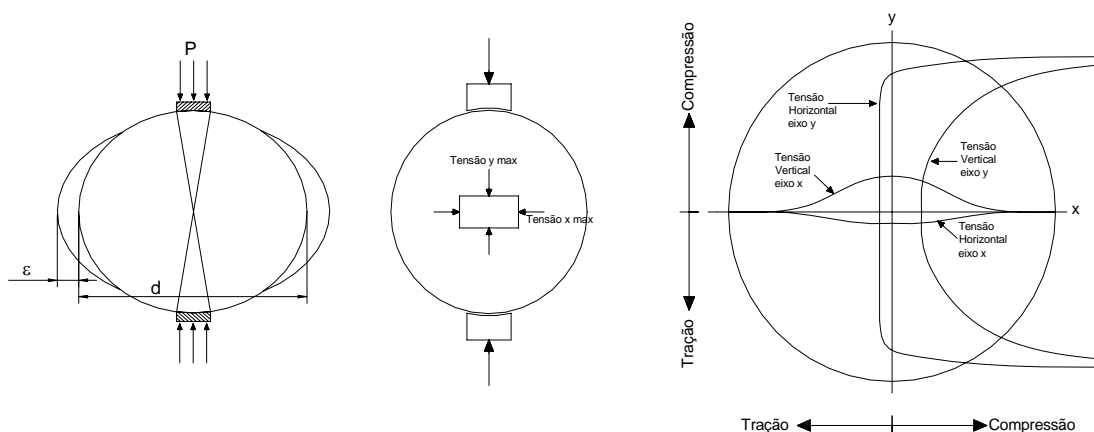


Figura 6: Estado de tensões gerado no ensaio de resistência à tração

Fonte: Specht(2004).



Figura 7: Equipamento para ensaio de resistência à tração

3.4.3 Ensaio de módulo de resiliência

O termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam a tensões causadoras das deformações. (MEDINA e MOTTA, 2005).

O módulo de resiliência é determinado através das prescrições do DNER-ME 133/94.

Utilizou-se para este ensaio, corpos-de-prova de 10,20cm de diâmetro e alturas variáveis, moldados conforme a Metodologia Marshall. Os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C. O equipamento utilizado, conforme corte esquemático apresentado na Figura 8 é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada; isso permite ensaios em diversas temperaturas (SPECHT, 2004).

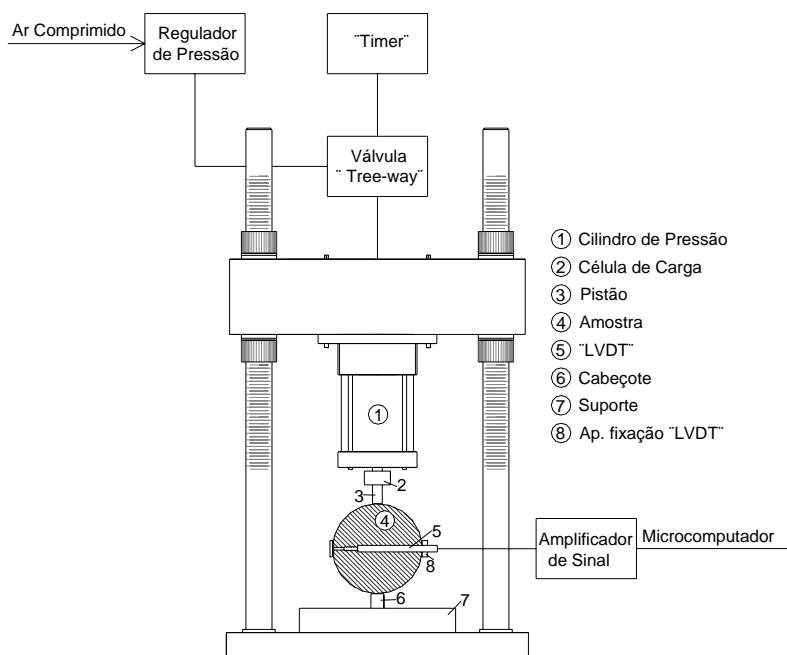


Figura 8: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência

Fonte: Specht(2004).

Primeiramente procede-se a montagem do conjunto para o ensaio procedendo da seguinte forma:

- Posicionar o corpo-de-prova no interior do suporte para fixação dos transdutores LVDT;
- Colocar o corpo-de-prova sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos;
- Fixar e ajustar os transdutores LVDT de modo a se obter registro no microcomputador;

A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador. O ensaio é realizado em duas direções: após a execução do ensaio a amostra é rotacionada em 90° e o ensaio é novamente conduzido. Na Figura 9, está apresentado o equipamento para o ensaio de módulo de resiliência ligado a um microcomputador.

Na Figura 9 estão apresentados o pulso de carga e o pulso de deformação versus tempo, típicos dos ensaios realizados.

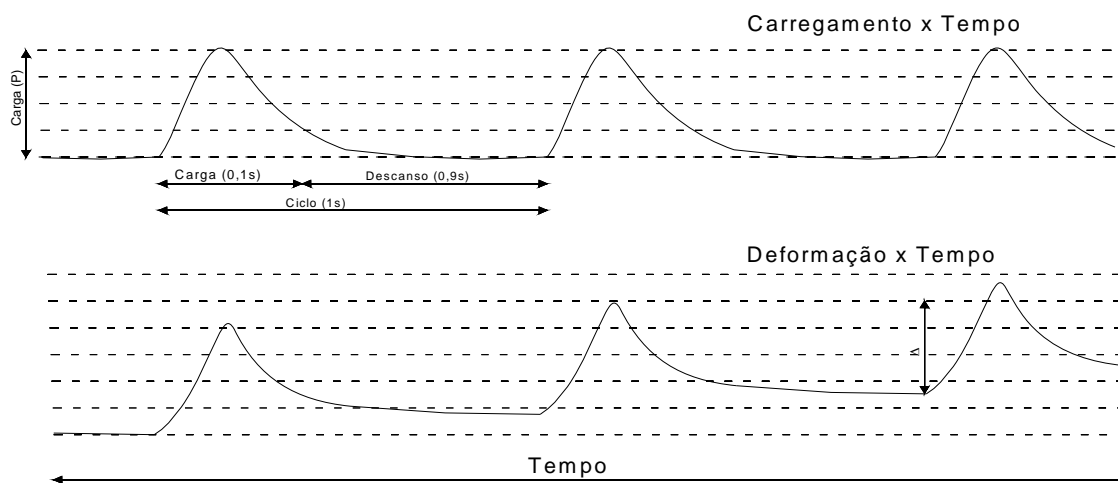


Figura 9: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência

Fonte: Specht(2004).

A equação utilizada para determinar o módulo de resiliência é a:

$$Mr = \frac{P}{\Delta.h} \cdot (0,2692 + 0,9976 \cdot \mu)$$

onde: Mr = módulo de resiliência; P = carga aplicada; Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga; h = altura do corpo-de-prova; μ = coeficiente de Poisson (0,30, valor adotado nesta pesquisa).



Figura 10: Equipamento de módulo de resiliência ligado a um microcomputador



Figura 11: Vista interna do equipamento de módulo de resiliência

3.4.4 Ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada

O ensaio Lottman Modificado avalia as propriedades de adesividade em mistura asfálticas, considerando o efeito deletério da água, em amostras moldadas através da Metodologia Marshall, com o volume de vazios de aproximadamente 7% ($\pm 1\%$). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento, esta relação é denominada Resistência retida à tração.

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos na adesividade da mistura.

O ensaio é normalizado pela ASSHTO T 283-89 e procede-se da seguinte maneira:

- a. Preparam-se seis amostras, segundo o método Marshall, com volume de vazios entre 6% e 8% e separam-se em dois grupos com 3 amostras cada;
- b. O primeiro grupo é submetido ao ensaio de resistência à tração após a imersão em água à 25°C, por duas horas, em sacos plásticos impermeáveis, determina-se o valor de Rt1 (média dos três valores);
- c. As amostras do segundo grupo são, inicialmente, saturadas (o grau de saturação deve ficar entre 55 e 80%). Essa saturação é conseguida com a aplicação de pressão de vácuo de, aproximadamente, 660mmHg, durante 30 minutos;
- d. Acondicionam-se os corpos-de-prova em sacos plásticos com, aproximadamente, 3ml de água destilada dentro de cada saco;
- e. Posteriormente, colocam-se os corpos-de-prova sob refrigeração à temperatura de -18°C, durante 15 horas;

- f. As amostras são removidas da refrigeração e imediatamente imersas em banho (em água destilada), à temperatura de 60°C, por um período de 24 horas;
- g. Transferem-se, cuidadosamente, as amostras para um banho, à temperatura de 25°C, por um período de 2 horas;
- h. Rompem-se os corpos-de-prova submetidos ao condicionamento e determina-se o valor de Rt2;

Este ensaio pode, também, ser realizado com amostras extraídas de pista. O valor encontrado na literatura como referência de misturas com bom desempenho quanto a adesividade é de 70%, e a Metodologia SUPERPAVE™, recomenda o valor de 80% como alvo.

Na Figura 12 está apresentado esquematicamente o procedimento necessário para a realização da Metodologia Lottman Modificada, que avalia as propriedades de adesividade de misturas asfálticas, para o segundo grupo de amostras (Rt2). Anteriormente, o primeiro grupo foi submetido ao ensaio de resistência à tração, após imerso por 2 horas, a temperatura de 25°C, em sacos impermeáveis, determinando-se o valor de Rt1.

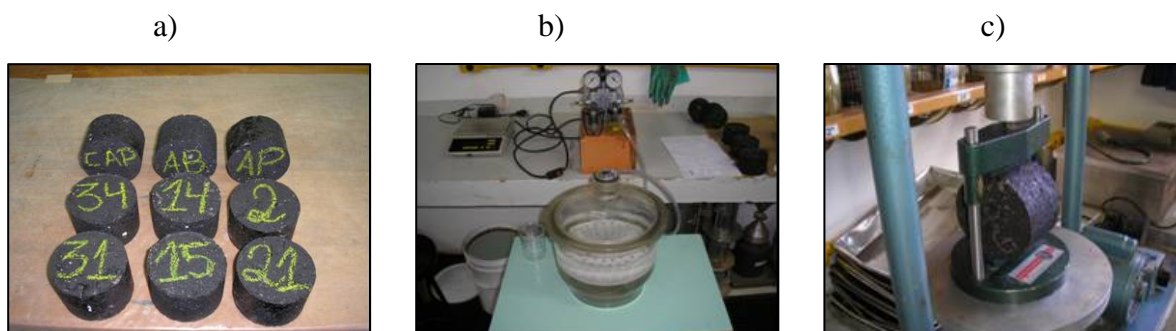


Figura 12: Metodologia Lottman Modificada

- a) grupo de corpos-de-prova (Rt2);
- b) saturação dos corpos-de-prova;
- c) equipamento para ensaio de resistência à tração;

3.4.5 Resistência ao desgaste - Metodologia Cantabro

A metodologia Cantabro foi selecionada para a perda de massa por desgaste ou abrasão. Este ensaio, desenvolvido para avaliar misturas abertas, foi criado e normalizado, inicialmente, no *Centro de Estudios de Carreteras* na Espanha (CEC 325/86) e, posteriormente, normalizado no Brasil, sob as normas DNER – ES 383/99 e DAER – EL 215/01.

O ensaio consiste em submeter amostras (uma por vez) de concreto asfáltico a 300 revoluções (33rpm), dentro da máquina de abrasão *Los Angeles*, sem as esferas metálicas. O ensaio é realizado a temperatura de 25°C. A perda de massa por desgaste é calculada através da diferença de massa das amostras antes e depois do ensaio. Na Figura 13 está apresentado o equipamento de abrasão *Los Angeles* utilizado para a realização do ensaio de perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, a resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas.



Figura 13: Execução do ensaio de desgaste Cantabro

Após o ensaio, quantifica-se a perda de massa do corpo-de-prova. O desgaste da mistura betuminosa por abrasão, em percentagem, é dado pela fórmula:

$$PC = \frac{P - P'}{P} * 100$$

onde: PC: perda no ensaio de desgaste Cantabro (%); P: peso inicial do corpo-de-prova (g); P': peso após a realização do ensaio (g).

O aspecto visual dos corpos-de-prova após a realização do ensaio de desgaste Cântabro encontra-se apresentado na Figura 14.



Figura 14: Aspecto dos corpos-de-prova após o ensaio de desgaste Cantabro

3.4.6 Ensaio de condutividade hidráulica

De acordo com Caputo (1988) o coeficiente de permeabilidade é determinado levando em consideração a Lei Experimental de Darcy (proposta em 1856 por esse engenheiro francês). Essa lei é válida apenas para um escoamento “laminar”, tal como pode ser considerado o escoamento na maioria dos solos naturais. Essa Lei de Darcy foi fundamentada a partir da percolação de água num permeâmetro.

O ensaio de condutividade hidráulica foi executado com um permeâmetro de paredes rígidas, equipamento que foi desenvolvido nesta pesquisa, no Laboratório de Engenharia Civil – LEC da UNIJUÍ. O ensaio consiste em medir o tempo em que um volume conhecido de água leva para percolar através do corpo-de-prova, aplicando-se uma carga hidráulica variável.

Primeiramente, tentou-se adaptar o equipamento utilizado para a verificação do coeficiente de permeabilidade k para misturas porosas, por Homem (2005), mas não houve sucesso pois as cargas hidráulicas eram muito baixas e a impermeabilização com argila e parafina não proporcionou impermeabilização total nas laterais. Com isso, a pesquisa desenvolveu e implementou um equipamento novo com possibilidade de cargas hidráulicas maiores e vedação com silicone nas laterais, obtendo sucesso nos resultados.

A permeabilidade de um determinado material é uma propriedade que indica o grau de facilidade deste permitir a percolação (deslocamento) da água, expresso numericamente pelo Coeficiente de permeabilidade (k).

Neste caso, o coeficiente de permeabilidade foi calculado pela equação:

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_0}{h_1}$$

onde: k : coeficiente de permeabilidade (m/s); a : área do tubo de carga (m²); L : altura do corpo-de-prova (m); A : área do corpo-de-prova (m²); t : tempo do ensaio (s); h_0 : altura inicial da água (m); h_1 : altura final da água (m).

O equipamento é composto por duas partes móveis. A primeira parte é composta por uma luva dupla de esgoto de 100mm com os seus respectivos anéis de vedação, a segunda parte completa é composta por: um tubo de PVC de 100mm com 30cm de comprimento, um TAP de PVC de esgoto de 100mm interligado com um adaptador soldável para caixa d'água de 25mm, uma bucha curta de redução de 25x20mm e uma ponteira de 20mm. O equipamento completo com suas devidas partes está apresentado na Figura 15.

O princípio de montagem do equipamento para a realização do ensaio consiste em encaixar o corpo-de-prova dentro da luva dupla de PVC de 100mm com seus respectivos anéis de vedação, sendo que no sentido do encaixe deve-se deixar uma folga de 0,50cm em função de vedação. Posteriormente, veda-se lateralmente, entre o corpo-de-prova e o PVC, com silicone, tanto na parte externa quanto na parte interna, para que o fluxo seja unidimensional. Logo após esta etapa, conecta-se a segunda parte do equipamento, descrita no parágrafo anterior, e veda-se com silicone essa ligação. A partir desse momento o equipamento está montado, e após 24 horas necessárias para a secagem do silicone, está pronto para a realização do ensaio, onde apenas é conectado a uma mangueira que liga o tubo de carga. O ensaio foi realizado a temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

Ressalta-se que várias marcas e tipos de silicone foram testados e analisados e a única marca que não apresentou problemas quanto à não vedação das laterais pela ligação entre o PVC e a mistura asfáltica (corpo-de-prova) foi o silicone da empresa Brascola Ltda. O silicone utilizado é a base de borracha de silicone, denominado de Brascoved Construção.



Figura 15: Equipamento de permeabilidade.

- a) Ponteira de 20mm;
- b) Bucha curta de redução de 25x20mm
- c) Adaptador soldável para caixa d'água de 25mm;
- d) TAP de PVC de esgoto de 100mm;
- e) Tubo de PVC de 100mm;
- f) Anel de vedação de 100mm;
- g) Corpo-de-prova;
- h) Luva dupla de esgoto de 100mm;
- i) Equipamento completo.

Na Figura 16 está apresentada toda a seqüência adotada para a realização do ensaio de permeabilidade realizado no Laboratório de engenharia Civil – LEC da UNIJUÍ.

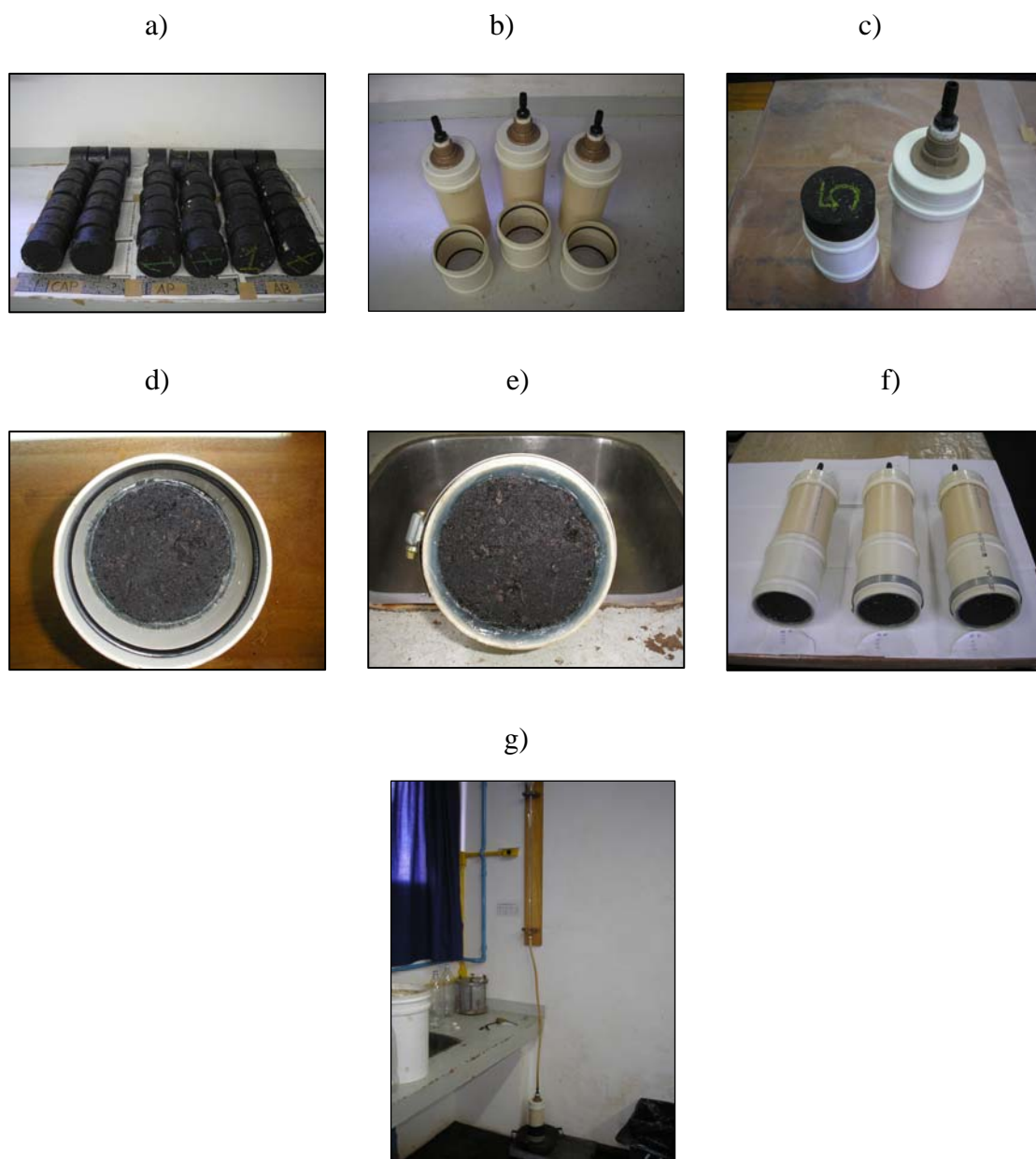


Figura 16: Seqüência para a realização do ensaio de condutividade hidráulica

- a) Corpos-de-prova ensaiados;
- b) Equipamentos para a realização do ensaio;
- c) Colocação do corpo-de-prova na luva de PVC de 100mm;
- d) Vedação interna nas laterais com silicone;
- e) Vedação externa nas laterais com silicone;
- f) Equipamento montado pronto para a realização do ensaio;
- g) Realização na coluna de carga;

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar comparativamente o comportamento e o desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas.

Primeiramente as misturas foram dosadas, segundo a metodologia Marshall e, posteriormente preparadas amostras para a realização de ensaios de verificação de propriedade e qualificação de desempenho, de modo a tentar abranger o maior número possível de mecanismos de degradação.

A organização do capítulo se deu em função das diversas variáveis de resposta avaliadas e analisadas: propriedades volumétricas das misturas, estabilidade e fluência, comportamento mecânico (resistência à tração e módulo de resiliência), propriedades de adesividade (Lottman e Cantabro) e propriedades hidráulicas.

4.1 DOSAGEM MARSHALL

A dosagem Marshall de misturas betuminosas foi desenvolvida seguindo as especificações e parâmetros do Método Marshall - DAER/RS – ES - P 16/98.

Os métodos empíricos de dosagem de misturas asfálticas em uso foram desenvolvidos tendo-se em mente certos modelos de degradação; os mais comuns são o trincamento por fadiga e a afundamento plástico em trilhas de roda. Outros modos de degradação, que podem variar em diferentes partes do mundo, incluem trincamento de origem térmica, envelhecimento e efeito deletério da água (HARVEY, 1992 *apud* SPECHT, 2004).

As variáveis de mistura, geralmente determinadas através de metodologia de dosagem, são dependentes da origem do agregado e de sua graduação, do ligante e do volume de vazios. Cada um desses componentes pode afetar, significativamente, as propriedades da mistura e seu desempenho em campo. A proposta da dosagem é alcançar um balanço nas propriedades da mistura para uma aplicação específica. O conhecimento das propriedades volumétricas é de fundamental importância, pois condicionam o desempenho de uma mistura em pista (SPECHT, 2004).

Estão apresentadas nos itens subsequentes as propriedades volumétricas, a estabilidade e fluência de concretos asfálticos produzidos com diferentes tipos de ligantes.

4.1.1 Propriedades volumétricas das misturas

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, as propriedades volumétricas de amostras em concreto asfáltico preparadas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha.

Tabela 6: Propriedades volumétricas das misturas com ligante CAP 50/70

<i>Variável</i>	<i>Teor de Ligante (%) – CAP 50/70</i>				
	<i>4,50</i>	<i>5,00</i>	<i>5,50</i>	<i>6,00</i>	<i>6,50</i>
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,7	5,1	3,6	2,1	1,7
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	63	72	80	88	91
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	18,10	17,84	17,78	17,67	18,48
<i>Densidade Máxima Teórica (KN/m³)</i>	27,4	27,1	26,9	26,6	26,4
<i>Densidade Aparente (KN/m³)</i>	25,5	25,7	25,9	26,1	25,9
<i>Passante #200 (%)</i>	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
<i>Relação #200/Betume</i>	1,55	1,40	1,27	1,17	1,08

Tabela 7: Propriedades volumétricas das misturas com ligante Asfalto-Polímero

<i>Variável</i>	<i>Teor de Ligante (%) – Asfalto-Polímero</i>				
	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00
<i>Volume de Vazios (%)</i>	5,0	3,9	2,4	1,7	1,6
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	72	78	86	91	92
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	17,77	17,99	17,89	18,45	19,51
<i>Densidade Máxima Teórica (KN/m³)</i>	27,1	26,9	26,6	26,4	26,2
<i>Densidade Aparente (KN/m³)</i>	25,8	25,8	26,0	26,0	25,8
<i>Passante #200 (%)</i>	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
<i>Relação #200/Betume</i>	1,40	1,27	1,17	1,08	1,00

Tabela 8: Propriedades volumétricas das misturas com ligante Asfalto-Borracha

<i>Variável</i>	<i>Teor de Ligante (%) – Asfalto-Borracha</i>				
	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,6	5,3	4,4	3,3	2,6
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	67	73	78	84	88
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	20,03	20,09	20,43	20,54	21,09
<i>Densidade Máxima Teórica (KN/m³)</i>	27,0	26,7	26,5	26,3	26,1
<i>Densidade Aparente (KN/m³)</i>	25,2	25,3	25,3	25,4	25,4
<i>Passante #200 (%)</i>	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
<i>Relação #200/Betume</i>	1,27	1,17	1,08	1,00	0,93

O Volume de Vazios (VV) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico; sempre são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a leve compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos (<3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao ATR (Afundamento em Trilha de Rodas) e muito altos (<8%) comprometem a durabilidade (AI, 1998 *apud* SPECHT, 2004).

O teor de ligante de projeto foi determinado em função do volume de vazios de 4%, desde que respeitando os outros critérios da especificação. O cálculo foi em função do ligante total presente na mistura (em massa) e não do teor efetivo de ligante, o qual considera a absorção de parte do ligante pelo agregado.

Na Figura 17 está apresentada a relação ente o volume de vazios e o teor de ligante utilizado nas misturas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha. Nota-se para todas as misturas uma diminuição de volume de vazios com o aumento do teor de ligante.

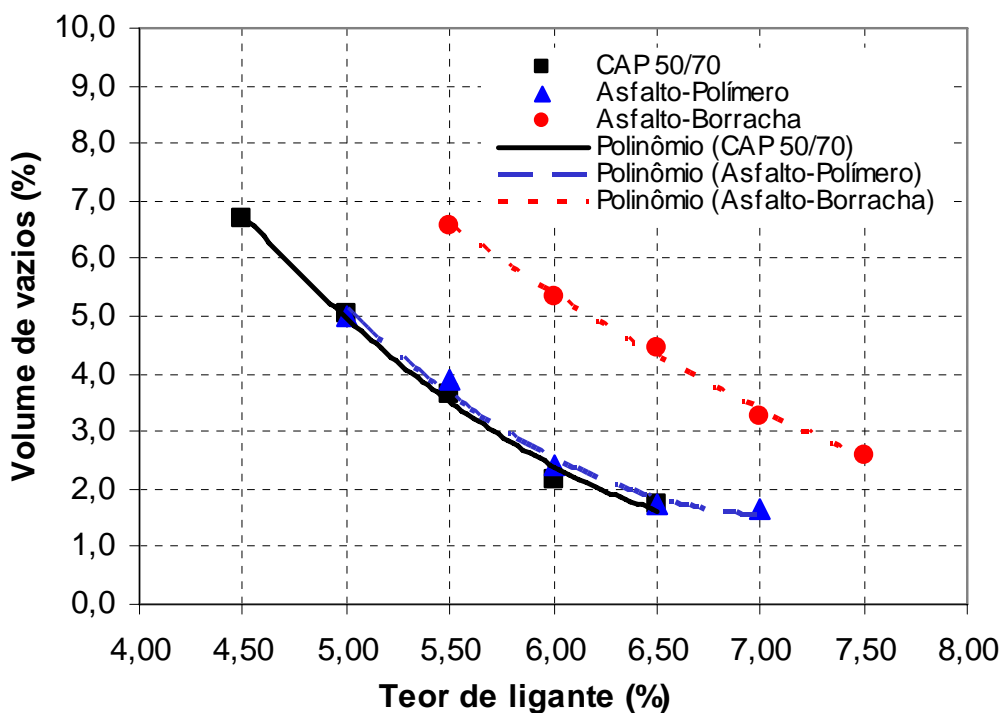


Figura 17: Volume de vazios *versus* teor de ligante

O teor de ligante de projeto aumenta praticamente 25,2% nas misturas com ligante Asfalto-Borracha, em comparação as misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero. Sendo que para o volume de vazios de 4%, as misturas com CAP 50/70 apresentaram teor de ligante de projeto de 5,32%, misturas com Asfalto Polímero 5,35% e misturas com ligante Asfalto-Borracha 6,66%.

Conforme Specht (2004) o VAM (Vazios do agregado mineral) representa o espaço intergranular do esqueleto mineral. Valores muito reduzidos de VAM levam a teores muito baixos de ligante o que pode comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas (filme de ligante delgado recobrindo os agregados). Valores excessivamente altos de VAM podem levar a perda de intertravamento do esqueleto mineral e redução da resistência ao cisalhamento.

Está apresentada na Figura 18 a percentagem de vazios do agregado mineral *versus* teor de ligante utilizado nas misturas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha.

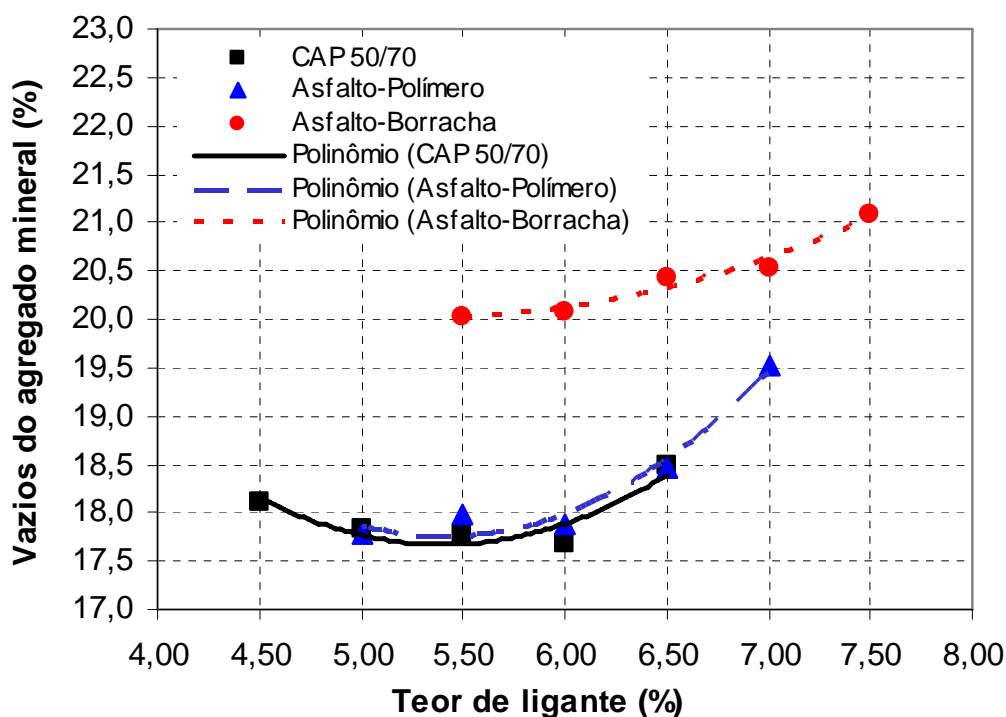


Figura 18: Vazios do agregado mineral *versus* teor de ligante

Ressalta-se que nas misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero para os teores de ligante de projeto de 5,32% e 5,35%, respectivamente, os valores de vazios do agregado mineral não se alteram significativamente, atingindo valores de 17,70% e 17,75%, respectivamente. Para o ligante Asfalto-Borracha esse valor aumenta em praticamente 15%, apresentando para teor de ligante de projeto de 6,66% um valor de 20,40% de vazios do agregado mineral. Valores maiores que 16% são recomendados na especificação.

O RBV (Relação betume/vazios) é a percentagem de vazios intergranulares preenchidos por asfalto e serve para garantir uma quantidade razoável de ligante preenchendo os vazios do agregado mineral; valores muito baixos comprometem a durabilidade da mistura e muito altos a estabilidade (SPECHEIT, 2004).

Verifica-se na Figura 19 a relação betume vazios *versus* teor de ligante, nota-se que para o teor de ligante de projeto, as misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero apresentaram valores idênticos de RBV, atingindo 78% e as misturas com ligante Asfalto-Borracha apresentaram para o teor de ligante de projeto 81% da relação betume vazios. Sendo que a especificação recomenda valores entre 75 e 82%.

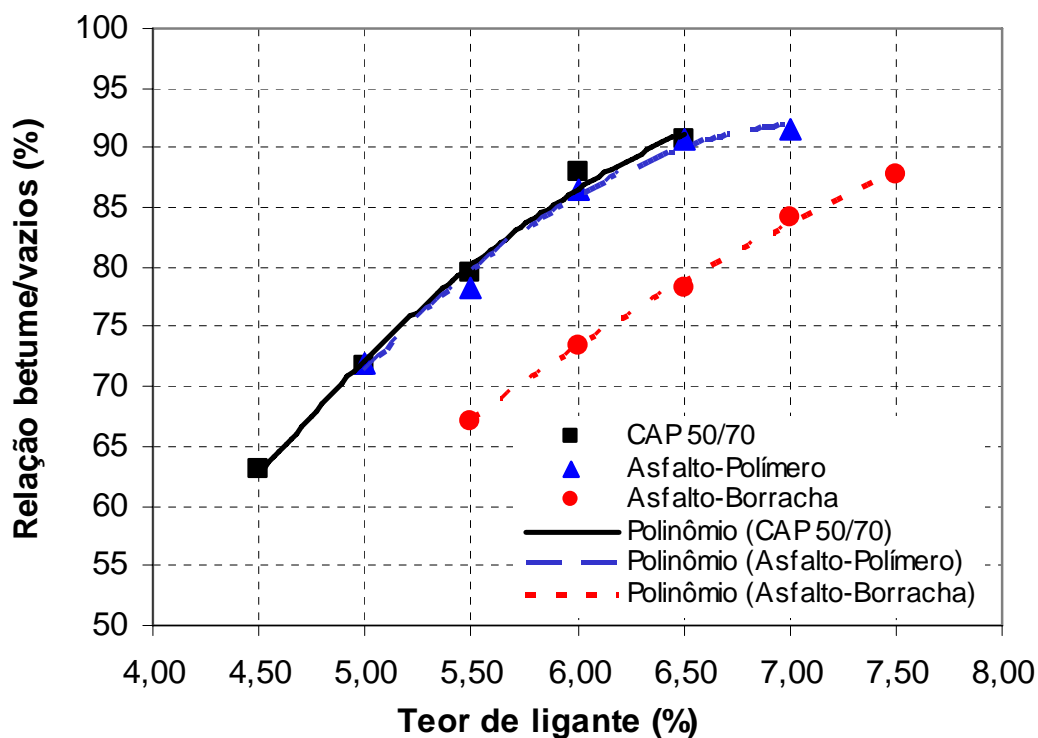


Figura 19: Relação betume vazios *versus* teor de ligante

Com relação à densidade aparente das misturas, observa-se que nas misturas com ligante Asfalto-Borracha há uma redução sensível desta variável em comparação as misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero, isto se deve ao aumento do teor de ligante. A relação fíler/betume, também, apresenta redução, nas misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero para as misturas com ligante Asfalto-Borracha; esta redução indica que há mais ligante livre na mistura para atuar na cicatrização de microfissuras, as mesmas conclusões foram alcançadas por Specht (2004).

4.1.2 Estabilidade e Fluência

Cada vez mais a Metodologia Marshall vem sendo substituída ou complementada com outros ensaios, entretanto devido à grande experiência acumulada e à não disponibilidade de equipamentos para a dosagem, seguindo técnicas mais modernas, no Brasil, ainda é prática sua utilização.

A maior crítica ao ensaio Marshall é o estado de tensões não definido, bem como sua inaplicabilidade direta ao dimensionamento de pavimentos. Na Europa é comum ao invés da utilização de valores de estabilidade e fluência a utilização de sua relação. O valor de estabilidade mede, de maneira indireta, a resistência ao cisalhamento, o intertravamento, atrito e coesão entre as partículas; já a fluência mede, indiretamente, a elasticidade da mistura.

As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam, respectivamente, os valores de estabilidade e fluência para as misturas preparadas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha.

Tabela 9: Valores de estabilidade e fluência para o ligante CAP 50/70

<i>Variável</i>	<i>Teor de Ligante (%) – CAP 50/70</i>				
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1051	1100	971	1180	1016
<i>Fluência (1/100'')</i>	9	10	11	10	17
<i>Relação Est/Fluência (kgf.m)</i>	63	69	68	74	108

Tabela 10: Valores de estabilidade e fluência para o ligante Asfalto-Polímero

<i>Variável</i>	<i>Teor de Ligante (%) – Asfalto-Polímero</i>				
	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1572	1540	1563	1319	1323
<i>Fluência (1/100'')</i>	13	14	12	25	22
<i>Relação Est/Fluência (kgf.m)</i>	127	136	124	213	189

Tabela 11: Valores de estabilidade e fluência para o ligante Asfalto-Borracha

Variável	Teor de Ligante (%) – Asfalto-Borracha				
	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50
Estabilidade (kgf)	1126	1124	1139	1074	1045
Fluência (1/100")	16	12	11	14	15
Relação Est/Fluência (kgf.m)	113	87	78	95	101

A Figura 20 apresenta os valores de estabilidade em relação ao teor de ligante para as misturas preparadas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha. Cada valor foi determinado a partir da média de 3 medidas (3 corpo-de-prova) e as equações de regressão obtidas para a linha de tendência observa-se quinze medidas, ou seja, a dosagem Marshall completa.

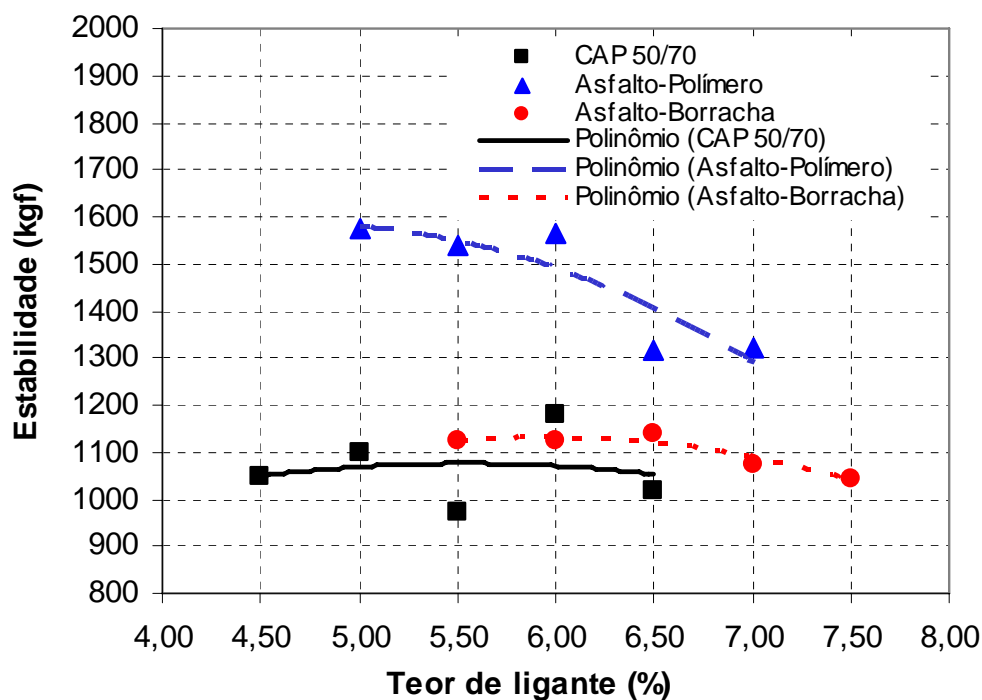


Figura 20: Relação entre o teor de ligante e estabilidade

Os valores de estabilidade apresentam uma leve redução com o aumento do teor de ligante nas misturas. Ressalta-se que a mistura com ligante Asfalto-Polímero apresentou, para o teor de ligante de projeto, um aumento de aproximadamente 40% na estabilidade quando comparado com as outras misturas. Nota-se que a mistura com

ligante CAP 50/70 e, posteriormente, a mistura com ligante Asfalto-Borracha, apresentaram valores de estabilidade, para o teor de ligante de projeto, respectivamente, 1080kgf e 1110kgf, não apresentando grandes alterações e a mistura com ligante Asfalto-Polímero apresentou 1560kgf de estabilidade. Ressalta-se que valores maiores que 800kgf se enquadram na especificação.

A Figura 21 apresenta os valores de fluência em relação ao teor de ligante para as misturas preparadas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha. Cada valor foi determinado a partir da média de 3 medidas (3 corpos-de-prova) e as equações de regressão obtidas para a linha de tendência. Observa-se quinze medidas, ou seja, a dosagem Marshall completa.

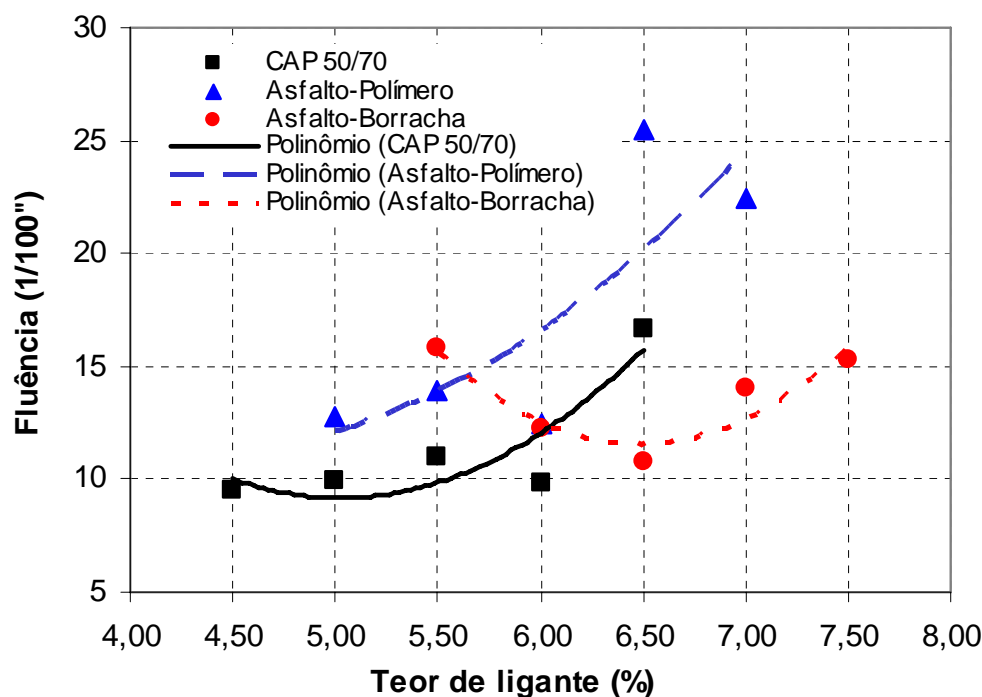


Figura 21: Relação entre o teor de ligante e fluência

Os valores de fluência para as misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero aumentaram com o acréscimo de teor de ligante e para a mistura com ligante Asfalto-Borracha não apresentou alterações significativas. Para o teor de ligante de projeto, as misturas com ligante CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha, apresentaram, respectivamente, valores de fluência, 11, 14 e 13 (1/100''). Valores entre 8 e 16 estão dentro da faixa da especificação.

Na Tabela 12 esta apresentada um resumo de todas as propriedades volumétricas e, também, os valores de estabilidade e fluência, para o teor de ligante de projeto para as misturas estudadas. No ANEXO B está apresentado todas as planilhas da dosagem Marshall para os diferentes tipos de ligantes.

Tabela 12: Tabela resumo das propriedades da dosagem Marshall

<i>Variável</i>	<i>Especif.</i>	<i>Tipo de Ligante</i>		
		<i>CAP 50/70</i>	<i>Asfalto-Polímero</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	5,32	5,35	6,66
<i>Volume de Vazios (%)</i>	<i>3 a 5</i>	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	<i>75 a 82</i>	78	78	81
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	<i>>16</i>	17,70	17,75	20,40
<i>Densidade Máxima Teórica (kN/m³)</i>	--	26,9	26,9	26,4
<i>Densidade Aparente (kN/m³)</i>	<i>97% (mín.)</i>	25,8	25,9	25,4
<i>Estabilidade (kgf)</i>	<i>>800</i>	1080	1560	1110
<i>Fluência (1/100'')</i>	<i>8 a 16</i>	11	14	13
<i>Relação Est/Fluência (kgf.m)</i>	--	64	130	82
<i>Relação Filler/Betume (adm)</i>	--	1,32	1,31	1,05

4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

4.2.1 Resistência à tração e Módulo de resiliência

O entendimento do pavimento, segundo a teoria das camadas elásticas e da mecânica dos pavimentos remete à necessidade de se conhecer as propriedades de deformabilidade e de resistência dos materiais. A deformabilidade que uma camada de revestimento apresenta, conjugada à sua espessura, irá determinar a distribuição de tensões nas camadas subjacentes (SPECHELT, 2004).

A evolução da mecânica dos pavimentos com o conhecimento do comportamento resiliente dos materiais obtidos através dos ensaios dinâmicos de

caracterização, assim como a análise de tensões e deformações, permitiram estabelecer procedimentos analíticos para o aperfeiçoamento do dimensionamento de pavimentos asfálticos (MEDINA e MOTTA, 2005).

Os principais defeitos que um pavimento apresenta são: trincamento por fadiga, trincamento térmico e afundamento de trilhas de roda, estes modos de degradação dos pavimentos estão relacionados com o comportamento mecânico, ou seja, resistência à tração e módulo de resiliência. Existem inúmeras maneiras de se determinar a deformabilidade elástica do concreto asfáltico desde correlações com as propriedades do ligante e da mistura, através de ensaios de laboratório ou através de retroanálise e medições indiretas *in situ*. Em se tratando de ensaio de laboratório, sem dúvida no Brasil, a metodologia mais empregada é o ensaio de tração por compressão diametral.

A Tabela 13 apresenta os valores de resistência à tração, módulo de resiliência e suas relações a 25°C das amostras preparadas com os diferentes tipos de ligantes, CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha.

Tabela 13: Valores de Rt e Mr das misturas em relação ao tipo de ligante

<i>Propriedade</i>		<i>Tipo de Ligante</i>		
		<i>CAP 50/70</i>	<i>Asfalto-Polímero</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>medida 1</i>	1,32	1,64	1,07
	<i>medida 2</i>	1,29	1,72	0,79
	<i>medida 3</i>	1,36	1,64	0,86
	<i>medida 4</i>	1,34	1,66	0,87
	<i>média</i>	1,33	1,67	0,90
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	<i>medida 1</i>	6868	6388	3563
	<i>medida 2</i>	8299	5844	3963
	<i>medida 3</i>	8378	6558	3599
	<i>média</i>	7848	6263	3708
<i>Relação Mr/Rt</i>		5912	3762	4132
<i>Relação Rt/Mr x 10⁻³</i>		0,23	0,44	0,22

A Figura 22 apresenta os valores de resistência à tração em relação ao tipo de ligante utilizado. Verifica-se que os menores valores de resistência à tração estão nas amostras preparadas com ligante Asfalto-Borracha, atingindo um valor médio de 0,90MPa. Comparando-se com as amostras preparadas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero, há um acréscimo de aproximadamente 50% e 85%, respectivamente, nesses valores, sendo que as amostras que utilizaram CAP 50/70 apresentaram um valor médio de resistência à tração de 1,33MPa e as amostras com ligante Asfalto-Polímero foram as que apresentaram maiores valores de resistência à tração, em média, 1,67MPa.

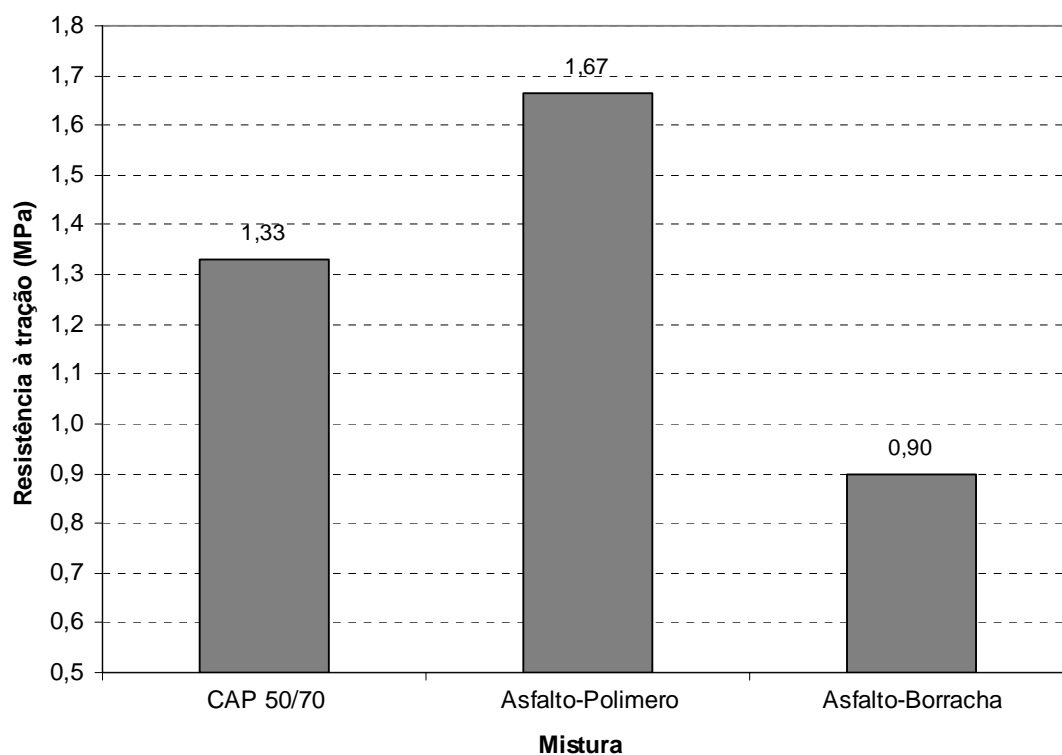


Figura 22: Valores de resistência à tração em comparação ao tipo de ligante

A Figura 23 mostra os valores de módulo de resiliência em comparação ao ligante utilizado. Nota-se que os maiores valores de módulo são atingidos pela mistura que utiliza ligante convencional (CAP 50/70), com média nas amostras preparadas de 7848MPa, as amostras com ligante Asfalto-Polímero apresentaram valores médios de 6263MPa e, finalmente as amostras com ligante Asfalto-Borracha apresentaram os menores valores de módulo de resiliência, em média, 3708MPa.

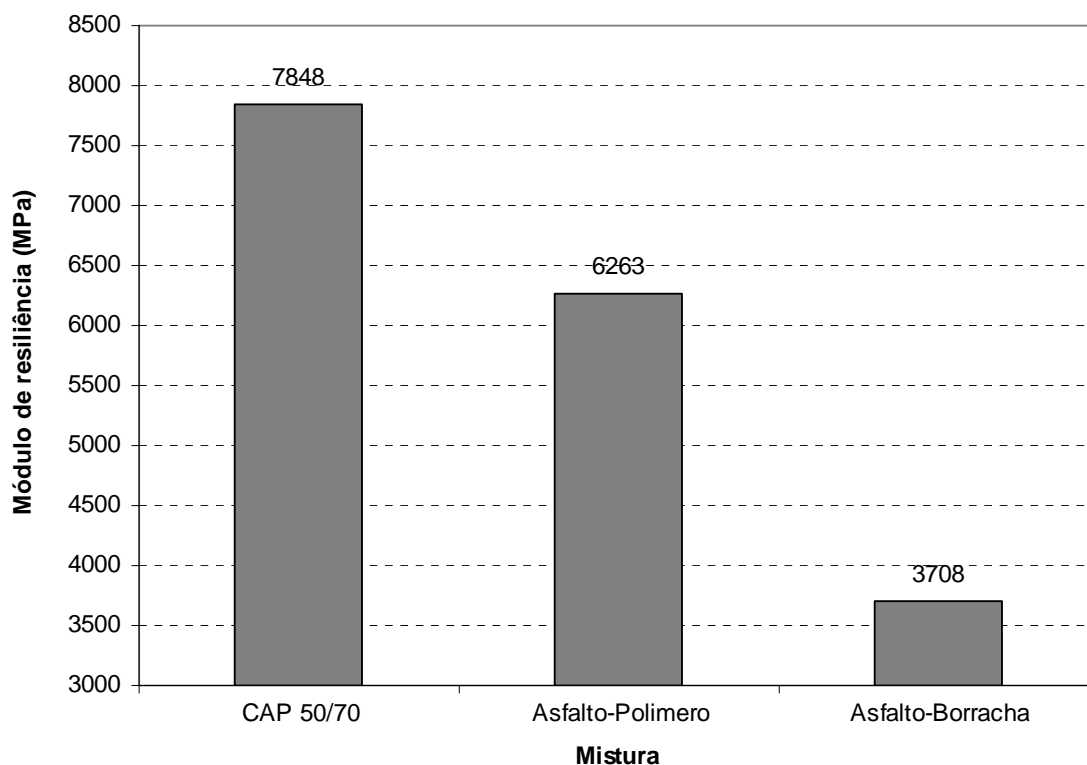


Figura 23: Valores de módulo de resiliência em relação ao tipo de ligante

Specht *et al.* (2006) concluíram que a análise dos valores de módulo de resiliência é bastante complexa, visto que, dependendo da estrutura de pavimento que este material estará inserido, valores maiores ou menores serão tolerados. É necessária sim, uma compatibilização de rigidez e resistência entre as camadas que constituem o sistema. Pode-se afirmar que concretos asfálticos com altos valores de módulo de resiliência, e baixa resistência, são menos compatíveis com bases granulares ou camadas severamente trincadas.

Ressalta-se, também, que os valores de resistência à tração das misturas com Asfalto-Borracha são menores que os das misturas com CAP 50/70, contrariando os resultados apresentados por Specht e Ceratti (2004).

4.3 PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE

4.3.1 Resistência ao efeito deletério da água

Os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade) são apresentados na Tabela 14. Estão tabelados todos os valores de resistência à tração das amostras sem e com condicionamento (R_{t1} e R_{t2} , respectivamente) e suas respectivas médias, bem como, os valores de resistência retida à tração (RR_t). No ANEXO C está apresentado as planilhas das propriedades de adesividade para os diferentes ligantes.

Tabela 14: Resultados dos ensaios da Metodologia Lottman Modificada

<i>Propriedade</i>		<i>Tipo de Ligante</i>		
		<i>CAP 50/70</i>	<i>Asfalto-Polímero</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>
<i>R_{t1} (sem cond.) MPa</i>	<i>medida 1</i>	0,70	1,19	0,61
	<i>medida 2</i>	0,89	1,09	0,52
	<i>medida 3</i>	0,64	1,05	0,64
	<i>média</i>	0,75	1,11	0,59
<i>R_{t2} (com cond.) MPa</i>	<i>medida 1</i>	0,65	0,99	0,46
	<i>medida 2</i>	0,62	0,86	0,53
	<i>medida 3</i>	0,57	0,91	0,50
	<i>média</i>	0,61	0,92	0,50
<i>RR_t (100.R_{t2}/R_{t1}) (%)</i>		82	83	85

A Figura 24 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova, sem e com condicionamento. Nota-se que nesta condição de volume de vazios ($VV = 7 \pm 1\%$), para R_{t1} e R_{t2} , a mistura preparada com ligante Asfalto-Polímero apresenta os melhores valores, seguindo da mistura preparada com ligante CAP 50/70 e, posteriormente, a mistura que utilizou o ligante Asfalto-Borracha.

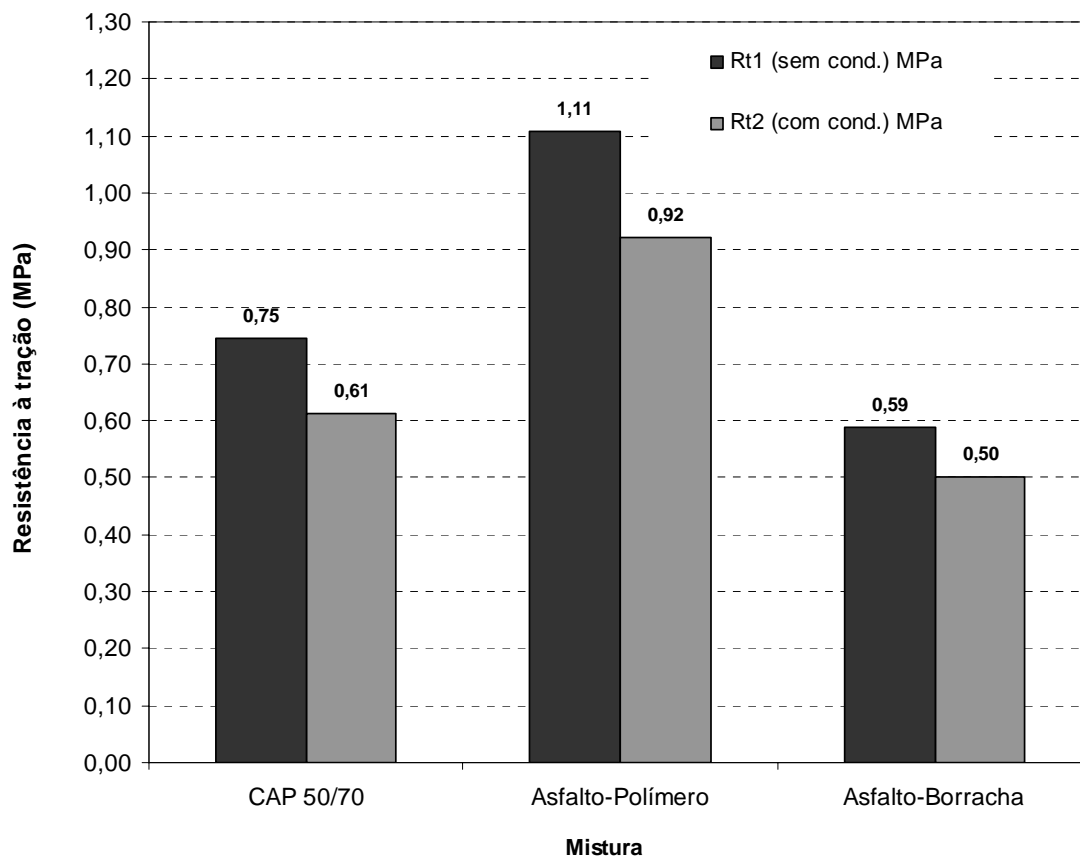


Figura 24: Valores de resistência à tração em relação ao tipo de ligante

Em relação à RRt (resistência retida à tração), a Figura 25 apresenta tais valores. Como valor de referência para a aceitação de uma mistura segundo este método, a metodologia SUPERPAVE™ preconiza valores acima de 80%. Nota-se que todas as misturas, preparadas com os três diferentes tipos de ligantes, se enquadram na especificação. Não houve alterações significativas nos valores de RRt em função do tipo de ligante utilizado.

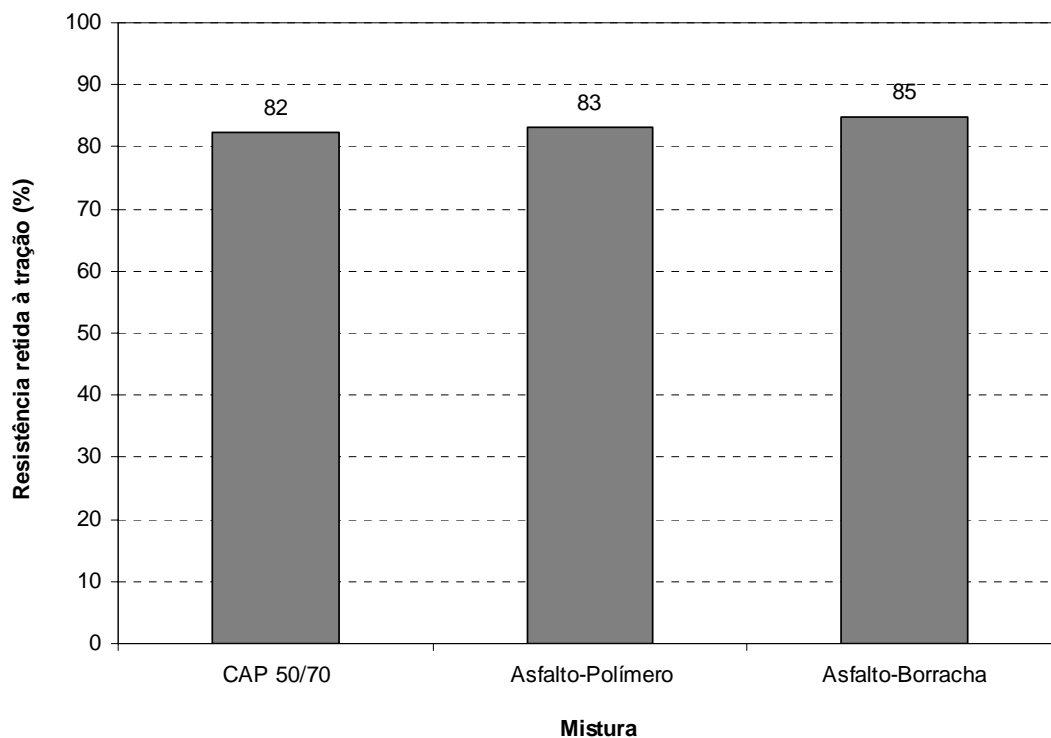


Figura 25: Valores de resistência retida à tração em relação ao tipo de ligante

4.3.2 Resistência ao desgaste

A Tabela 15 traz os resultados obtidos no ensaio de perda de massa por desgaste.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de perda de massa cantabro

<i>Mistura</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>				
	<i>leitura 1</i>	<i>leitura 2</i>	<i>leitura 3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>CAP 50/70</i>	9,96	7,29	7,23	8,16	1,56
<i>Asfalto-Polímero</i>	2,91	4,30	3,88	3,70	0,71
<i>Asfalto-Borracha</i>	1,17	1,17	0,97	1,10	0,12

Na Figura 26 estão plotados as médias dos resultados obtidos para cada uma das misturas ensaiadas. Para uma análise conjunta da variabilidade dos ensaios, foram plotados, também, os valores de média menos desvio padrão e média mais desvio padrão. O ensaio foi realizado à temperatura de 25°C.

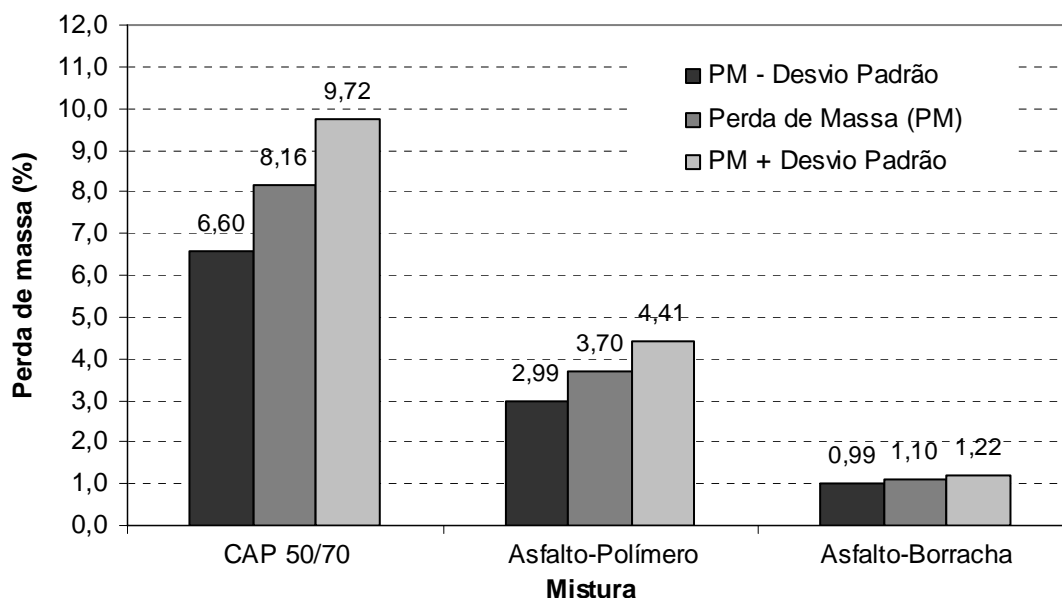


Figura 26: Valores de perda de massa em relação ao tipo de ligante

Percebe-se que a mistura que utilizou ligante convencional CAP 50/70 apresentou a maior percentagem de perda de massa em comparação com as outras misturas. Percebe-se também que a menor percentagem de perda de massa ocorreu na mistura que utilizou ligante Asfalto-Borracha, tal fato pode ser explicado pela maior quantidade de ligante presente na mistura.

4.4 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

Ao analisar-se que um dos objetivos específicos dessa pesquisa é o de avaliar as propriedades hidráulicas de misturas asfálticas e, como não se tem conhecimento de nenhum tipo de classificação de coeficientes de permeabilidade para esse tipo de material, usou-se a classificação de solos conforme o grau de permeabilidade, segundo Lambe e Witman (1974), apresentado no Quadro 6.

Quadro 6: Classificação dos solos segundo seu grau de permeabilidade

<i>Grau de permeabilidade</i>	<i>Valor de k (m/s)</i>
Elevada	Superior a 10^{-3}
Média	10^{-3} a 10^{-5}
Baixa	10^{-5} a 10^{-7}
Muito baixa	10^{-7} a 10^{-9}
Praticamente impermeável	Menor de 10^{-9}

As propriedades hidráulicas das misturas em concreto asfáltico preparadas com os diferentes tipos de ligante estão apresentadas nas Tabelas 16, 17 e 18. A permeabilidade das amostras foi determinada através de um permeômetro de carga variável. A temperatura da realização do ensaio foi de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. No ANEXO D estão apresentadas todas as planilhas das propriedades hidráulicas.

O grau de permeabilidade para as amostras com os diferentes tipos de ligantes, segundo classificação de Lambe e Witman (1974), foi considerada baixa, muito baixa e praticamente impermeável.

Tabela 16: Permeabilidade das amostras com ligante CAP 50/70

<i>Propriedade</i>		<i>Teor de Ligante (%) – CAP 50/70</i>				
		<i>4,5</i>	<i>5,0</i>	<i>5,5</i>	<i>6,0</i>	<i>6,5</i>
<i>Volume de Vazios (%)</i>		<i>6,7</i>	<i>5,1</i>	<i>3,6</i>	<i>2,1</i>	<i>1,7</i>
<i>Permeabilidade (m/s)</i>	<i>Medida 1</i>	$6,65 \cdot 10^{-5}$	$6,56 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$2,41 \cdot 10^{-10}$	$2,40 \cdot 10^{-10}$
	<i>Medida 2</i>	$6,04 \cdot 10^{-5}$	$6,66 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-10}$	$5,90 \cdot 10^{-6}$
	<i>Medida 3</i>	$6,99 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	$3,65 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$
	<i>média</i>	$6,56 \cdot 10^{-5}$	$8,14 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$7,17 \cdot 10^{-6}$

Tabela 17: Permeabilidade das amostras com ligante Asfalto-Polímero

<i>Propriedade</i>		<i>Teor de Ligante (%) – Asfalto-Polímero</i>				
		<i>5,0</i>	<i>5,5</i>	<i>6,0</i>	<i>6,5</i>	<i>7,0</i>
<i>Volume de Vazios (%)</i>		<i>5,0</i>	<i>3,9</i>	<i>2,4</i>	<i>1,7</i>	<i>1,6</i>
<i>Permeabilidade (m/s)</i>	<i>Medida 1</i>	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$6,23 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$2,94 \cdot 10^{-10}$
	<i>Medida 2</i>	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-10}$	$2,91 \cdot 10^{-10}$
	<i>Medida 3</i>	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$9,02 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-10}$	$6,12 \cdot 10^{-10}$	$5,58 \cdot 10^{-6}$
	<i>média</i>	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$6,42 \cdot 10^{-7}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$

Tabela 18: Permeabilidade das amostras com ligante Asfalto-Borracha

Propriedade		Teor de Ligante (%) – Asfalto-Borracha				
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Volume de Vazios (%)		6,6	5,3	4,4	3,3	2,6
Permeabilidade (m/s)	Medida 1	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$7,74 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$6,60 \cdot 10^{-6}$
	Medida 2	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	5,99E-07	$8,42 \cdot 10^{-6}$
	Medida 3	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$4,58 \cdot 10^{-7}$
	média	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$9,41 \cdot 10^{-6}$	$4,80 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$5,16 \cdot 10^{-6}$

Na Figura 27, destaca-se a permeabilidade das amostras em relação ao volume de vazios. Nota-se, que com a diminuição dos percentuais de volume de vazios há uma diminuição da permeabilidade nas amostras. Destaca-se que a mistura com ligante Asfalto-Borracha apresentou melhores condições de impermeabilidade em comparação com as amostras com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero, analisando-se em relação ao volume de vazios de 4%, pois esse percentual determina o teor de ligante de projeto.

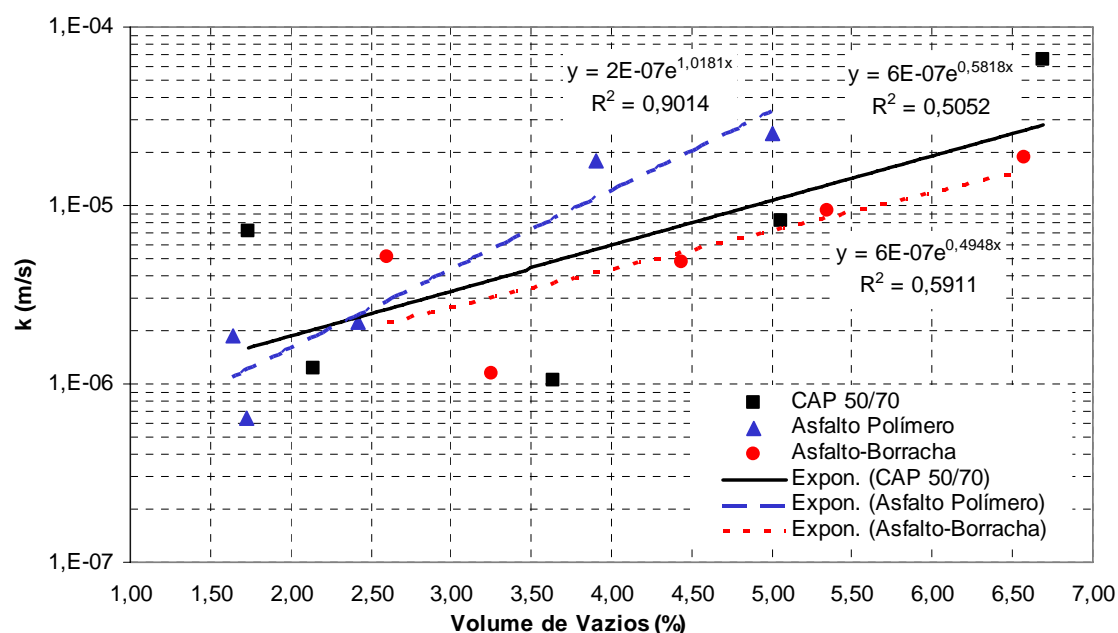


Figura 27: Permeabilidade em relação ao volume de vazios

Nota-se, também, uma dispersão maior nos dados de permeabilidade em relação ao volume de vazios inferior a 3,5%. Destaca-se que diversas variáveis influenciam o desempenho hidráulico de concretos asfálticos, por exemplo, forma dos agregados, compactação, estrutura mineral do corpo-de-prova, entre outras, visto que nem sempre é possível este controle na produção das amostras.

A Figura 28 apresenta os valores de permeabilidade em relação ao teor de ligante das amostras. Nota-se que, com o aumento do teor de ligante há uma diminuição nos valores de permeabilidade.

Para o teor de ligante de projeto os valores dos coeficientes para as respectivas misturas estudadas foram: para a mistura com ligante CAP 50/70, o coeficiente de permeabilidade k é igual a 4.10^{-5} , para a mistura Asfalto-Polímero é igual a $8,7.10^{-4}$ e para a mistura Asfalto-Borracha, esse valor é igual a 6.10^{-5} . Segundo classificação de Lambe e Witman (1974), as misturas CAP 50/70 e Asfalto-Borracha apresentam grau de permeabilidade baixa e a mistura Asfalto-Polímero apresentou grau de permeabilidade média.

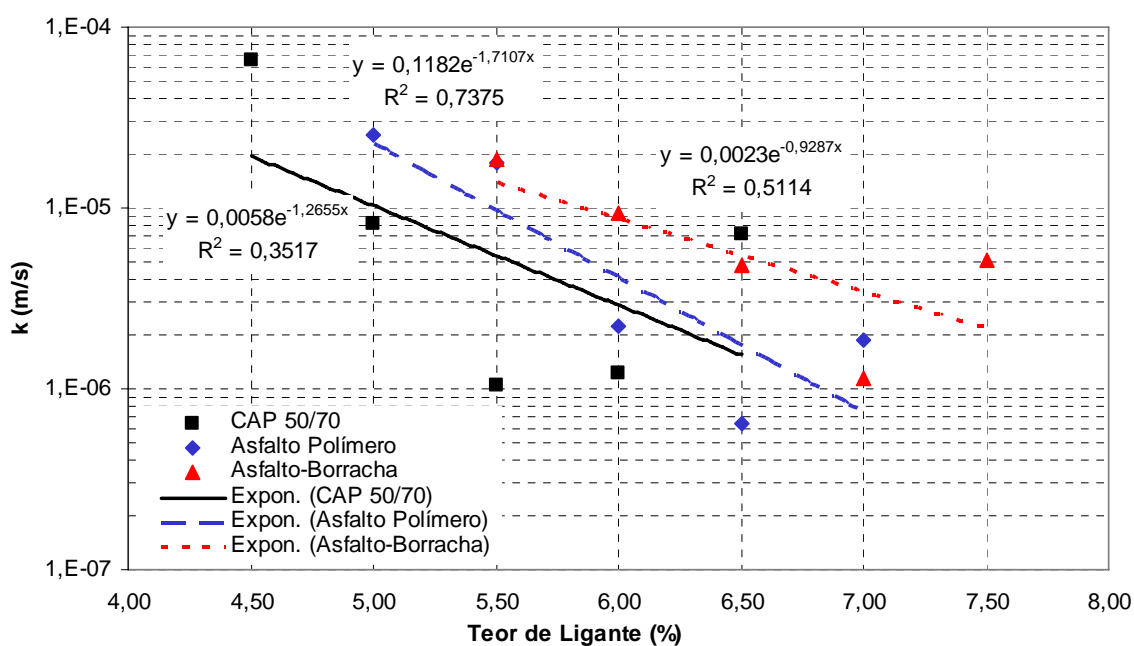


Figura 28: Permeabilidade em relação ao teor de ligante

Ressalta-se que as amostras com ligante CAP 50/70 apresentaram valores de permeabilidade inferiores em comparação aos ligantes modificados. Acredita-se que seja devido ao fato de esse tipo de ligante ser menos viscoso, ou seja, possuir um poder molhante maior.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões desta pesquisa, que teve como objetivo geral avaliar e analisar comparativamente o comportamento de misturas asfálticas preparadas com diferentes tipos de ligantes.

Também são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros, visando à continuidade da pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados e do conjunto de dados analisados foi possível chegar as seguintes conclusões:

➤ Quanto à influência do tipo de ligante nos parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas:

a) O teor de ligante de projeto aumenta 25,2% na mistura com ligante Asfalto-Borracha, em comparação as misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero, que utilizam a mesma quantidade de ligante. Isso se deve ao fato de o Asfalto-Borracha ser mais viscoso, o que acarreta um consumo maior de ligante para que haja o recobrimento de todos os agregados;

b) Ressalta-se que a percentagem de vazios do agregado mineral (VAM) para as misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero praticamente não se alteram, sendo que a mistura com ligante Asfalto-Borracha apresenta valores 15% superiores;

c) A relação betume/vazios apresentou valores coerentes com os especificados, misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero mostraram valores iguais de RBV

e a mistura com Asfalto-Borracha apresentou para o teor de ligante de projeto um valor próximo ao limite da faixa. Valores muito altos comprometem a estabilidade da mistura;

d) Os valores de estabilidade da mistura com ligante Asfalto-Polímero apresentaram, para o teor de ligante de projeto, um aumento de aproximadamente 40% quando comparado com as outras misturas, resultando em misturas mais resistentes que as feitas com CAP 50/70 e o Asfalto-Borracha;

e) Os valores de fluência não apresentaram grandes alterações em relação ao tipo de ligante, possuem valores próximos e estão dentro da faixa da especificação.

➤ Quanto à influência do tipo de ligante no comportamento mecânico das misturas asfálticas:

a) Quanto à resistência à tração, comparando-se os valores resultantes da mistura com ligante Asfalto-Borracha, que apresentou o pior desempenho, as misturas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Polímero, respectivamente, apresentam valores 50% e 85% superiores;

b) Quanto ao módulo de resiliência, conclui-se que a mistura com ligante CAP 50/70 apresentou os maiores valores de módulo, atingindo em média 7848MPa. A mistura com ligante Asfalto-Polímero atingiu valores, em média, 6263MPa e a mistura que utilizou ligante Asfalto-Borracha apresentou os menores valores de módulo, em média, 3708MPa.

Essa análise de resistência à tração e módulo de resiliência é bastante complexa, visto que, dependendo da estrutura onde a camada de revestimento está assente, valores menores ou maiores são tolerados. Com isso, é necessária uma compatibilização de rigidez e resistência de toda a estrutura.

➤ Quanto à influência do tipo de ligante nas propriedades de adesividade das misturas asfálticas:

a) Quanto aos valores referentes ao dano induzido por umidade, destaca-se que, a resistência à tração das amostras com condicionamento é menor que as amostras sem condicionamento e valores maiores são apresentados pela mistura com Asfalto-Polímero. Destacando a resistência retida à tração, todas as misturas se enquadram na especificação, não havendo alterações na RRt em função do tipo de ligante;

b) Quanto aos valores resultantes da resistência ao desgaste, a mistura com ligante Asfalto-Borracha apresentou a menor perda de massa. O pior desempenho foi verificado pela mistura com ligante convencional CAP 50/70.

➤ Quanto ao desenvolvimento do permeâmetro e às propriedades hidráulicas das misturas asfálticas:

a) A experiência no desenvolvimento e operação do permeâmetro foi muito exitosa e motivadora, visto que, primeiramente, tentou-se adaptar um modelo usado por Homem (2005), utilizado para a medição do coeficiente de permeabilidade de misturas porosas, todavia não houve sucesso. Com isso, foi desenvolvido um novo equipamento, que possibilitou cargas hidráulicas maiores e vedação nas laterais com silicone;

b) Destaca-se que com o aumento do teor de ligante ou diminuição do volume de vazios, a permeabilidade das amostras diminui. Ressalta-se que o grau de permeabilidade, para o teor de ligante de projeto, segundo classificação de Lambe e Witman (1974), foi considerado médio para as amostras preparadas com ligante Asfalto-Polímero e baixa para as amostras preparadas com ligante CAP 50/70 e Asfalto-Borracha.

A engenharia rodoviária tem demandado a cada vez mais materiais de alta qualidade, tais como os ligantes modificados. Com este trabalho observou-se a influência destes ligantes nas propriedades do concreto asfáltico. Todavia, sua aplicação em campo dependerá de situações específicas de cada projeto, respeitando as potencialidades e restrições de cada ligante.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de melhorar e dar continuidade a este estudo, sugerem-se os seguintes temas:

- a) Estudar misturas asfálticas com a incorporação de borracha reciclada de pneus (via seca);
- b) Estudar qual a influência de ligantes produzidos com diferentes tipos e teores de fíleres nos parâmetros de dosagem Marshall e nas propriedades hidráulicas e de adesividade;
- c) Estudar as propriedades hidráulicas de misturas asfálticas produzidas com a substituição do agregado graúdo por seixo rolado;
- d) Avaliar o desempenho de misturas asfálticas envelhecidas;
- e) Estudar a permeabilidade em misturas asfálticas porosas;
- f) Estudar a permeabilidade de misturas extraídas de pista.

REFERÊNCIAS

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types.** Lexington, Manual Series N°2 (MS-2), 6 ed. 1995.141p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for preparation of bituminous using Marshall apparatus.** D 6926-04. ASTM Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for Marshall stability and flow of bituminous mixtures.** D 6927-05. In: ASTM Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Penetration of Bituminous Materials.** D 5. In: ASTM. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.** AASHTO T 283-89. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de Engenharia.** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Betuminosos – Determinação da Penetração:** ABNT/NBR 6576. Rio de Janeiro, 1998.

BECK, Jacson Johnson Kern. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas convencionais e modificadas preparadas com diferentes teores de fílers.** (Trabalho de Conclusão Curso) Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2005.

BERTOLO, Sandra Aparecida Margarido. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. São Carlos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 197p.

BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA MÁRIO OSÓRIO MARQUES (org). **Trabalhos acadêmicos: apresentação, referências e citações**. Ijuí: Ed. UNIJUI, 2004. 31p. (Série Educação, nº.85).

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988, v. 1, 234p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT: www.cnt.org.br. Site consultado, em dezembro 2006.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Concreto asfáltico**. DAER/RS – ES – P 16/98. Porto Alegre, 1998, 21p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da Abrasão “Los Angeles” de Agregados**: DAER/RS – EL 103/01. Porto Alegre, 2001, 5p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (2001) **Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo**: DAER/RS – EL 105/01. Porto Alegre, 5p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (2001) **Determinação da massa específica aparente em estado solto**: DAER/RS – EL 107/01. Porto Alegre, 3p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (2001) **Determinação do índice de lamelaridade**: DAER/RS – EL 108/01. Porto Alegre, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Manual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 320p. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas à quente – ensaio Marshall**. DNER – ME 043/95. Rio de Janeiro, 1995, 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas – determinação do módulo de resiliência**. DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Especificações para cimentos asfálticos de petróleo (CAP) 1-79 e 1-80**. Rio de Janeiro, 13 de julho de 2005.

FABBRI, Glauco Tulio Pessa; FURLAN, Ana Paula; TAIRA, Claudio. **Efeito do asfalto modificado com polímero nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION / U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Superpave mixture design guide**. Washington, 2001, 18p.

HARVEY, John. T. **Mix design compaction procedures for hot-mix asphalt concrete and rubber-modified asphalt concrete mixtures**. Berkeley, 1992. Dissertation (Doctor of Philosophy) – University of California at Berkeley. 450p.

HIRSCH, Fábio; ROZEK, Thiago de Matos; SPECHT, Luciano Pivoto. **Importância da temperatura da água na pesagem hidrostática de concretos asfálticos e seu impacto nos parâmetros de dosagem volumétrica**. XVIII Salão de Iniciação Científica, XV Feira de Iniciação Científica – UFRGS, 2006, Porto Alegre.

HOMEM, Tiago da Rosa. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras.** Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 111p.

ISHAI, I.; CRAUS J. **Effect of some aggregate and filler characteristics on behavior and durability of asphalt paving mixtures.** Transportation Research Board, n. 1530. Washington. P. 75-85. 1996.

KANDHAL, Prithvi. S. **Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solution.** NCAT – National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.92-6. 1992.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Mecânica de Suelos.** México. Editorial Limusa S.A. 1974, 582p.

LEITE, Leni Figueredo Matias; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Efeito do fíler nas características do ligante asfáltico.** Natal. Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes 2002. p.1007-1017. 2002.

LIBERATORI, Leandro; CONSTANINO, Rômulo; TUCHUMANTEL, Osvaldo; MARIN, Leandro. **Mistura asfáltica com asfalto modificado por polímero Stylink PG 76-22 aplicada na SP -300. Avaliação do desempenho após um ano de operação.** 17º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2 ed. 2005. 380p.

MORILHA JUNIOR, Armando. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Florianópolis, 2004. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 165p.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Princípios de Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada, IBP – Instituto brasileiro do Petróleo, 41p. 2000.

MOTTA, Laura Maria Goretti da; LEITE, Leni Figueredo Matias. **Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas**. Gramado. Engenharia de Tráfego e Transportes 2000: avanços para uma era de mudanças. p.1007-1017. 2000.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. São Carlos, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 251p.

OGURTSOVA, João; BIRMAN, Saul; COELHO, Vladimir. **Concreto Asfáltico**. DER Paraná, Curitiba, 2 ed. 1999, 151p.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco)**. Fortaleza, 2004. Dissertação de mestrado, Programa de mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 166p.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. 477p.

PINTO, Salomão.. **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem**. Departamento de Engenharia de Fortificação, IME – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 81p. 1998.

ROZEK, Thiago de Matos; HIRSCH, Fábio; SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação do desgaste de misturas em concreto asfáltico considerando o teor de finos, índice de lamelaridade e tipo de ligante**. XVIII Salão de Iniciação Científica, XV Feira de Iniciação Científica e I Salão UFRGS Jovem - UFRGS, 2006, Porto Alegre.

SANTANA, HUMBERTO. **Considerações sobre os nebulosos conceitos e definição de fíler em misturas asfálticas.** 29^o Reunião anual de pavimentação. Cuiabá, p.574-604. 1995.

SENÇO, Wlastermir de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume 1, Ed. Pini, São Paulo, 1997.

SENÇO, Wlastermir de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume 2, Ed. Pini, São Paulo, 2001.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus,** Porto Alegre, 2004. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Notas de aula da disciplina Rodovias II.** Curso de Engenharia Civil. UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, site consultado: www2.unijui.tche.br/~specht. Ijuí, 2006.

SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Avaliação laboratorial do emprego do ligante asfalto-borracha em concreto asfáltico.** 17^o Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2004.

SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; PALUDO, Ilda. **Estudo laboratorial da adesividade e do desgaste de misturas asfálticas com borracha.** In: XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 2004.

SPECHT, Luciano Pivoto; HIRSCH, Fábio; ROZEK, Thiago de Matos; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Contribuição ao estudo de misturas asfálticas considerando o tipo de ligante e o teor de fíler.** 18^o Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2006a.

SPECHT, Luciano Pivoto; HIRSCH, Fábio; ROZEK, Thiago de Matos; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Estudo laboratorial da adesividade de misturas asfálticas preparadas com ligante convencional e modificado considerando o teor de fíler e a forma do agregado.** 37^o Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, 2006b.

TAYBALI, Akhtarhusein A.; Malpass, Glen Alan.; KHOSLA, N. Paul. **Effect of mineral filler type and amount on design and performance of asphalt concrete mixtures**. Transportation Research Board, n. 1609. Washington. p.36-43. 1998.

VASCONCELOS, Kamila Lima. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. Fortaleza, 2004. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 149p.

WESSELING, Diego Henrique. **Avaliação Laboratorial do Comportamento de Misturas em Concreto Asfáltico**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2002.

WESSELING, Diego Henrique. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. Dissertação de mestrado – Universidade federal do Rio Grande do Sul, 143p. Porto Alegre, 2005.

WESSELING, Diego Henrique; SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Estudo Laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de fillers**. 34^o Reunião anual de pavimentação. São Paulo, p.307-321. 2003.

ANEXO A

Caracterização dos ligantes asfálticos



PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.
PETROBRAS

Número: 1935-06 G

CERTIFICADO DE ENSAIO

CÓPIA

Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70	Código: 71K
Local de amostragem: TQ 28544110	Laboratório: REVAP/OT/DP
Data/hora da amostragem: 20/07/06 17:00	Endereço: Rod Pres Dutra Km 143 Jd Diamante
Data/hora do Recebimento: 20/07/06 17:30	Tel.: (012) 3928-6642 Fax: (012) 3928-6408

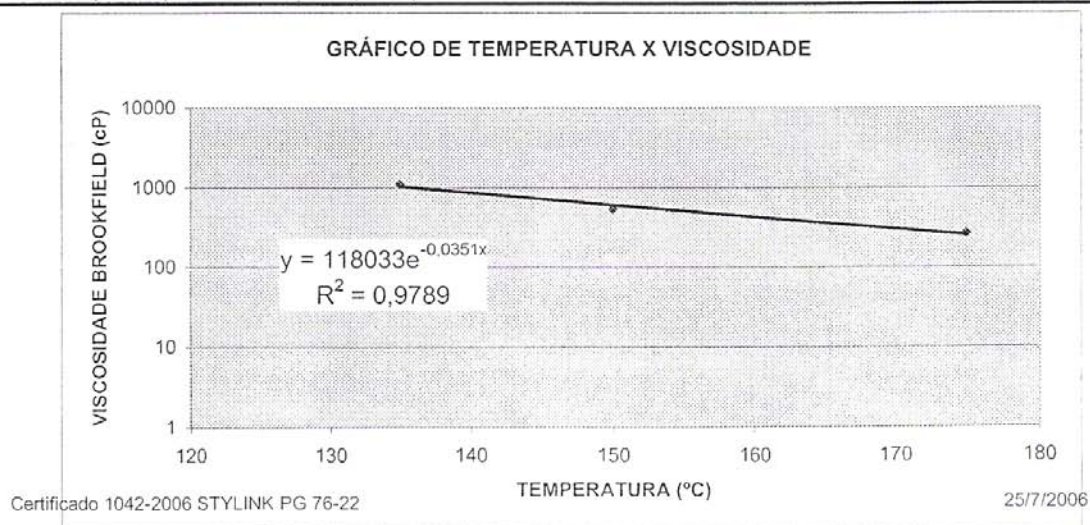
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	51	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min.	48,6	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min.	317	cp
VISCOSIDADE BROKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min.	164	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	69	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min.	63	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max.	5,0	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min.	>150	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	0,5 max.	0,250	%
DUTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min.	>150	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min.	100,0	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min.	296	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,5	
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GC	D 70	Anotar (1)	1,009	
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	

Notas:

- (1) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.
(2) NESP = Nao espuma

Data de Emissão : 21/07/06 01:55	Página 1 de 1	Original assinado por:
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente e com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.		Responsável Rosa Hama Nakai CRQ:04306001

CARACTERÍSTICAS		ESPECIF. EM-396/99		MÉTODO DE ENSAIO	ENCONTRADAS	
		Mínimo	Máximo		Carregamento	Na Obra
VISCOSIDADE BROOKFIELD, A 135°C, 20 RPM, cP		850	3000	NBR-15184	1115	
VISCOSIDADE BROOKFIELD, A 150°C, 50 RPM, cP		-	2000	NBR-15184	543	
VISCOSIDADE BROOKFIELD, A 175°C, 100 RPM, cP		-	1000	NBR-15184	266	
TEMPERATURA DE MISTURA, °C		INDICATIVO		CÁLCULO	167 a 173	
TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO, °C		INDICATIVO		CÁLCULO	159 a 165	
PONTO DE FULGOR, °C		235	-	NBR-11341	>235	
ESTAB. A ESTOCAGEM, DIF. PONTO AMOL., °C		-	5	NBR-15166	1	
RECUPERAÇÃO ELÁSTICA, 20 cm, 25°C, %		85	-	NBR-15086	93	
ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA (IST)		2	5	CÁLCULO	3,1	
PENETRAÇÃO, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm		45	80	NBR-6576	70	
PONTO DE AMOLECIMENTO, °C		60	85	NBR-6560	66	
TESTES NO RESÍDUO DO RTFOT						
VARIÇÃO DE MASSA, MÁX., %		-1	1	NBR-15235	0,432	
VARIÇÃO DO PA, °C, MÁX.		-6	6	NBR-6560	5	
PERCENTAGEM DE PENETRAÇÃO ORIGINAL, MÍN.		50	-	NBR-6576	59	
PERCENTAGEM DO RECUPERAÇÃO EL. ORIGINAL, MÍN.		80	-	NBR-15086	92	
<p>PREZADO CLIENTE: FAVOR ASSINAR E DEVOLVER A 2ª VIA DESTA COM OS RESULTADOS DA ANÁLISE ENCONTRADOS QUANDO DA CHEGADA DO PRODUTO NA OBRA. CASO ENCONTRE ALGUMA DIVERGÊNCIA, OBSÉQUIO CONTACTAR NOSSO DEPARTAMENTO TÉCNICO.</p> <p style="text-align: right;"><i>Rômulo Santos Constantino</i></p> <p style="text-align: right;">Rômulo Santos Constantino Resp. Técnico - CRQ - 4ª Região - 03312827</p>						
<p>FAB. Ribeirão Preto (0xx16) 2101-5876</p>						
<p>O MATERIAL ATENDE AS ESPECIFICAÇÕES.</p>						
(LOCAL)		(DATA)		(ASSINATURA)		



ASFALTO BORRACHA – ECOFLEX B

Cuidados de Aplicação do Produto ECOFLEX

O ligante Ecoflex não deverá ser aquecido acima de 180° C, o objetivo é minimizar qualquer aumento de consistência que possa ocorrer. O aquecimento deverá ser efetuado até obter-se a consistência adequada à sua aplicação, sendo a temperatura ideal de usinagem equivalente a 175° C. O produto está sendo entregue a uma temperatura entre 165 e 175° C e deverá ser descarregado em tanques isentos de lastro de outros produtos. Recomenda-se durante o armazenamento até 5 dias que a temperatura seja mantida em torno de 165° C e que haja agitação e circulação do produto por duas horas a cada período de 12 horas (não deve ser feita agitação e circulação do produto a temperaturas inferiores a 165° C), já em períodos superiores a 5 dias é recomendável estocar o produto a temperaturas mais baixas em torno de 100 a 120° C. Já para períodos mais prolongados, superior a 10 dias, o ideal é estocar a temperatura ambiente.

A temperatura durante o armazenamento deverá ser uniforme e a distribuição de calor deverá ocorrer de forma homogênea através da utilização da bomba de recirculação e dos agitadores mecânicos. A forma de aquecimento dos tanques de armazenamento deve ser por serpentinas de óleo térmico.

O produto não deve ser aplicado em dias de chuva, em superfícies molhadas e em temperaturas ambiente inferiores a 10° C.

CARACTERÍSTICAS do PRODUTO.

DATA	04/08/04
PRODUTO	ECOFLEX B
CLIENTE	-
OBRA	-
CERTIFICADO NÚMERO	064/04
FROTA / PLACAS	-

ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1 mm	DNER-ME 003/94	25 a 75	54
Ponto de Amolecimento, °C	DNER-ME 247/94	50 a 70	60
Recuperação Elástica, %	DNER-ME 382/99	40 a 70	63
Ponto de Fulgor, °C	DNER-ME 148/94	235 (mínimo)	265
Densidade Relativa, 25°C/25°C	DNER-ME 16/64	Anotar	1.033
Viscosidade Brookfield à 175°C, cP	ASTM D 2669-87	1000 - 2000	1.650

Após a determinação do teor de asfalto na mistura betuminosa com Rotarex ou Reffluxo ou Soxhlet, o resultado encontrado deverá ser multiplicado por um fator (1,07).

Fator correspondente a presença de partes insolúveis de pó de pneu nos filtros do equipamento.



EDSON ANDRADE
TÉCNICO QUÍMICO

LUIZ ROMEU CASTLER
RESPONSÁVEL FABRICAÇÃO

ANEXO B

Planilhas da dosagem Marshall

**Dosagem Marshall das amostras preparadas com
ligante CAP 50/70**

		Rua do Comércio 3000 Bairro Universitário fone: 0xx 55 3332 0505		 <small>Laboratório de Engenharia Civil</small>				
Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall								
1 - IDENTIFICAÇÃO								
Projeto:	TCC Fábio Hirsch							
Operador:	Fábio - Thiago - Luís							
Ligante:	CAP 50/70		Lamelaridade Mistura = 21,8%					
Data:	19/09/06		Teor de Finos = 7%					
Mistura:	CBUQ - Faixa B DAER ou IVB do Instituto do Asfalto							
Obs:	Tamanho máximo agregado 3/4"							
2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL								
AGREGADOS								
	% retida	D _{Real} :	D _{ap} :	D _{efetiva} :	Absorção	CAP	MISTURA MINERAL	
						Densidade	D _{real} :	3,010
3/4" - n° 10	61,5	3,033	2,924	2,979	1,228	1,007	D _{ap} :	2,943
pas n° 10	38,5	2,973					D _{efet} :	2,976
3 - ESPECIFICAÇÃO DNER								
Parâmetro		CAPA			BINDER			
Perc. Vazios (%)		3 a 5			4 a 6			
RBV (%)		75 a 82			65 a 72			
Estabilidade(kgf)		>500			>500			
Fluência (1/100")		8 a 18			8 a 18			
VAM (DAER) para 3/4"		>14			14			
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO								
Mistura: Temperatura - 149 -155°C								
Compactação: 75 golpes por face - Temperatura - 137 -142°C								
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS								
Propriedade	Teor de Betume (%)							
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5			
Volume de Vazios (%)	6,7	5,1	3,6	2,1	1,7			
Relação Betume Vazios (%)	63	72	80	88	91			
Vazios do Agregado Mineral (%)	18,10	17,84	17,78	17,67	18,48			
Densidade Máxima Teórica (g/cm ³)	2,74	2,71	2,69	2,66	2,64			
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,55	2,57	2,59	2,61	2,59			
Estabilidade (1/100 in)	1051	1100	971	1180	1016			
Fluência (kgf)	9	10	11	10	17			
Resistência à Tração (MPa)	0	0	0	0	0			
Módulo de Resiliência (MPa)	0	0	0	0	0			
Relação Mr/Rt	0	0	0	0	0			
Relação Est/Fluência (kgf.m)	63	69	68	74	108			

Planilha da dosagem Marshall
Propriedades volumétricas, Estabilidade e Fluência
Amostras preparadas com ligante CAP 50/70

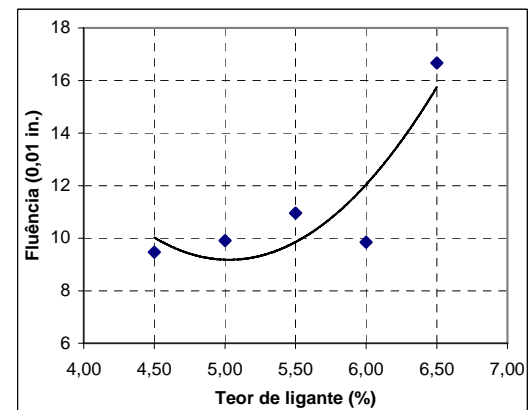
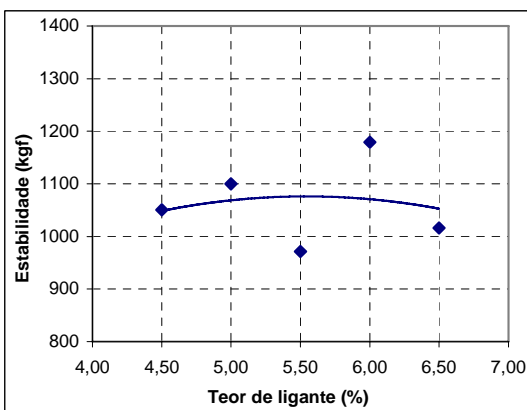
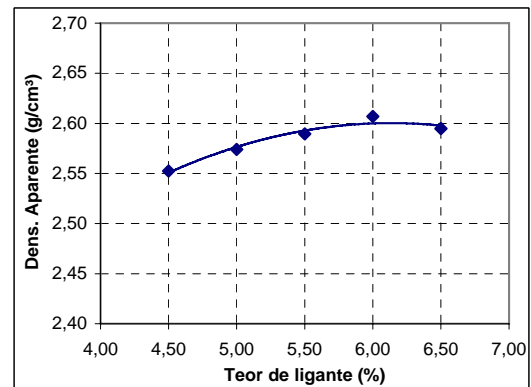
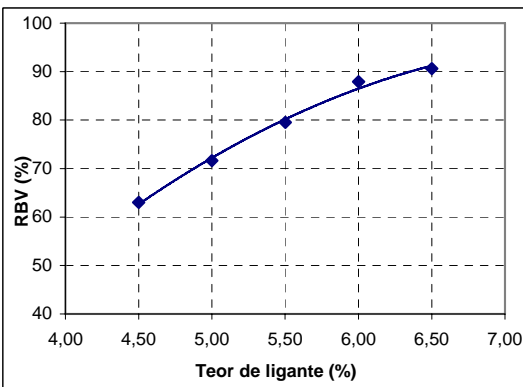
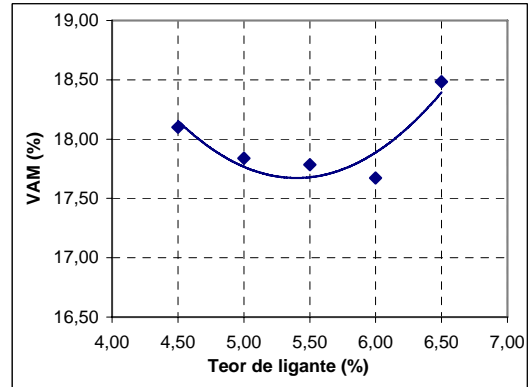
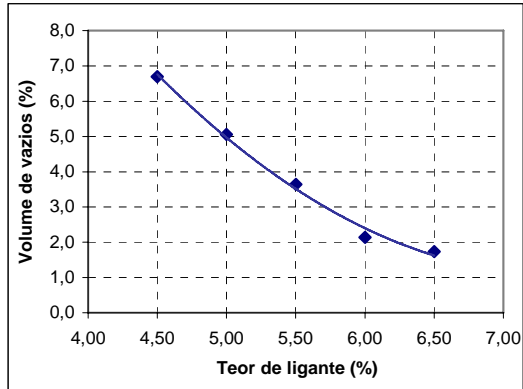
Geometria				Pesos		Densidades			Vazios			Fluência			Estabilidade			
% CAP	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	ar	agregado	RBV	L Inicial	Lfinal	Fluência	Leit	Carga	FC	Est.
4,5	1	6,22	10,20	1246,08	758,16	487,9	2,554	2,736	6,6	18,1	63,2	250	429	7,0	617	1020	1,02	1044
4,5	2	6,16	10,20	1243,49	756,93	486,6	2,556	2,736	6,6	18,0	63,5	236	571	13,2	594	982	1,04	1019
4,5	3	6,17	10,20	1245,47	756,66	488,8	2,548	2,736	6,9	18,2	62,4	216	424	8,2	637	1053	1,03	1089
média		6,18	10,20	1245,01	757,25	487,76	2,55	2,74	6,69	18,10	63,02	234	475	9,48	616,0	1019	1,03	1051
5,0	4	6,11	10,20	1251,99	765,11	486,9	2,571	2,711	5,2	17,9	71,2	207	367	6,3	637	1053	1,05	1105
5,0	5	6,12	10,20	1254,29	766,64	487,7	2,572	2,711	5,1	17,9	71,3	237	388	5,9	646	1068	1,05	1117
5,0	6	6,14	10,20	1252,14	766,59	485,6	2,579	2,711	4,9	17,7	72,4	268	712	17,5	626	1035	1,04	1078
média		6,12	10,20	1252,81	766,11	486,69	2,57	2,71	5,06	17,84	71,65	237	489	9,91	636,3	1052	1,05	1100
5,5	7	6,10	10,20	1253,35	770,04	483,3	2,593	2,687	3,5	17,7	80,2	240	557	12,5	569	941	1,05	988
5,5	8	6,07	10,20	1256,12	772,28	483,8	2,596	2,687	3,4	17,6	80,7	282	542	10,2	501	829	1,06	877
5,5	9	6,07	10,20	1253,00	767,15	485,9	2,579	2,687	4,0	18,1	77,7	298	556	10,2	599	991	1,06	1049
média		6,08	10,20	1254,16	769,82	484,33	2,59	2,69	3,64	17,78	79,54	273	552	10,96	556,3	920	1,06	971
6,0	10	6,08	10,20	1254,90	772,13	482,8	2,599	2,664	2,4	17,9	86,5	247	448	7,9	653	1080	1,06	1140
6,0	11	6,01	10,20	1249,33	770,96	478,4	2,612	2,664	2,0	17,5	88,8	213	471	10,2	662	1095	1,08	1177
6,0	12	6,06	10,20	1256,71	775,08	481,6	2,609	2,664	2,0	17,6	88,4	269	560	11,5	696	1151	1,06	1222
média		6,05	10,20	1253,65	772,72	480,92	2,61	2,66	2,14	17,67	87,89	243	493	9,84	670,3	1109	1,06	1180
6,5	13	6,08	10,20	1257,78	773,98	483,8	2,600	2,641	1,5	18,3	91,5	244	619	14,8	566	936	1,06	989
6,5	14	6,10	10,20	1259,76	774,03	485,7	2,594	2,641	1,8	18,5	90,4	272	784	20,2	575	951	1,05	999
6,5	15	6,12	10,20	1253,47	769,77	483,7	2,591	2,641	1,9	18,6	90,0	273	656	15,1	612	1012	1,05	1060
média		6,10	10,20	1257,00	772,59	484,41	2,59	2,64	1,73	18,48	90,62	263	686	16,67	584,3	966	1,05	1016



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



6 - GRAFICOS METODOLOGIA MARSHALL - CAP 50/70



**Dosagem Marshall das amostras preparadas com
ligante Asfalto-Polímero**



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall

1 - IDENTIFICAÇÃO

Projeto:	TCC Fábio Hirsch		
Operador:	Fábio - Thiago - Luís		
Ligante:	Asfalto-Polímero	Lamelaridade Mistura = 21,8%	
Data:	19/09/06	Teor de Finos = 7%	
Mistura:	CBUQ - Faixa B DAER ou IVB do Instituto do Asfalto		
Obs:	Tamanho máximo agregado 3/4"		

2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL

	AGREGADOS					CAP	MISTURA MINERAL	
	% retida	D _{Real} :	D _{ap} :	D _{efetiva} :	Absorção	Densidade	D _{real} :	3,010
3/4" - n° 10	61,5	3,033	2,924	2,979	1,228	1,009	D _{ap} :	2,943
pas n° 10	38,5	2,973					D _{efet} :	2,976

3 - ESPECIFICAÇÃO DNER

Parâmetro	CAPA	BINDER
Perc. Vazios (%)	3 a 5	4 a 6
RBV (%)	75 a 82	65 a 72
Estabilidade(kgf)	>500	>500
Fluência (1/100")	8 a 18	8 a 18
VAM (DAER) para 3/4"	>14	14

4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO

Mistura:	Temperatura - 164 -173°C
Compactação:	75 golpes por face - Temperatura - 152 -157°C

5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

Propriedade	Teor de Betume (%)				
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Volume de Vazios (%)	5,0	3,9	2,4	1,7	1,6
Relação Betume Vazios (%)	72	78	86	91	92
Vazios do Agregado Mineral (%)	17,77	17,99	17,89	18,45	19,51
Densidade Máxima Teórica (g/cm ³)	2,71	2,69	2,66	2,64	2,62
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,58	2,58	2,60	2,60	2,58
Estabilidade (1/100 in)	1572	1540	1563	1319	1323
Fluência (kgf)	13	14	12	25	22
Resistência à Tração (MPa)	0	0	0	0	0
Módulo de Resiliência (MPa)	0	0	0	0	0
Relação Mr/Rt	0	0	0	0	0
Relação Est/Fluência (kgf.m)	127	136	124	213	189

Planilha da dosagem Marshall
Propriedades volumétricas, Estabilidade e Fluência
Amostras preparadas com ligante Asfalto-Polímero

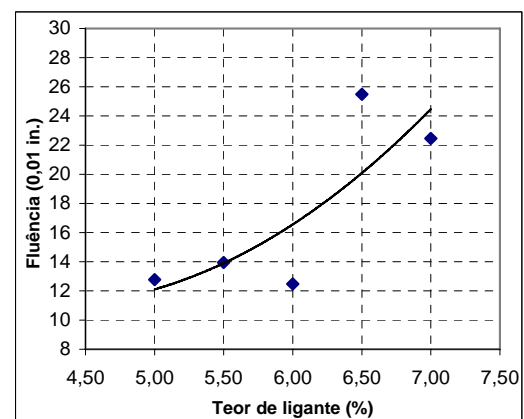
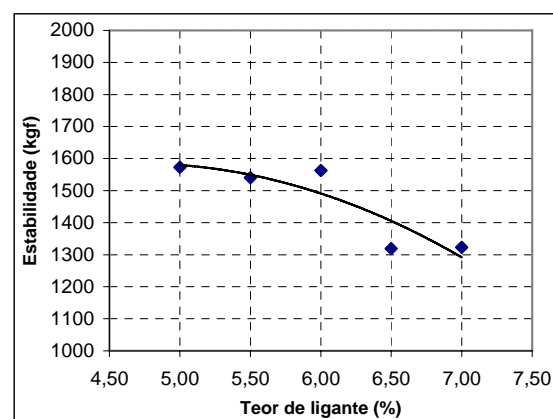
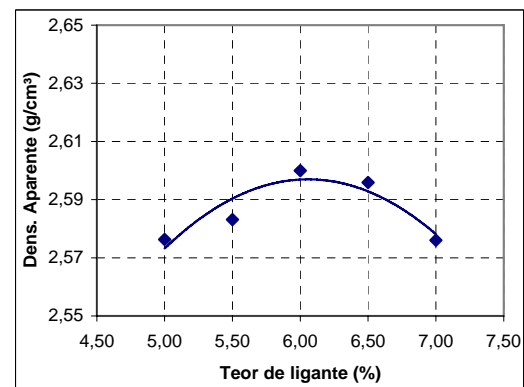
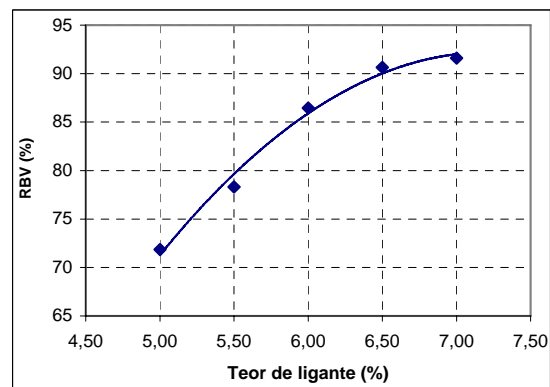
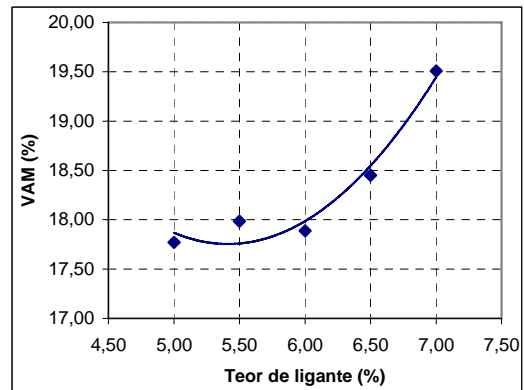
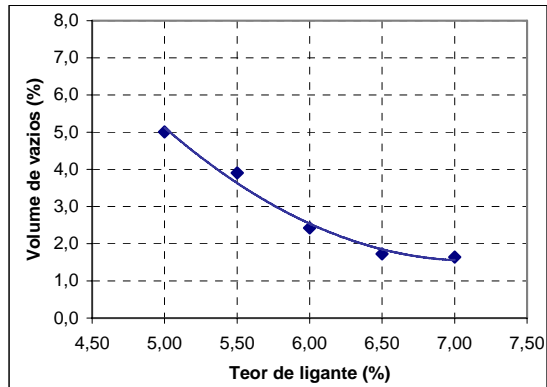
Geometria				Pesos		Densidades			Vazios			Fluência			Estabilidade			
% CAP	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	ar	agregado	RBV	L Inicial	Lfinal	Fluência	Leit	Carga	FC	Est.
5,0	1	6,04	10,20	1241,76	759,07	482,7	2,573	2,712	5,1	17,9	71,3	224	463	9,4	935	1546	1,07	1647
5,0	2	6,15	10,20	1246,49	763,07	483,4	2,578	2,712	4,9	17,7	72,2	211	509	11,7	848	1402	1,04	1456
5,0	3	6,09	10,20	1246,83	763,14	483,7	2,578	2,712	4,9	17,7	72,1	245	681	17,2	927	1533	1,05	1614
média		6,10	10,20	1245,03	761,76	483,27	2,58	2,71	5,00	17,77	71,84	227	551	12,77	903,3	1494	1,05	1572
5,5	4	6,08	10,20	1251,94	767,87	484,1	2,586	2,688	3,8	17,9	78,8	246	678	17,0	957	1583	1,06	1671
5,5	5	6,09	10,20	1253,24	768,57	484,7	2,586	2,688	3,8	17,9	78,7	236	492	10,1	864	1429	1,05	1504
5,5	6	6,09	10,20	1250,31	765,20	485,1	2,577	2,688	4,1	18,2	77,3	232	606	14,7	831	1374	1,05	1446
média		6,09	10,20	1251,83	767,21	484,62	2,58	2,69	3,90	17,99	78,29	238	592	13,94	884,0	1462	1,05	1540
6,0	7	6,09	10,20	1254,26	770,32	483,9	2,592	2,665	2,7	18,1	84,9	260	656	15,6	849	1404	1,05	1480
6,0	8	6,07	10,20	1257,07	774,27	482,8	2,604	2,665	2,3	17,8	87,1	332	682	13,8	929	1536	1,06	1628
6,0	9	6,02	10,20	1250,64	770,45	480,2	2,604	2,665	2,3	17,7	87,3	269	474	8,1	892	1475	1,07	1580
média		6,06	10,20	1253,99	771,68	482,31	2,60	2,66	2,43	17,89	86,44	287	604	12,48	890,0	1472	1,06	1563
6,5	10	6,03	10,20	1253,58	770,44	483,1	2,595	2,642	1,8	18,5	90,4	265	1039	30,5	790	1306	1,07	1397
6,5	11	6,10	10,20	1255,72	771,78	483,9	2,595	2,642	1,8	18,5	90,4	211	872	26,0	731	1209	1,05	1269
6,5	12	6,03	10,20	1252,48	770,45	482,0	2,598	2,642	1,6	18,4	91,1	211	718	20,0	730	1207	1,07	1290
média		6,05	10,20	1253,93	770,89	483,04	2,60	2,64	1,73	18,45	90,63	229	876	25,49	750,3	1241	1,06	1319
7,0	13	6,08	10,20	1257,92	770,18	487,7	2,579	2,619	1,5	19,4	92,2	240	901	26,0	742	1227	1,06	1296
7,0	14	6,13	10,20	1260,33	771,48	488,9	2,578	2,619	1,6	19,4	92,0	246	562	12,4	719	1189	1,04	1241
7,0	15	6,14	10,20	1249,87	763,71	486,2	2,571	2,619	1,8	19,7	90,7	271	1005	28,9	832	1376	1,04	1432
média		6,12	10,20	1256,04	768,46	487,58	2,58	2,62	1,64	19,51	91,61	252	823	22,45	764,3	1264	1,05	1323





Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



6 - GRAFICOS METODOLOGIA MARSHALL - Asfalto-Polímero



**Dosagem Marshall das amostras preparadas com
ligante Asfalto-Borracha**

		Rua do Comércio 3000 Bairro Universitário fone: 0xx 55 3332 0505		 Laboratório de Engenharia Civil				
Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall								
1 - IDENTIFICAÇÃO								
Projeto:	TCC Fábio Hirsch							
Operador:	Fábio - Thiago - Luís							
Ligante:	Asfalto-Borracha			Lamelaridade Mistura = 21,8%				
Data:	19/09/06			Teor de Finos = 7%				
Mistura:	CBUQ - Faixa B DAER ou IVB do Instituto do Asfalto							
Obs:	Tamanho máximo agregado 3/4"							
2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL								
AGREGADOS								
	% retida	D _{Real} :	D _{ap} :	D _{efetiva} :	Absorção	CAP	MISTURA MINERAL	
						Densidade	D _{real} :	3,010
3/4" - n° 10	61,5	3,033	2,924	2,979	1,228	1,030	D _{ap} :	2,943
pas n° 10	38,5	2,973					D _{efet} :	2,976
3 - ESPECIFICAÇÃO DNER								
Parâmetro		CAPA			BINDER			
Perc. Vazios (%)		3 a 5			4 a 6			
RBV (%)		75 a 82			65 a 72			
Estabilidade(kgf)		>500			>500			
Fluência (1/100")		8 a 18			8 a 18			
VAM (DAER) para 3/4"		>14			14			
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO								
Mistura: Temperatura - 170 -180°C								
Compactação: 75 golpes por face - Temperatura - 160 -170°C								
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS								
Propriedade	Teor de Betume (%)							
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5			
Volume de Vazios (%)	6,6	5,3	4,4	3,3	2,6			
Relação Betume Vazios (%)	67	73	78	84	88			
Vazios do Agregado Mineral (%)	20,03	20,09	20,43	20,54	21,09			
Densidade Máxima Teórica (g/cm ³)	2,70	2,67	2,65	2,63	2,61			
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,52	2,53	2,53	2,54	2,54			
Estabilidade (1/100 in)	1126	1124	1139	1074	1045			
Fluência (kgf)	16	12	11	14	15			
Resistência à Tração (MPa)	0	0	0	0	0			
Módulo de Resiliência (MPa)	0	0	0	0	0			
Relação Mr/Rt	0	0	0	0	0			
Relação Est/Fluência (kgf.m)	113	87	78	95	101			

Planilha da dosagem Marshall
Propriedades volumétricas, Estabilidade e Fluência
Amostras preparadas com ligante Asfalto-Borracha

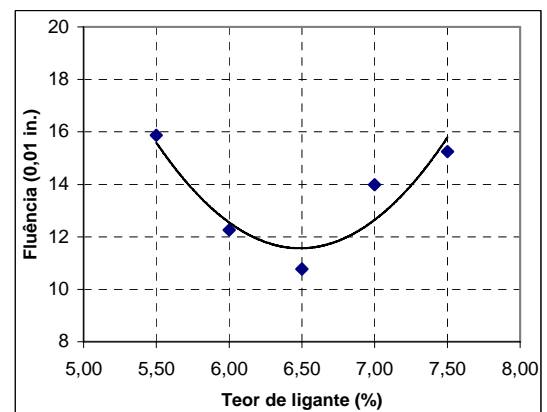
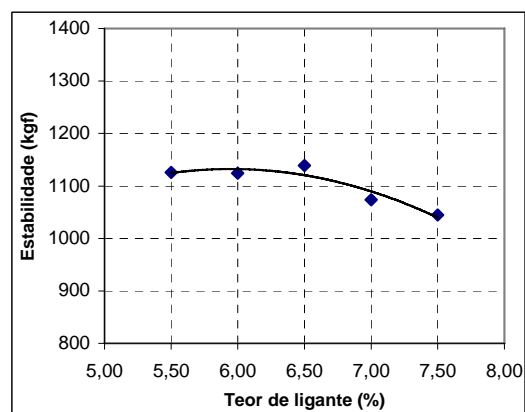
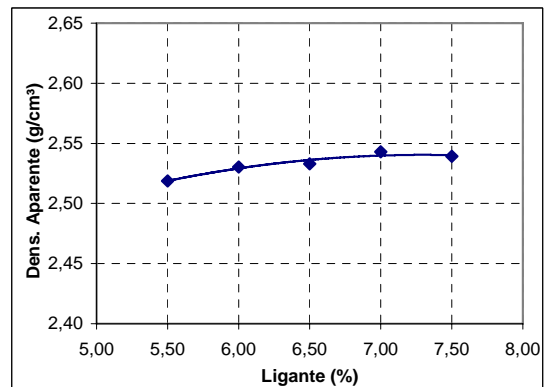
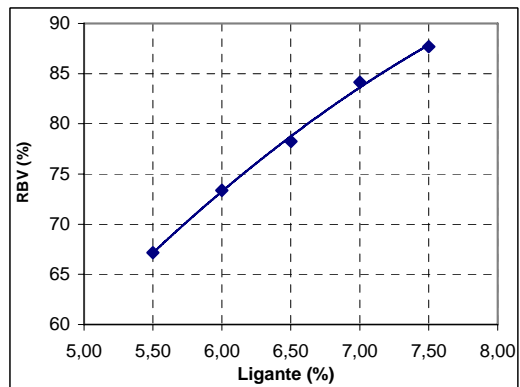
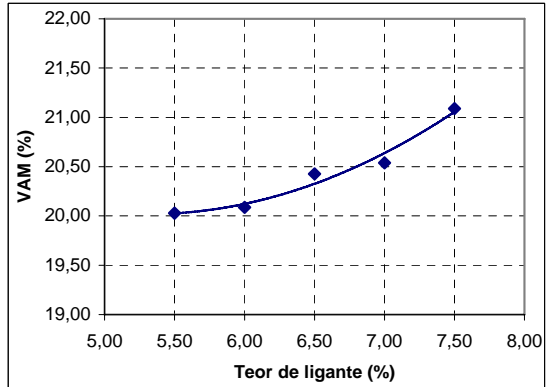
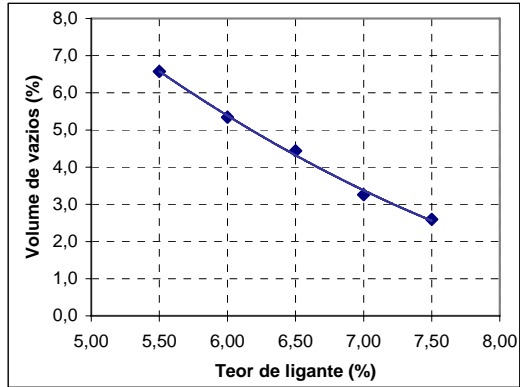
Geometria				Pesos		Densidades			Vazios			Fluência			Estabilidade			
% CAP	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	ar	agregado	RBV	L Inicial	L final	Fluência	Leit	Carga	FC	Est.
5,5	1	6,25	10,20	1258,25	759,49	498,8	2,523	2,696	6,4	19,9	67,7	232	608	14,8	647	1070	1,02	1087
5,5	2	6,29	10,20	1262,31	762,63	499,7	2,526	2,696	6,3	19,8	68,2	257	629	14,6	722	1194	1,01	1202
5,5	3	6,31	10,20	1262,00	758,71	503,3	2,508	2,696	7,0	20,4	65,7	249	710	18,1	656	1085	1,00	1088
média		6,28	10,20	1260,85	760,28	500,58	2,52	2,70	6,58	20,03	67,17	246	649	15,87	675,0	1116	1,01	1126
6,0	4	6,24	10,20	1266,31	767,02	499,3	2,536	2,673	5,1	19,9	74,2	88	526	17,2	728	1204	1,02	1225
6,0	5	6,27	10,20	1266,71	765,09	501,6	2,525	2,673	5,5	20,2	72,6	223	390	6,6	608	1005	1,01	1017
6,0	6	6,28	10,20	1266,24	765,66	500,6	2,530	2,673	5,4	20,1	73,3	232	561	13,0	678	1121	1,01	1131
média		6,26	10,20	1266,42	765,92	500,50	2,53	2,67	5,35	20,09	73,38	181	492	12,26	671,3	1110	1,01	1124
6,5	7	6,25	10,20	1268,62	766,97	501,7	2,529	2,651	4,6	20,6	77,6	199	444	9,6	639	1057	1,01	1073
6,5	8	6,27	10,20	1272,69	770,76	501,9	2,536	2,651	4,3	20,3	78,6	246	559	12,3	712	1177	1,01	1190
6,5	9	6,28	10,20	1272,32	770,35	502,0	2,535	2,651	4,4	20,4	78,5	266	529	10,4	691	1143	1,01	1153
média		6,27	10,20	1271,21	769,36	501,85	2,53	2,65	4,44	20,43	78,26	237	511	10,77	680,7	1126	1,01	1139
7,0	10	6,30	10,20	1278,16	775,13	503,0	2,541	2,629	3,3	20,6	83,8	271	626	14,0	602	996	1,00	1000
7,0	11	6,28	10,20	1275,93	775,18	500,8	2,548	2,629	3,1	20,4	85,0	272	712	17,3	674	1115	1,01	1125
7,0	12	6,29	10,20	1278,92	775,46	503,5	2,540	2,629	3,4	20,6	83,7	227	498	10,7	659	1090	1,01	1097
média		6,29	10,20	1277,67	775,26	502,41	2,54	2,63	3,26	20,54	84,15	257	612	13,99	645,0	1067	1,01	1074
7,5	13	6,32	10,20	1283,78	777,18	506,6	2,534	2,607	2,8	21,2	86,9	249	639	15,4	617	1020	1,00	1021
7,5	14	6,34	10,20	1282,82	777,93	504,9	2,541	2,607	2,5	21,0	87,9	243	618	14,8	689	1139	1,00	1136
7,5	15	6,28	10,20	1280,32	776,76	503,6	2,543	2,607	2,5	21,0	88,2	206	603	15,6	586	969	1,01	978
média		6,31	10,20	1282,31	777,29	505,02	2,54	2,61	2,60	21,09	87,68	233	620	15,25	630,7	1043	1,00	1045



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



6 - GRAFICOS METODOLOGIA MARSHALL - Asfalto-Borracha



ANEXO C

Propriedades de adesividade

Resistência ao efeito deletério da água – Metodologia Lottmam Modificada

Amostras preparadas com ligante CAP 50/70

CAP 50/70			Geometria		Pesos		Densidades			Vazios			Controle Sat.			RRt			
% CAP	Nº Golpes	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	vv (%)	vv (cm³)	vv (g)	55 %	70 %	80 %	Grupo	Leitura	Rt (MPa)	
5,32	25	30	6,48	10,20	1254,32	749,75	504,6	2,486	2,696	7,8	39,3	39,3	1275,9	1281,8	1285,8	1	440	0,70	
5,32	25	31	6,43	10,20	1253,97	752,39	501,6	2,500	2,696	7,3	36,4	36,4	1274,0	1279,5	1283,1	2	407	0,65	
5,32	25	32	6,48	10,20	1255,75	752,57	503,2	2,496	2,696	7,4	37,4	37,4	1276,3	1281,9	1285,7	1	557	0,89	
5,32	25	33	6,46	10,20	1255,25	751,10	504,2	2,490	2,696	7,6	38,5	38,5	1276,4	1282,2	1286,1	1	402	0,64	
5,32	25	34	6,45	10,20	1253,73	750,77	503,0	2,493	2,696	7,5	37,9	37,9	1274,6	1280,3	1284,1	2	386	0,62	
5,32	25	35	6,44	10,20	1255,26	750,20	505,1	2,485	2,696	7,8	39,4	39,4	1277,0	1282,9	1286,8	2	353	0,57	
										média	7,58								

Nota: Grupo 1 (sem condicionamento) - Rt1; Grupo 2 (com condicionamento) - Rt2.

Resistência à Tração	
Rt1	Rt2
0,70	
	0,65
0,89	
0,64	
	0,62
	0,57
0,75	0,61
RRt (%) = (100. Rt2/Rt1)	82

Resistência ao efeito deletério da água – Metodologia Lottmam Modificada

Amostras preparadas com ligante Asfalto-Polímero

Asfalto-Polímero																			
Identificação			Geometria		Pesos		Densidades			Vazios			Controle Sat.			RRt			
% CAP	Nº Golpes	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	volum	D aparente	Dmáx teórica	vv (%)	vv (cm³)	vv (g)	55 %	70 %	80 %	Grupo	Leitura	Rt (MPa)	
5,35	35	1	6,33	10,20	1256,59	759,70	496,9	2,529	2,695	6,2	30,7	30,7	1273,5	1278,1	1281,1	1	731	1,19	
5,35	35	2	6,34	10,20	1255,99	759,03	497,0	2,527	2,695	6,2	31,0	31,0	1273,0	1277,7	1280,8	2	609	0,99	
5,35	35	5	6,26	10,20	1254,69	758,81	495,9	2,530	2,695	6,1	30,4	30,4	1271,4	1275,9	1279,0	1	657	1,09	
5,35	35	6	6,33	10,20	1255,48	759,41	496,1	2,531	2,695	6,1	30,3	30,3	1272,1	1276,7	1279,7	2	526	0,86	
5,35	30	20	6,45	10,20	1250,38	749,05	501,3	2,494	2,695	7,5	37,4	37,4	1271,0	1276,6	1280,3	1	654	1,05	
5,35	30	21	6,41	10,20	1252,00	753,03	499,0	2,509	2,695	6,9	34,4	34,4	1270,9	1276,1	1279,6	2	564	0,91	
										média	6,50								

Nota: Grupo 1 (sem condicionamento) - Rt1; Grupo 2 (com condicionamento) - Rt2.

Resistência à Tração	
Rt1	Rt2
1,19	
	0,99
1,09	
	0,86
1,05	
	0,91
1,11	0,92
RRt (%) = (100. Rt2/Rt1)	83

Resistência ao efeito deletério da água – Metodologia Lottman Modificada

Amostras preparadas com ligante Asfalto-Borracha

Asfalto-Borracha																			
Identificação			Geometria		Pesos		Densidades			Vazios			Controle Sat.			RRt			
% CAP	Nº Golpes	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	vv (%)	vv (cm³)	vv (g)	55 %	70 %	80 %	Grupo	Leitura	Rt (MPa)	
6,66	35	9	6,39	10,20	1271,51	759,09	512,4	2,481	2,644	6,1	31,5	31,5	1288,8	1293,5	1296,7	1	375	0,61	
6,66	35	12	6,42	10,20	1271,51	755,94	515,6	2,466	2,644	6,7	34,6	34,6	1290,5	1295,7	1299,2	1	324	0,52	
6,66	30	13	6,49	10,20	1269,80	758,05	511,8	2,481	2,644	6,1	31,4	31,4	1287,1	1291,8	1294,9	2	291	0,46	
6,66	30	14	6,52	10,20	1271,23	758,12	513,1	2,477	2,644	6,3	32,3	32,3	1289,0	1293,8	1297,0	2	336	0,53	
6,66	30	15	6,52	10,20	1268,60	754,02	514,6	2,465	2,644	6,7	34,7	34,7	1287,7	1292,9	1296,4	2	316	0,50	
6,66	30	16	6,52	10,20	1269,74	755,55	514,2	2,469	2,644	6,6	33,9	33,9	1288,4	1293,5	1296,9	1	402	0,64	
										média		6,44							

Nota: Grupo 1 (sem condicionamento) - Rt1; Grupo 2 (com condicionamento) - Rt2.

Resistência à Tração	
Rt1	Rt2
0,61	
0,52	
	0,46
	0,53
	0,50
0,64	
0,59	0,50
RRt (%) = (100. Rt2/Rt1)	85



Resistência ao desgaste – Metodologia Cantabro

Mistura	Peso Inicial	Peso Final	Diferença	Perda de Massa (%)	Média	Desvio Padrão
CAP 50/70	1252,97	1128,13	124,84	9,96	8,16	1,56
	1254,30	1162,89	91,41	7,29		
	1255,58	1164,79	90,79	7,23		
Asfalto Polímero	1253,72	1217,18	36,54	2,91	3,70	0,71
	1257,64	1203,52	54,12	4,30		
	1254,36	1205,63	48,73	3,88		
Asfalto-Borracha	1268,21	1253,33	14,88	1,17	1,10	0,12
	1269,29	1254,41	14,88	1,17		
	1270,41	1258,13	12,28	0,97		

ANEXO D

Propriedades hidráulicas



**Propriedades hidráulicas das amostras preparadas
com ligante CAP 50/70**

		Rua do Comércio 3000 Bairro Universitário fone: 0xx 55 3332 0505		 Laboratório de Engenharia Civil				
Metodologia Marshall - Condutividade Hidráulica (Permabilidade)								
1 - IDENTIFICAÇÃO								
Projeto: TCC Fábio Hirsch								
Operador: Fábio - Thiago - Luís								
Ligante: CAP 50/70				Lamelaridade Mistura = 21,8%				
Data: 05/11/06				Teor de Finos = 7%				
Mistura: CBUQ - Faixa B DAER ou IVB do Instituto do Asfalto								
Obs: Tamanho máximo agregado 3/4"								
2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL								
AGREGADOS								
	% retida	D _{Real} :	D _{ap} :	D _{efetiva} :	Absorção	CAP	MISTURA MINERAL	
3/4" - n° 10	61,5	3,033	2,924	2,979	1,228	Densidade	D _{real} :	3,010
pas n° 10	38,5	2,973				1,007	D _{ap} :	2,943
							D _{efet} :	2,976
3 - ESPECIFICAÇÃO DNER								
Parâmetro		CAPA			BINDER			
Perc. Vazios (%)		3 a 5			4 a 6			
RBV (%)		75 a 82			65 a 72			
Estabilidade(kgf)		>500			>500			
Fluência (1/100")		8 a 18			8 a 18			
VAM (DAER) para 3/4"		>14			14			
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO								
Mistura: Temperatura - 149 -155°C								
Compactação: 75 golpes por face - Temperatura - 137 -142°C								
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS								
Propriedade		Teor de Ligante (%)						
		4,5	5,0	5,5	6,0	6,5		
Volume de Vazios (%)		6,7	5,1	3,6	2,1	1,7		
Relação Betume Vazios (%)		63	72	80	88	91		
Vazios do Agregado Mineral (%)		18,10	17,84	17,78	17,67	18,48		
Densidade Máxima Teórica (g/cm³)		2,74	2,71	2,69	2,66	2,64		
Densidade Aparente (g/cm³)		2,55	2,57	2,59	2,61	2,59		
Permeabilidade (m/s)		6,56E-05	8,14E-06	1,05E-06	1,22E-06	7,17E-06		

Propriedades hidráulicas das amostras preparadas com ligante CAP 50/70

Geometria				Pesos		Densidades			Vazios			Tempo (1ª Leitura)			Tempo (2ª Leitura)			Tempo (3ª Leitura)			Tempo Final	Nível d'água (m)		Áreas (m²)		Permeabilidade
% CAP	Nº CP	h (m)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	D máx teórica	ar	agregado	RBV	Hs	Min.	Seg.	Hs	Min.	Seg.	Hs	Min.	Seg.	Total (s)	Inicial	Final	Tube	CP	K _r (m/s)
4,5	1	0,062175	10,20	1246,08	758,16	487,9	2,554	2,736	6,6	18,1	63,2			30			30			30	30	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,65E-05
4,5	2	0,061550	10,20	1243,49	756,93	486,6	2,556	2,736	6,6	18,0	63,5			33			33			32	33	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,04E-05
4,5	3	0,061700	10,20	1245,47	756,66	488,8	2,548	2,736	6,9	18,2	62,4			30			28			27	28	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,99E-05
média			10,20	1245,01	757,25	487,76	2,55	2,74	6,69	18,10	63,02															6,56E-05
5,0	4	0,061075	10,20	1251,99	765,11	486,9	2,571	2,711	5,2	17,9	71,2		4	56		5			5		299	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,56E-06
5,0	5	0,061225	10,20	1254,29	766,64	487,7	2,572	2,711	5,1	17,9	71,3		4	53		4	56		4	56	295	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,66E-06
5,0	6	0,061375	10,20	1252,14	766,59	485,6	2,579	2,711	4,9	17,7	72,4		2	55		2	56		2	57	176	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,12E-05
média			10,20	1252,81	766,11	486,69	2,57	2,71	5,06	17,84	71,65															8,14E-06
5,5	7	0,061025	10,20	1253,35	770,04	483,3	2,593	2,687	3,5	17,7	80,2		28	25		30	15		32	5	1815	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,08E-06
5,5	8	0,060675	10,20	1256,12	772,28	483,8	2,596	2,687	3,4	17,6	80,7	3	2	7	4	21	40	6	35	38	16788	2,154	1,624	0,000523	0,0064	8,33E-08
5,5	9	0,060675	10,20	1253,00	767,15	485,9	2,579	2,687	4,0	18,1	77,7		13	47		16	17		18	49	978	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,99E-06
média			10,20	1254,16	769,82	484,33	2,59	2,69	3,64	17,78	79,54															1,05E-06
6,0	10	0,060800	10,20	1254,90	772,13	482,8	2,599	2,664	2,4	17,9	86,5	24			24			24			86400	2,154	2,145	0,000523	0,0064	2,41E-10
6,0	11	0,060050	10,20	1249,33	770,96	478,4	2,612	2,664	2,0	17,5	88,8	18	6	20	18	6	20	18	6	20	65180	2,154	2,144	0,000523	0,0064	3,50E-10
6,0	12	0,060575	10,20	1256,71	775,08	481,6	2,609	2,664	2,0	17,6	88,4		9	10		8	47		8	41	533	2,154	1,454	0,000523	0,0064	3,65E-06
média			10,20	1253,65	772,72	480,92	2,61	2,66	2,14	17,67	87,89															1,22E-06
6,5	13	0,060750	10,20	1257,78	773,98	483,8	2,600	2,641	1,5	18,3	91,5	24			24			24			86400	2,154	2,145	0,000523	0,0064	2,40E-10
6,5	14	0,061000	10,20	1259,76	774,03	485,7	2,594	2,641	1,8	18,5	90,4		5	20		5	28		5	47	332	2,154	1,454	0,000523	0,0064	5,90E-06
6,5	15	0,061150	10,20	1253,47	769,77	483,7	2,591	2,641	1,9	18,6	90,0		1	5		4	6		1	6	126	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,56E-05
média			10,20	1257,00	772,59	484,41	2,59	2,64	1,73	18,48	90,62															7,17E-06



**Propriedades hidráulicas das amostras preparadas
com ligante Asfalto-Polímero**

		Rua do Comércio 3000 Bairro Universitário fone: 0xx 55 3332 0505		 Laboratório de Engenharia Civil					
Metodologia Marshall - Condutividade Hidráulica (Permabilidade)									
1 - IDENTIFICAÇÃO									
Projeto: TCC Fábio Hirsch									
Operador: Fábio - Thiago - Luís									
Ligante: Asfalto-Polímero				Lamelaridade Mistura = 21,8%					
Data: 19/11/06				Teor de Finos = 7%					
Mistura: CBUQ - Faixa B DAER ou IVB do Instituto do Asfalto									
Obs: Tamanho máximo agregado 3/4"									
2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL									
AGREGADOS									
	% retida	D _{Real} :		D _{ap} :	D _{efetiva} :	Absorção	Densidade	D _{real} :	3,010
3/4" - n° 10	61,5	3,033		2,924	2,979	1,228	1,009	D _{ap} :	2,943
pas n° 10	38,5	2,973						D _{efet} :	2,976
3 - ESPECIFICAÇÃO DNER									
Parâmetro		CAPA			BINDER				
Perc. Vazios (%)		3 a 5			4 a 6				
RBV (%)		75 a 82			65 a 72				
Estabilidade(kgf)		>500			>500				
Fluência (1/100")		8 a 18			8 a 18				
VAM (DAER) para 3/4"		>14			14				
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO									
Mistura: Temperatura - 164 -173°C									
Compactação: 75 golpes por face - Temperatura - 152 -157°C									
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS									
Propriedade		Teor de Betume (%)							
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0			
Volume de Vazios (%)		5,0	3,9	2,4	1,7	1,6			
Relação Betume Vazios (%)		72	78	86	91	92			
Vazios do Agregado Mineral (%)		17,77	17,99	17,89	18,45	19,51			
Densidade Máxima Teórica (g/cm ³)		2,71	2,69	2,66	2,64	2,62			
Densidade Aparente (g/cm ³)		2,58	2,58	2,60	2,60	2,58			
Permeabilidade (m/s)		2,56E-05	1,76E-05	2,21E-06	6,42E-07	1,86E-06			

Propriedades hidráulicas das amostras preparadas com ligante Asfalto-Polímero

Geometria					Pesos		Densidades			Vazios			Tempo (1ª Leitura)			Tempo (2ª Leitura)			Tempo (3ª Leitura)			Tempo Final	Nível d'água (m)		Áreas (m²)		Permeabilidade
% CAP	Nº CP	h (cm)	h (m)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	ar	agregado	RBV	Hs	Min.	Seg.	Hs	Min.	Seg.	Hs	Min.	Seg.	Total (s)	Inicial	Final	Tubo	CP	k (m/s)
5,0	1	6,04	0,060425	10,20	1241,76	759,07	482,7	2,573	2,712	5,1	17,9	71,3		1	53		1	51		1	52	112	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,73E-05
5,0	2	6,15	0,061525	10,20	1246,49	763,07	483,4	2,578	2,712	4,9	17,7	72,2		1	29		1	28		1	25	87	2,154	1,454	0,000523	0,0064	2,26E-05
5,0	3	6,09	0,060900	10,20	1246,83	763,14	483,7	2,578	2,712	4,9	17,7	72,1			53			53			53	53	2,154	1,454	0,000523	0,0064	3,69E-05
média		6,10		10,20	1245,03	761,76	483,27	2,58	2,71	5,00	17,77	71,84															2,56E-05
5,5	4	6,08	0,060800	10,20	1251,94	767,87	484,1	2,586	2,688	3,8	17,9	78,8		1	42		1	42		1	42	102	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,91E-05
5,5	5	6,09	0,060925	10,20	1253,24	768,57	484,7	2,586	2,688	3,8	17,9	78,7		1	19		1	19		1	20	79	2,154	1,454	0,000523	0,0064	2,46E-05
5,5	6	6,09	0,060925	10,20	1250,31	765,20	485,1	2,577	2,688	4,1	18,2	77,3		3	42		3	33		3	35	217	2,154	1,454	0,000523	0,0064	9,02E-06
média		6,09		10,20	1251,83	767,21	484,62	2,58	2,69	3,90	17,99	78,29															1,76E-05
6,0	7	6,09	0,060850	10,20	1254,26	770,32	483,9	2,592	2,665	2,7	18,1	84,9		5	19		5	13		5	8	313	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,23E-06
6,0	8	6,07	0,060650	10,20	1257,07	774,27	482,8	2,604	2,665	2,3	17,8	87,1	1	20	13	1	22	28	1	27	33	5005	2,154	1,454	0,000523	0,0064	3,89E-07
6,0	9	6,02	0,060200	10,20	1250,64	770,45	480,2	2,604	2,665	2,3	17,7	87,3	24			24			24			86400	2,154	2,144	0,000523	0,0064	2,65E-10
média		6,06		10,20	1253,99	771,68	482,31	2,60	2,66	2,43	17,89	86,44															2,21E-06
6,5	10	6,03	0,060275	10,20	1253,58	770,44	483,1	2,595	2,642	1,8	18,5	90,4		16	2		16	43		17	28	1004	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,93E-06
6,5	11	6,10	0,061025	10,20	1255,72	771,78	483,9	2,595	2,642	1,8	18,5	90,4	24			24			24			86400	2,154	2,146	0,000523	0,0064	2,15E-10
6,5	12	6,03	0,060300	10,20	1252,48	770,45	482,0	2,598	2,642	1,6	18,4	91,1	12	28	36	12	28	36	12	28	36	44916	2,154	2,142	0,000523	0,0064	6,12E-10
média		6,05		10,20	1253,93	770,89	483,04	2,60	2,64	1,73	18,45	90,63															6,42E-07
7,0	13	6,08	0,060775	10,20	1257,92	770,18	487,7	2,579	2,619	1,5	19,4	92,2	24			24			24			86400	2,154	2,143	0,000523	0,0064	2,94E-10
7,0	14	6,13	0,061300	10,20	1260,33	771,48	488,9	2,578	2,619	1,6	19,4	92,0	13	18	45	13	18	45	13	18	45	47925	2,154	2,148	0,000523	0,0064	2,91E-10
7,0	15	6,14	0,061400	10,20	1249,87	763,71	486,2	2,571	2,619	1,8	19,7	90,7		5	59		5	55		5	45	353	2,154	1,454	0,000523	0,0064	5,58E-06
média		6,12		10,20	1256,04	768,46	487,58	2,58	2,62	1,64	19,51	91,61															1,86E-06

**Propriedades hidráulicas das amostras preparadas
com ligante Asfalto-Borracha**

		Rua do Comércio 3000 Bairro Universitário fone: 0xx 55 3332 0512		 Laboratório de Engenharia Civil					
Metodologia Marshall - Condutividade Hidráulica (Permabilidade)									
1 - IDENTIFICAÇÃO									
Projeto: TCC Fábio Hirsch									
Operador: Fábio - Thiago - Luís									
Ligante: Asfalto-Borracha				Lamelaridade Mistura = 21,8%					
Data: 19/11/06				Teor de Finos = 7%					
Mistura: CBUQ - Faixa B DAER ou IVB do Instituto do Asfalto									
Obs: Tamanho máximo agregado 3/4"									
2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL									
AGREGADOS									
	% retida	D _{Real} :	D _{ap} :	D _{efetiva} :	Absorção	CAP Densidade	MISTURA MINERAL D _{real} :		3,010
3/4" - n° 10	61,5	3,033	2,924	2,979	1,228	1,030	D _{ap} :		2,943
pas n° 10	38,5	2,973					D _{efet} :		2,976
3 - ESPECIFICAÇÃO DNER									
Parâmetro		CAPA			BINDER				
Perc. Vazios (%)		3 a 5			4 a 6				
RBV (%)		75 a 82			65 a 72				
Estabilidade(kgf)		>500			>500				
Fluência (1/100")		8 a 18			8 a 18				
VAM (DAER) para 3/4"		>14			14				
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO									
Mistura: Temperatura - 170 -180°C									
Compactação: 75 golpes por face - Temperatura - 160 -170°C									
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS									
Propriedade	Teor de ligante (%)								
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5				
Volume de Vazios (%)	6,6	5,3	4,4	3,3	2,6				
Relação Betume Vazios (%)	67	73	78	84	88				
Vazios do Agregado Mineral (%)	20,03	20,09	20,43	20,54	21,09				
Densidade Máxima Teórica (g/cm³)	2,70	2,67	2,65	2,63	2,61				
Densidade Aparente (g/cm³)	2,52	2,53	2,53	2,54	2,54				
Permeabilidade (m/s)	1,84E-05	9,41E-06	4,80E-06	1,15E-06	5,16E-06				

Propriedades hidráulicas das amostras preparadas com ligante Asfalto-Borracha

Geometria					Pesos		Densidades			Vazios			Tempo (1ª Leitura)			Tempo (2ª Leitura)			Tempo (3ª Leitura)			Tempo Final	Nível d'água (m)		Áreas (m²)		Permeabilidade
% CAP	Nº CP	h (cm)	h (m)	d(cm)	no ar	na água	volume	D aparente	Dmáx teórica	ar	agregado	RBV	Hs	Min.	Seg.	Hs	Min.	Seg.	Hs	Min.	Seg.	Total (s)	Inicial	Final	Tubo	CP	k (m/s)
5,5	1	6,2475	0,062475	10,20	1258,25	759,49	498,8	2,523	2,696	6,4	19,9	67,7		2	2		2	1		2	1	121	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,65E-05
5,5	2	6,2900	0,06290	10,20	1262,31	762,63	499,7	2,526	2,696	6,3	19,8	68,2		2	44		2	38		2	33	158	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,27E-05
5,5	3	6,3075	0,063075	10,20	1262,00	758,71	503,3	2,508	2,696	7,0	20,4	65,7		1	19		1	18		1	17	78	2,154	1,454	0,000523	0,0064	2,59E-05
média		6,2817	0,062817	10,20	1260,85	760,28	500,58	2,52	2,70	6,58	20,03	67,17															1,84E-05
6,0	4	6,2425	0,062425	10,20	1266,31	767,02	499,3	2,536	2,673	5,1	19,9	74,2		4	16		4	19		4	21	259	2,154	1,454	0,000523	0,0064	7,74E-06
6,0	5	6,2700	0,062700	10,20	1266,71	765,09	501,6	2,525	2,673	5,5	20,2	72,6		2	10		2	7		2	7	128	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,57E-05
6,0	6	6,2800	0,062800	10,20	1266,24	765,66	500,6	2,530	2,673	5,4	20,1	73,3		6	51		7	3		7	15	423	2,154	1,454	0,000523	0,0064	4,76E-06
média		6,2642	0,062642	10,20	1266,42	765,92	500,50	2,53	2,67	5,35	20,09	73,38															9,41E-06
6,5	7	6,2525	0,062525	10,20	1268,62	766,97	501,7	2,529	2,651	4,6	20,6	77,6		22	29		23	9		23	15	1377,67	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,46E-06
6,5	8	6,2700	0,062700	10,20	1272,69	770,76	501,9	2,536	2,651	4,3	20,3	78,6		2	45		2	46		2	47	166	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,21E-05
6,5	9	6,2775	0,062775	10,20	1272,32	770,35	502,0	2,535	2,651	4,4	20,4	78,5		40			40	8		41	30	2433	2,154	1,454	0,000523	0,0064	8,28E-07
média		6,2667	0,062667	10,20	1271,21	769,36	501,85	2,53	2,65	4,44	20,43	78,26															4,80E-06
7,0	10	6,3025	0,063025	10,20	1278,16	775,13	503,0	2,541	2,629	3,3	20,6	83,8		22	29		24	8		24	55	1431	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,41E-06
7,0	11	6,2800	0,062800	10,20	1275,93	775,18	500,8	2,548	2,629	3,1	20,4	85,0		38	25		37	43		36	55	2261	2,154	1,654	0,000523	0,0064	5,99E-07
7,0	12	6,2925	0,062925	10,20	1278,92	775,46	503,5	2,540	2,629	3,4	20,6	83,7		21	9		24	1		24	56	1402	2,154	1,454	0,000523	0,0064	1,44E-06
média		6,2917	0,062917	10,20	1277,67	775,26	502,41	2,54	2,63	3,26	20,54	84,15															1,15E-06
7,5	13	6,3200	0,063200	10,20	1283,78	777,18	506,6	2,534	2,607	2,8	21,2	86,9		5			5	10		5	11	307	2,154	1,454	0,000523	0,0064	6,60E-06
7,5	14	6,3350	0,063350	10,20	1282,82	777,93	504,9	2,541	2,607	2,5	21,0	87,9		3	54		4	2		4	8	241	2,154	1,454	0,000523	0,0064	8,42E-06
7,5	15	6,2800	0,062800	10,20	1280,32	776,76	503,6	2,543	2,607	2,5	21,0	88,2		17	55		18	10		18	26	1090	2,154	1,954	0,000523	0,0064	4,58E-07
média		6,3117	0,063117	10,20	1282,31	777,29	505,02	2,54	2,61	2,60	21,09	87,68															5,16E-06