

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

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Curso de Engenharia Civil

Thiago de Matos Rozek

**ESTUDO LABORATORIAL DO ENVELHECIMENTO DE
MISTURAS EM CONCRETO ASFÁLTICO PREPARADAS
COM DIFERENTES TIPOS E TEORES DE LIGANTES**

Ijuí/RS

2008

Thiago de Matos Rozek

**ESTUDO LABORATORIAL DO ENVELHECIMENTO DE
MISTURAS EM CONCRETO ASFÁLTICO PREPARADAS
COM DIFERENTES TIPOS E TEORES DE LIGANTES**

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

Ijuí

2008

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. Marco Antonio Silva Pinheiro, Dr.
UNIJUÍ/DeTec

Prof. Tiago Stum Marder, M. Eng.
UNIJUÍ/DeTec

Dedico este trabalho a minha filha, Ana Carolina Flores Rozek, aos meus pais, Oscar Teixeira Rozek e Terezinha de Matos Rozek, ao meu irmão Alessandro de Matos Rozek e a minha namorada Dinalva Flores dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e proteção.

Expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de alguma forma auxiliaram durante esta caminhada seja através de uma orientação técnica, seja através de apoio, de incentivo e da amizade, muitas pessoas tiveram papel importante neste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Luciano Pivoto Specht, pela amizade, confiança e oportunidade, pelo incentivo, pelas diretrizes firmes e seguras, e principalmente pela qualidade de formação.

Aos meus amigos e colegas de pesquisa, Diego Arthur Hartmann e Jaelson Budny pelo apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos laboratoristas e amigos Luis Donato e Salete Zaltron, pelo auxílio durante o curso na realização dos ensaios e no meu trabalho de conclusão, agradeço todo o apoio, amizade e ensinamentos.

Aos professores, laboratoristas e amigos do LAPAV da UFRGS, em especial ao Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, Diego Treichel, Vinicius Alves e Daniel pela amizade e ajuda na execução dos ensaios.

Ao meu amigo e colega de pesquisa, Fábio Hirsch pela amizade, apoio e companheirismo.

Aos colegas de curso, em especial aos amigos Fernando Boeira, Ricardo Rupp, André Bock, Julio Kotlinski, Sergio Callai, Eduardo Bueno, Ricardo Novroth e Henardt K. Weber.

A amizade dos colegas que por aqui passaram, em especial aos amigos Gláucio Moamar Walker e ao Turíbio Serpa.

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

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

A todos os demais colegas e professores do Curso de Engenharia Civil da UNIJUÍ pelo convívio ao longo do curso.

A minha namorada, pelo companheirismo de todas as horas, paciência e amor expresso em todas as maneiras.

Aos meus pais e ao meu irmão, que sempre estiveram ao meu lado em todas as horas, agradeço pelo exemplo de vida, perseverança, união e confiança depositados em mim ao longo desta jornada. Tenha certeza que este trabalho também é de vocês.

RESUMO

Podemos definir pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente; as camadas de revestimentos incluem componentes de alto custo e merecem atenção especial; O estudo do envelhecimento de ligantes e misturas asfálticas é um dos aspectos que, nos últimos anos, tem-se estudado, todavia algumas lacunas ainda necessitam ser preenchidas. Esta pesquisa tem como objetivos avaliar as propriedades mecânicas e de desgaste do concreto asfáltico (CA) considerando as variáveis: tipo de ligante; teor de ligante e tempo de envelhecimento de curto prazo. A partir dos parâmetros determinados pela dosagem Marshall de três misturas de CA com diferentes tipos de ligantes asfálticos: ligante convencional (CAP 50/70), asfalto modificado por borracha (Ecoflex B) e asfalto modificado com polímero SBS (Stylink), determinou-se o teor de ligante de projeto e, então, moldou-se amostras de referência (sem envelhecimento) e amostras envelhecidas (2 e 4 horas) de cada mistura alterando o percentual de ligante com 0,3% a mais e a menos em relação ao teor de ligante de projeto (conforme preconizado na ASTM D 6926-04) para a verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Rt) preconizado pela norma do DNER-ME 138/94, ensaio de módulo de resiliência (Mr) preconizado pela norma do DNER-ME 133/94) e para verificação das propriedades de abrasão (ensaio da metodologia Cantabro (PM) preconizado pela norma do DAER – EL 215/01). Os resultados mostram que para o ensaio de Rt, misturas com menos 0,3% de ligante do teor de projeto há uma redução dos valores médios de Rt em relação ao tempo de envelhecimento para todas as misturas, este valor de 0,3% é aceito pelas especificações, mas esta variação pode levar, na prática, a um envelhecimento precoce das misturas; os resultados da análise estatística mostram que as variáveis independentes que influenciam a Rt é a penetração e a viscosidade, sendo que a penetração é proporcional e a viscosidade inversamente proporcional ao valores de Rt; Os resultados de Mr com menos 0,3% do teor de projeto mostram uma redução dos valores de Mr, demonstrando uma incapacidade da cimentação do ligante envelhecido no agregado. Por outro lado as misturas com teor de ligante de projeto e com mais 0,3%, há um aumento da viscosidade do ligante envelhecido e, conseqüentemente, um incremento na rigidez das misturas; As misturas com mais 0,3% do teor de projeto tem um incremento menor nos valores de Mr, o que pode ser atribuído a maior espessura do ligante e menor alteração em sua viscosidade; Os resultados da análise estatística do Mr demonstram que as variáveis independentes que influenciam Mr é o teor de ligante e a viscosidade, onde estas variáveis são inversamente proporcionais ao valores de Mr; Os valores médios de PM indicaram que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70, seguida do asfalto-polímero e do asfalto-borracha; Os resultados da análise estatística de PM indicaram que as variáveis independentes que influenciam a perda de massa são tempo de envelhecimento e o teor de ligante; o tempo de envelhecimento é proporcional e o teor de ligante inversamente proporcional a está resposta.

Palavras-chaves: Pavimentação, misturas asfálticas, envelhecimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos agregados para pavimentação	21
Figura 2: Classificação dos revestimentos para pavimentação	28
Figura 3: Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento (Whiteoak, 1990)	35
Figura 4: Test track construído pelo Bureau Public Roads em 1925 nos EUA (Croney & Croney, 1997 <i>apud</i> Merigui, 1999)	38
Figura 5: Tipos básicos de deformação (Dowling, 1993 <i>apud</i> Merigui, 1999).....	39
Figura 6: Deformação permanente ou afundamento de trilha de roda	40
Figura 7: Trincamento por fadiga.....	42
Figura 8: Efeito deletério da água.....	44
Figura 9: Distribuição granulométrica.....	49
Figura 10: Ajuste granulométrico da mistura.....	51
Figura 11: Seqüência da dosagem	53
Figura 12: Equipamento de ensaio de compressão diametral.....	55
Figura 13: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro	56
Figura 14: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência.....	57
Figura 15: Equipamento de módulo de resiliência da UFRGS	58
Figura 16: Equipamento de módulo de resiliência ligado ao microcomputador.....	59
Figura 17: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência	59
Figura 18: Execução do ensaio de desgaste Cantabro.....	61
Figura 19: Resistência à tração <i>versus</i> envelhecimento em estufa.....	64
Figura 20: Análise de regressão linear múltipla de R_t	65
Figura 21: Valores previstos <i>versus</i> observados para variável R_t	66
Figura 22: Superfície de resposta da variável R_t	66
Figura 23: Módulo de resiliência <i>versus</i> envelhecimento em estufa.....	68
Figura 24: Análise de regressão linear múltipla do M_r	69
Figura 25: Valores previstos <i>versus</i> observados para variável M_r	70
Figura 26: Superfície de resposta da variável M_r	70
Figura 27: Relação M_r/R_t <i>versus</i> envelhecimento em estufa	72
Figura 28: Análise de regressão linear múltipla da relação M_r/R_t	73
Figura 29: Valores previstos <i>versus</i> observados para variável M_r/R_t	74
Figura 30: Superfície de resposta da variável M_r/R_t	74

Figura 31: Perda de massa <i>versus</i> envelhecimento em estufa.....	76
Figura 32: Análise de regressão linear múltipla do PM	77
Figura 33: Valores previstos <i>versus</i> observados para variável PM.....	78
Figura 34: Superfície de resposta da variável PM.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características dos agregados utilizados	48
Quadro 2: Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)	49
Quadro 3: Propriedades do ligante modificado com borracha (Ecoflex B)	50
Quadro 4: Propriedades do ligante modificado com polímero (Stylink)	50
Quadro 5: Resultados da Dosagem Marshall	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Repartição modal.....	17
Tabela 2: Fatores intervenientes nas características de adesividade	44
Tabela 3: Número de amostras	47
Tabela 4: Resultado do ensaio de granulometria.....	48
Tabela 5: Temperaturas de mistura e de compactação	50
Tabela 6: Especificação e composição granulométrica da mistura – Faixa B DAER/RS.....	51
Tabela 7: Valores de resistência à tração em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento.....	63
Tabela 8: Valores de módulo de resiliência em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento.....	67
Tabela 9: Relação Mr/Rt em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento.....	71
Tabela 10: Valores de perda de massa em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento.....	75
Tabela 11: Resumo dos resultados	79

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*
- AB: *Asfalto-Borracha*
- ABNT: *Associação Brasileira de Normas Técnicas*
- ANTT: *Agência Nacional de Transporte Terrestre*
- AP: *Asfalto-Polímero*
- ASTM: *American Society of Testing and Materials*
- ATR: *Afundamento de Trilha de Roda*
- CA: *Concreto Asfáltico*
- CAP: *Cimento Asfáltico de Petróleo*
- CAN: *Cimento Asfáltico Natural*
- CAM: *Cimento Asfáltico Modificado*
- CEC: *Centro de Estudios de Carreteras*
- CBUQ: *Concreto Betuminoso Usinado à Quente*
- CL: *Cura Lenta*
- CNT: *Confederação Nacional de Transporte*
- CM: *Cura Média*
- CR: *Cura Rápida*
- d: *diâmetro do Corpo-de-Prova*
- DAER/RS: *Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul*
- DNER: *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*
- DNIT: *Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes*
- DC: *Deformação Controlada*
- EVA: *Copolímero Etano-Vanila-Acetil*
- ε_p : *Erro Padrão de Estimativa*
- F: *Força Aplicada*

FHWA: *Federal Highway Administration*

h: *Altura do Corpo-de-Prova*

LEC: *Laboratório de Engenharia da UNIJUÍ*

LAPAV: *Laboratório de Pavimentação da UFRGS*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

Mr: *Módulo de Resiliência*

N: *Vida de Fadiga*

PA: *Ponto de Amolecimento*

PM: *Perda de massa*

PIB: *Produto Interno Bruto*

PN: *Penetração*

RL: *Ruptura Lenta*

RM: *Ruptura Média*

RR: *Ruptura Rápida*

Rt: *Resistência à Tração por Compressão Diametral*

SBS: *Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno*

SBR: *Borracha de Butadieno Estireno*

TC: *Tensão Controlada*

TE: *Tempo de envelhecimento*

TL: *Teor de ligante*

TSM: *Tambor-Secador-Misturador*

UFRGS: *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

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

VB: *Viscosidade Brookfield @ 177°C*

Δ : *Deformação Elástica ou Resiliente*

μ : *Coefficiente de Poisson*

P e P': *Peso Inicial e Peso após o ensaio*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 TEMA	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.3 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO.....	15
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1. Objetivo Geral	15
1.4.2. Objetivos Específicos	16
1.5 JUSTIFICATIVAS.....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 MATERIAIS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	20
2.1.1 Agregados Minerais.....	20
2.1.2 Fíler	24
2.1.3 Ligantes	26
2.2 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	28
2.2.1 Revestimentos por Penetração	29
2.2.2 Revestimentos por Mistura	30
2.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	30
2.4 PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	32
2.5 ENVELHECIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	34
2.6 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	36
2.6.1 Deformação Permanente.....	37
2.6.2 Trincamento por Fadiga.....	41
2.6.3 Efeito Deletério da Água	43
3. METODOLOGIA	46
3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO	46
3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA	46
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	47
3.3.1 Agregados Minerais.....	47
3.3.2 Ligantes	49
3.3.3 Misturas Asfálticas	51
3.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	52
3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO E DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS	54
3.5.1 Ensaio de Compressão Diametral	54
3.5.2 Ensaio de Módulo de Resiliência.....	56
3.5.3 Resistência ao Desgaste - Metodologia Cantabro	60
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
4.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO	62

4.1.1 Resistência à tração	62
4.1.2 Módulo de Resiliência	67
4.1.3 Relação Mr/Rt	71
4.2 PROPRIEDADES DE ABRASÃO.....	75
4.3 RESUMO DOS RESULTADOS	78
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1 CONCLUSÕES	80
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	84
ANEXO A.....	90
ANEXO B	94

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema

O tema da pesquisa é: Pavimentação Asfáltica.

1.2 Delimitação do tema

Esta pesquisa limita-se a estudar revestimentos asfálticos do tipo concreto asfáltico (CA), levando em consideração diferentes tipos e teores de ligante e considerando o envelhecimento em curto prazo das misturas.

1.3 Formulação da questão de estudo

Qual a influência do tipo e do teor de ligante nas propriedades de três misturas em concreto asfáltico considerando o envelhecimento de 2 e 4 horas em estufa?

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

Avaliar as propriedades mecânicas e de desgaste do CA considerando as variáveis: tipo de ligante; teor de ligante e tempo de envelhecimento de curto prazo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a resistência à tração, de misturas asfálticas considerando o tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo;
- Avaliar o módulo de resiliência, de misturas asfálticas considerando o tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo;
- Avaliar a resistência ao desgaste, de misturas asfálticas considerando o tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo;

1.5 Justificativas

O transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros, no Brasil, é um serviço público essencial, responsável por uma movimentação superior a 140 milhões de usuários/ano. Para um país com uma malha rodoviária de aproximadamente 1,8 milhões de quilômetros, sendo 146 mil pavimentadas (rodovias federais e estaduais), a existência de um sólido sistema de transporte rodoviário de passageiros é vital (ANTT, 2007).

Segundo Mello (2001), há uma profunda relação entre transportes e crescimento econômico, sem transportes não há qualquer possibilidade de pleno aproveitamento do potencial de uma região ou país, imagine a inutilidade de safras agrícolas ou de jazidas minerais se elas não pudessem atingir mercados consumidores; o transporte rodoviário é bastante flexível, tanto em relação á qualidade das vias quanto ao tamanho e valor das cargas, além de ser o único que permite operações de transportes desde a origem até o destino final. A demanda por transportes crescem historicamente a taxas superiores ao crescimento do PIB, atualmente a repartição modal no transportes de carga está dividida da seguinte maneira (Tabela 1):

Tabela 1: Repartição modal

<i>Modal</i>	<i>% do tráfego</i>
Aéreo	0,3
Aquaviário	11,7
Dutoviário	4,0
Ferroviário	21,0
Rodoviário	63,0

Fonte: Mello, 2001

Conforme pesquisa rodoviária 2006 da Confederação Nacional de Transporte – CNT, em que foram pesquisados 84.382 km de rodovias, pôde-se constatar que 75% da extensão pesquisada apresentam algum grau de imperfeição (38,4% regulares, 24,4% ruins, 12,2% péssimos), os trechos com afundamentos, ondulações ou buracos acumulam 12,6% destas rodovias.

Podemos definir pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente; as camadas de revestimentos incluem componentes de alto custo e 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.

Segundo Wesseling (2005), a utilização constante de recursos naturais (exploração de jazidas e derivados de petróleo) na pavimentação asfáltica traz para o setor da 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.

As obras de engenharia civil, por utilizarem grandes quantidades de material, desenvolvem importante papel na utilização de diversos resíduos, a quantidade de resíduos sólidos provenientes da indústria de borracha e do descarte de pneumáticos têm motivado vários estudos acerca da reutilização e reciclagem deste material, motivados, principalmente, pelo grande volume gerado e seu longo período de degradação (400 a 800 anos). Têm-se estudado a incorporação de fragmentos de borracha proveniente da reciclagem de pneus em

ligantes asfálticos ou diretamente no CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente (Oda, 2000; Bertollo, 2002; Specht, 2004) usados em obras de pavimentação, os quais têm se tornado alternativas atrativas, bem como outras tentativas de reciclagem têm sido testadas: confecção de tapetes e artefatos de borracha, estabilização de encostas, controle de erosão com mantas de pneus, utilização como combustível etc.

Apesar da utilização da borracha reciclada de pneumáticos inservíveis em pavimentos ser uma possível solução para atenuar o problema e 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.

De forma semelhante, inúmeras pesquisas têm verificado os benefícios da adição de materiais poliméricos aos ligantes asfálticos. As propriedades esperadas com adição de polímeros são a redução da suscetibilidade térmica e aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas. Os polímeros também podem contribuir para uma maior resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado. Vários trabalhos tem sido publicados nos últimos anos, na literatura internacional: Bonemazzi *et al.* (1996); Jacobs *et al.* (1996) e Shin *et al.* (1996), no Brasil destacam-se as pesquisas de Ceratti *et al.* (1996), DNER (1996), Gonçalves (2002), Leite (1999), e Silva *et al.* (2002).

O processo de envelhecimento do CA se inicia durante o processo de produção da massa asfáltica em usina (envelhecimento de curto prazo) e continua em campo sujeitos às intempéries e ao tráfego (envelhecimento de longo prazo). Tais processos enrijecem o ligante tornando-o frágil e quebradiço acelerando os processos de trincamento e desagregação da massa asfáltica.

O desempenho de um pavimento é fortemente condicionado pelas características que suas camadas exibem. Essas características dependem dos materiais utilizados (solo, agregados, finos e ligantes), da dosagem da mistura betuminosa, de suas condições de compactação e do processo construtivo. No caso de falha, principalmente no que diz respeito às camadas asfálticas e cimentadas, por serem componentes de alto custo e com importante função estrutural, o insucesso no desempenho do pavimento é marcante (Wesseling, 2002).

O controle do processo de produção e execução das misturas utilizadas como revestimentos de rodovias contribui para pavimentos mais duráveis e de maior benefício/custo para o nosso país.

Para que sejam desenvolvidos novos materiais, em qualquer área do conhecimento, é importante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. Neste contexto, o presente trabalho tem como finalidade contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico de misturas asfálticas convencionais e modificadas. Este trabalho segue a mesma linha de pesquisa de outros trabalhos de conclusão já apresentados do Curso de Engenharia Civil da UNIJUÍ, como o de Wesseling (2002), Beck (2005) e Hirsch (2007).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Materiais para Misturas Asfálticas

2.1.1 Agregados Minerai

Segundo Frazão (2002), agregado é todo material granular encontrado na natureza ou proveniente de fragmentação mecânica. Pode ser classificado pela sua dimensão em graúdo (pedra britada e pedregulho) e miúdo (areia natural ou artificial). O agregado pode ainda ser classificado, de acordo com a densidade, em pesado (barita, magnetita, etc.), normal (pedra britada e pedregulho) e leve (argila expandida, vermiculita, etc.). Pode ser também classificado conforme o modo de obtenção, em naturais (cascalho e areia) e artificiais (pedra britada e areia artificial).

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.

As características dos agregados desejáveis para o uso em misturas betuminosas devem apresentar (Frazão & Paraguassu, 1998 *apud* Frazão, 2002):

- a) Boa tenacidade e boa resistência à abrasão, para superar as solicitações de desgaste promovidas pelo avanço das rodas dos veículos;
- b) Boa resistência à compressão, para suportar o peso dos veículos e distribuir os esforços para camadas inferiores do pavimento;
- c) Baixa alterabilidade, para resistir às ações intempéricas;

d) Boa adesividade a ligantes betuminosos, isto é, serem constituídos de minerais com características físico-químicas tais que garantam boa adesão ao betume;

e) Forma dos fragmentos a mais equidimensional possível, para diminuir o consumo do ligante e resistir melhor às solicitações mecânicas de impacto ou compressão.

Por ser um material que pode assumir formas e dimensões variadas, resultantes de efeitos mecânicos naturais ou dos processos de britagem, e variarem ainda quanto às suas propriedades intrínsecas, herdadas da rocha-mãe de onde se originaram, os agregados podem ser classificados sob diversos aspectos: quanto à natureza, tamanho, etc.

Segundo o DNER (1996), os agregados usados em pavimentação podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos (Figura 1).

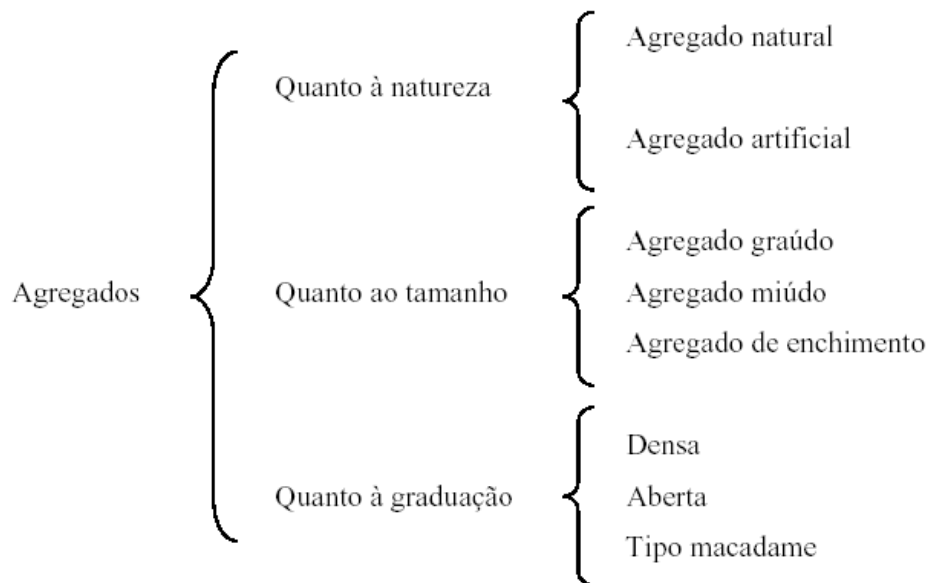


Figura 1: Classificação dos agregados para pavimentação

Fonte: DNER (1996)

a) 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, britas, areias, etc.

✓ *Agregados artificiais* – são aqueles em que os grãos são produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material: escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida.

b) Quanto ao tamanho individual dos grãos

✓ *Agregado graúdo* – é o material retido na peneira nº 10 (2,0 mm) como: britas, cascalhos, seixos, etc.

✓ *Agregado miúdo* – é o material que passa na peneira nº 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075 mm) como: pó-de-pedra, areia, etc.

✓ *Agregado de enchimento ou material de enchimento (fíler)* – é o material que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,075 mm) como: cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, etc.

c) 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 um 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 a menor dimensão.

2.1.2 Fíler

O fíler é um material finamente dividido, constituído de partículas minerais provenientes de agregados graúdos e/ou miúdos empregados nas misturas asfálticas. É um material que possui a maior parte de suas partículas (no mínimo 65%) com dimensão nominal inferior a 0,075 mm.

Caracteriza-se fíler o material que passa na peneira 200, ou seja, todo o material com diâmetro de 0,074 mm, geralmente é o pó de pedra, pó de calcáreo e eventualmente pó de cimento (Senço, 1997).

Segundo Ishai e Craus (1996) citado por Bertollo (2002), o fíler, nas misturas, se divide em duas partes: uma fica inerte, atuando como material de preenchimento de vazios; enquanto a outra parcela, denominada fíler ativo, fica em suspensão no ligante asfáltico.

Estudos conduzidos por Tayebali *et. al* (1994) citado por Bertollo (2002) indicam que o aumento da quantidade de fíler nas misturas asfálticas não compromete o desempenho em termos de deformação permanente. Ao contrário, resultados do estudo mostram que o aumento da quantidade de alguns tipos de fíler, dentro de certos limites, tem efeito benéfico em termos de deformação permanente, por aumentar a rigidez do ligante asfáltico.

Destaca-se sua grande importância na composição das misturas asfálticas, principalmente nas densas que têm estruturas formadas por esqueletos pétreos integrados por agregado graúdo e miúdo devidamente adensados em que os vazios deixados estão em partes preenchidos pelo conjunto coesivo formado pelo asfalto, no qual encontra-se disperso o fíler.

Neste tipo de mistura, o fíler enche os vazios deixados pelos agregados graúdos e miúdos, o que contribui para fechar as misturas, dando maior equilíbrio á estrutura e conseqüentemente, aumentando a estabilidade, sem que haja a necessidade de grandes aumentos no teor de asfalto (Takatu, 2004 *apud* Beck, 2005).

Segundo Hirsch (2007), as especificações nacionais possuem uma faixa 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, 1996) 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 esta relação é obtida através do ligante efetivo onde se desconta a parcela absorvida pelo agregado.

Vários trabalhos tem sido publicados nos últimos anos na literatura internacional, como Taybali *et al.* (1998), Kandhal (1992) e Ishai e Craus (1996) e pesquisas no Brasil como Santana (1995), Motta e Leite (2000), Leite e Motta (2002), Wesseling *et al.* (2003), Specht *et al.* (2006), que ressaltam 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 fíler reduz o consumo de ligante de projeto (considerando o 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.

Hirsch (2007) 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*.

2.1.3 Ligantes

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 (Specht, 2005).

O cimento asfáltico pode ser considerado um material viscoelastoplástico e termosensível, ou seja, possuem uma parcela viscosa, elástica e plástica; é sensível a 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 um sólido elástico, atuando como uma borracha: quando recebe um carregamento, o material se deforma, quando o carregamento é retirado, o material volta ao estado original.

Segundo o Instituto do Asfalto (2002), os ligantes asfálticos podem ser classificados em:

✓ *Cimento asfáltico de petróleo (CAP)* – Asfalto refinado que deve atender às especificações de pavimentação, aplicação industrial e finalidades especiais, sua penetração está, usualmente entre 40 e 300 dmm. Abrevia-se, freqüentemente: CAP.

✓ *Asfalto Diluído ou Dissolvido* – Cimento asfáltico que se liquefaz misturando-o a solventes (ou diluentes) do petróleo. Exposto a condições atmosféricas os diluentes evaporam-se, e o cimento asfáltico fica disponível para sua função cimentante e impermeabilizante, são divididos em:

a) *Asfalto Diluído de Cura Rápida (CR ou RC, em inglês)* – Asfalto diluído composto de cimento asfáltico e um diluente de alta volatilidade do tipo nafta ou gasolina;

b) Asfalto Diluído de Cura Média (CM ou MC, em inglês) – Asfalto diluído composto de cimento asfáltico e um diluente de média volatilidade do tipo querosene.

c) Asfalto Diluído de Cura Lenta (CL ou SC, em inglês) – Asfalto diluído composto de cimento asfáltico e óleos de baixa volatilidade;

✓ *Asfalto Emulsionado* – Segundo Specht (2005), o asfalto emulsionado é obtido através da combinação de água com 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 glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão.

Para 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.

São divididos em asfaltos emulsionados de ruptura:

a) Ruptura Rápida (RR) – Emulsões asfálticas aniônicas de ruptura rápida;

b) Ruptura Média (RM) – Emulsões asfálticas aniônicas de ruptura média;

c) Ruptura Lenta (RL) – Emulsões asfálticas aniônica de ruptura lenta;

✓ *Asfalto Modificado por Polímeros* – O asfalto modificado por polímeros é obtido através da mistura à alta temperatura do CAP e o polímero (SBS, SBR, EVA e outros), tem o propósito de melhorar as características do CAP.

As vantagens deste tipo de ligante são:

- Redução da susceptibilidade térmica;

- Redução do envelhecimento;
- Melhor adesão e coesão;
- Material mais resistente a trincamento por fadiga e afundamento de trilha de roda;

2.2 Revestimentos asfálticos

Revestimento é a camada superior do pavimento destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, a impermeabilizá-lo, a melhorar as condições do rolamento, no que se refere ao conforto e à segurança, e a transmitir, de forma atenuada, as ações do tráfego às camadas inferiores (DNER, 1996).

Segundo o DNER (1996) os revestimentos podem ser classificados como revestimentos flexíveis e pavimentos rígidos, conforme mostrado na Figura 2. Os revestimentos flexíveis são divididos em betuminosos e por calçamento.

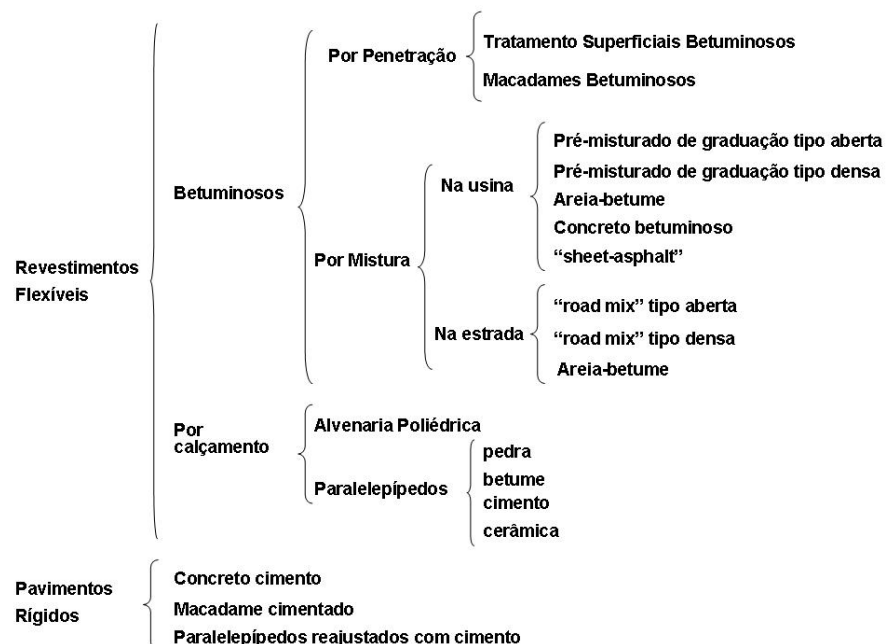


Figura 2: Classificação dos revestimentos para pavimentação

Fonte: DNER (1996)

Os revestimentos betuminosos são constituídos pela associação de agregados e materiais betuminosos. Esta associação pode ser feita de duas maneiras clássicas, apresentadas a seguir:

2.2.1 Revestimentos por Penetração

São 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 (DNER, 1996).

Esta dividido em dois tipos distintos: por penetração invertida e por penetração direta.

✓ *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 camada chama-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 agregados, 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 agregados, após repete-se mais duas vezes o procedimento).

✓ *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. O revestimento típico por penetração direta é o Macadame Betuminoso, que tem o processo construtivo similar ao tratamento duplo e comporta espessuras variadas e bem maiores, em função do número de camadas e das faixas granulométricas correspondentes. Com frequência, ele é usado como camada da base.

2.2.2 Revestimentos por Mistura

A mistura de agregados e ligante é realizada em usina e transportada posteriormente por caminhão a pista, onde é lançada com equipamento apropriado, denominado vibroacabadora.

Segundo o DNER (1996), o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes da compressão. Este pré-envolvimento quando é feito em usinas, resultam os “Pré-misturados propriamente ditos” e quando são feito na pista, chama-se “Pré-misturados na pista” (road mixes).

Conforme os seus respectivos processos construtivos, são adotadas ainda as seguintes designações:

✓ *Pré-misturado a frio* – é quando os tipos de agregados e de ligantes utilizados permitem que o espalhamento seja feito à temperatura ambiente;

✓ *Pré-misturado a quente* – é quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados na pista ainda quentes;

✓ *Concreto Betuminoso Usinado à Quente ou Concreto Asfáltico* – esta designação 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, vazios, etc. É também chamado de CA – Concreto Asfáltico.

2.3 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** – No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são feitos quase que exclusivamente em acordo com a Metodologia 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 *et al*, 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.

2.4 Produção de Misturas Asfálticas

A produção do concreto betuminoso usinado a quente, assim como as demais misturas betuminosas para as quais se exige um controle de dosagem e misturação bastante efetivo, são feitas em usinas próprias, cujo desenvolvimento tecnológico vem apresentando melhorias substanciais, a cada ano que passa. Em geral as usinas devem misturar de dois a três agregados, o que implica terem de montar de dois ou três silos. O uso de dois silos frios apenas pode apresentar problema de segregação do material mais fino, o que alteraria a granulometria do agregado.

São dois tipos de usinas:

✓ **Usinas descontínuas** – que apresentam produção descontínua; gravimétricas.

✓ **Usinas contínuas** – que apresentam produção contínua; as volumétricas e as TSM – Tambor – Secador – Misturador (Drum-Mixer).

As partes constituintes das usinas:

a) Silos frios – destinam-se a receber os diversos agregados que vão ser utilizados no preparo das misturas;

b) Correias transportadoras – a função é conduzir os agregados provenientes dos alimentadores para o pé do elevador a frio;

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

d) 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. É interessante frisar que o secador praticamente determina a capacidade de produção da usina.

e) 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.

f) 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.

g) 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.

h) 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.

i) 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.

j) *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, lança-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.

k) *Depósitos* – Servem para armazenar por pouco tempo a mistura, antes da descarga nos veículos transportadores.

2.5 Envelhecimento de Misturas Asfálticas

O betume como outras substâncias orgânicas é afetado pela presença de oxigênio, pela radiação ultravioleta e por variações de temperatura (Whiteoak, 1990) citadas por Morilha (2004).

Segundo Bell, Wieder & Fellin (1994) citado por Morilha (2004), o primeiro estudo sobre envelhecimento de ligante asfáltico foi realizado por A.W. Dow denominado *Asphalt Experiments at Washington*, no ano de 1903, este relatou que o aquecimento do ligante asfáltico reduzia o peso e a penetração do ligante asfáltico recuperado de misturas. Pesquisas mais amplas sobre o assunto começaram por volta de 1930.

O envelhecimento de um CAP pode ser definido como o processo pelo qual o ligante, durante sua estocagem, manuseio, aplicação e serviço, altera suas características químicas e reológicas resultando em aumento de sua consistência (Tonial, 2001).

Os principais fatores que influenciam no envelhecimento de um CAP a curto prazo, considerando o tempo durante a estocagem, manuseio e aplicação são a temperatura e o grau de exposição do ligante ao oxigênio do ar, portanto quanto maior a superfície específica e a temperatura de um ligante, maior seu grau de oxidação.

A Figura 3, extraída de Shell Bitumen Handbook (Whiteoak, 1990), evidencia de maneira clara a gravidade do fenômeno, o índice de envelhecimento é representado pela razão η^a / η_0 , onde η^a representa a viscosidade em uma data de condição de envelhecimento e η_0 , representa a viscosidade inicial do ligante asfáltico.

Segundo Tonial (2001), a Figura 3 apresenta que o envelhecimento do revestimento ocorre em três etapas: a primeira de maior impacto se dá quando da usinagem da mistura asfáltica e representa cerca de 60% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; a segunda, se dá durante a estocagem (comuns em usinas americanas de grande porte, mas não no Brasil), transporte, espalhamento e compactação, representando cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; na terceira etapa, o envelhecimento ocorre durante a vida útil do revestimento e se dá devido à ação do meio ambiente e representa cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante.

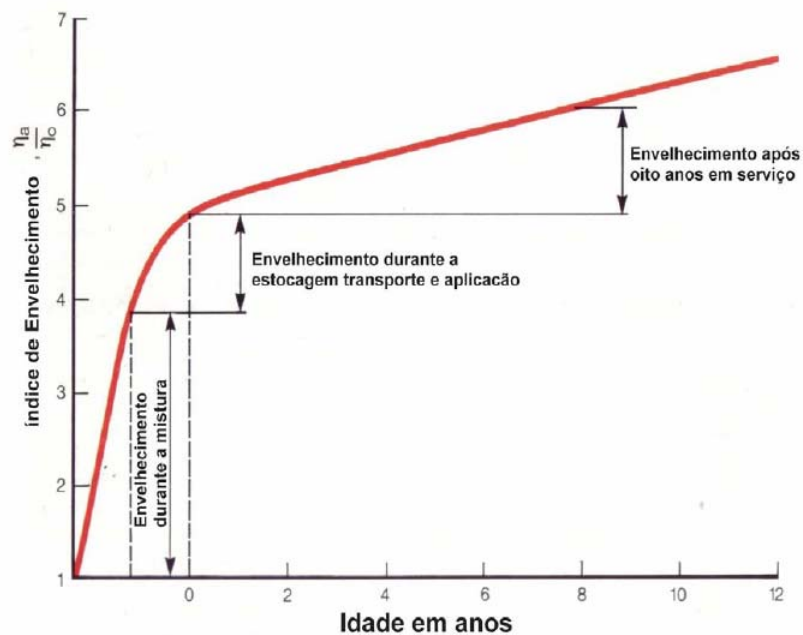


Figura 3: Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento (Whiteoak, 1990)

Whiteoak (1990) citado por Morilha (2004) descreve que são quatro os mecanismos principais responsáveis pelo envelhecimento do ligante asfáltico;

✓ **Oxidação** – Como outras substâncias orgânicas, o ligante asfáltico oxida lentamente quando em contato com o ar. Durante o processo de usinagem, a presença de oxigênio, a grande superfície específica dos agregados e as altas temperaturas dentro do pug-mill ou dentro do tambor-secador-misturador propiciam a oxidação;

✓ **Perda de voláteis** – A evaporação de componentes voláteis depende também da temperatura e da condição de exposição. Esta perda pode ser considerada baixa em ligantes asfálticos puros tendo em vista que estes têm baixos teores de voláteis;

✓ **Endurecimento físico** – Ocorre à temperatura ambiente e é atribuído à reordenação de moléculas e a cristalização de parafinas;

✓ **Endurecimento exsudativo** – Resulta do movimento dos componentes oleosos que exsudam do ligante asfáltico para dentro do agregado mineral. Esta é uma função tanto da tendência de exsudação do ligante como da porosidade do agregado.

Como o ligante asfáltico envelhece, isto resulta em um aumento da rigidez deste ligante e, conseqüentemente, da mistura asfáltica. Este efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura e pode ser considerado como um efeito benéfico do envelhecimento. Por outro lado, o envelhecimento pode resultar no desenvolvimento e/ou aceleração de vários tipos de problemas, tais como trincamento e fratura por fadiga, trinca térmica e deteriorização devido ao desgaste e à umidade, esforços que podem levar à falência da estrutura do pavimento (Bell, Wieder & Fellin, 1994; Mirza e Witczak, 1995) citado por Morilha (2004).

2.6 Mecanismos de degradação de pavimentos asfálticos

A degradação de pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, como conseqüência se dá o afundamento em 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 freqüentemente 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 solicitação 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).

2.6.1 Deformação Permanente

O estudo da deformação permanente de trilha de roda não é recente, conforme Croney & Croney (1997) citado por Merighi (1999), em 1912, em Londres, foi construído um simulador de tráfego com a finalidade de estudar o afundamento de trilha de roda, este modelo foi montado dentro de um edifício para que se pudesse controlar a temperatura, onde a máxima carga na roda era 1270 Kgf (2800 libras) podendo completar 80 mil ciclos em um período de 24 horas com uma média de 3000 ciclos por hora.

Em 1925, o “Bureau of Public Roads” dos Estados Unidos construiu a pista circular denominada *test track* (Figura 4), onde o objetivo era testar o desempenho de diversos materiais betuminosos quando submetido ao tráfego pesado.

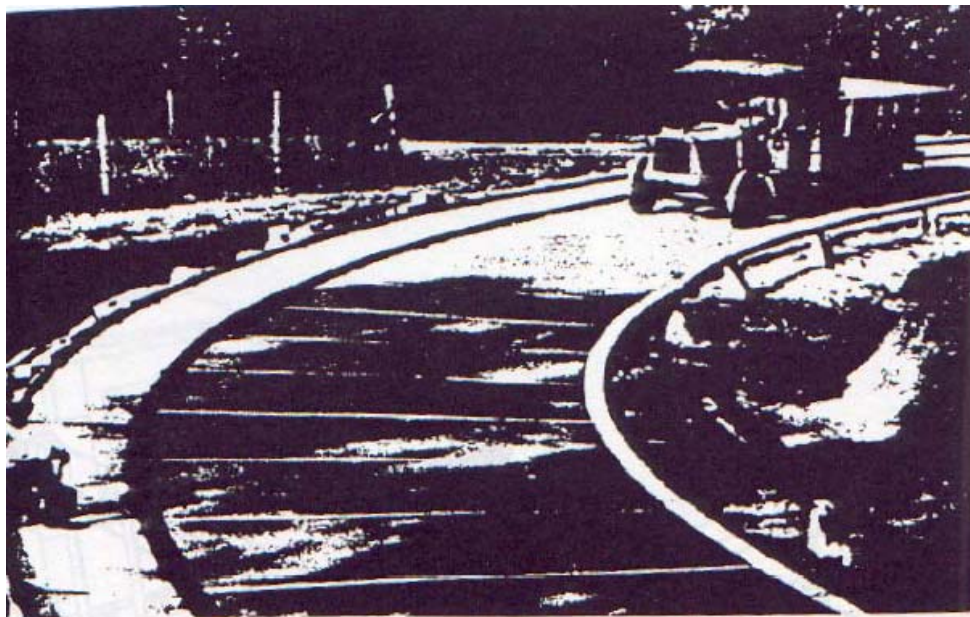


Figura 4: Test track construído pelo Bureau Public Roads em 1925 nos EUA (Croney & Croney, 1997 *apud* Merigui, 1999)

Desde do início do século, sempre houve a preocupação em estudar o desempenho em misturas asfálticas, em 1985, na Inglaterra, este estudo teve um grande impulso com a construção da pista de teste do “*Transport Research Laboratory*” com 25 m de comprimento e 10 m de largura, segundo Croney & Croney citado por Merigui (1999), este equipamento podia acomodar diversos testes em estruturas de pavimentos devidamente instrumentados para medir deformações permanentes na trilha de roda, tensões atuantes e deflexão.

Segundo a ASTM D 5340 (1998), define-se deformação permanente como uma depressão superficial na trilha de roda, podendo ocorrer o levantamento da bordas ao longo da trilha. A norma brasileira do DNER, de defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos, define afundamento como sendo a deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de solevamento.

O solevamento corresponde à diferença de altura entre o perfil original da superfície do pavimento, e a protuberância que se forma na lateral do sulco da roda.

Segundo Dowling (1993), citado por Merigui (1999), conceitua que a ruptura dos materiais pode ocorrer pelo aumento da deformação (Figura 5) ou por fratura. No primeiro caso, ocorrem mudanças de forma e ou tamanho até a condição de deterioração, atingindo o limite de utilização. A fratura é a separação em duas ou mais partes de uma superfície sólida.

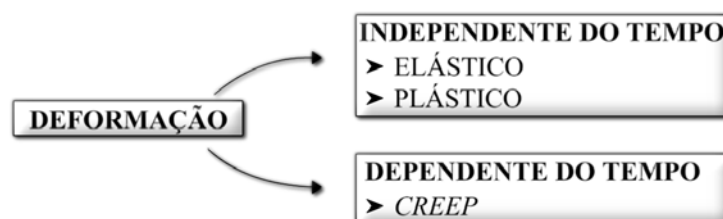


Figura 5: Tipos básicos de deformação (Dowling, 1993 *apud* Merigui, 1999)

A deformação elástica é aquela que cessa após a aplicação do carregamento e a deformação plástica é associada à distensão do material, é caracterizada segundo Halphen (1987) citado por Merigui (1999) por um valor residual de deformação após ser realizado o descarregamento dos esforços que provocaram a deformação permanente.

Supondo que a aplicação da carga seja instantânea, entende-se por *creep*, de acordo com Dowling (1993), a deformação que depende do tempo, Monteiro (1983) e Araújo (1961) citado por Merigui (1999), denominam essa deformação de fluência, assim, a deformação por *creep* ou fluência é a deformação acumulada durante determinado período de tempo.

Os ensaios de fluência podem ser estáticos ou dinâmicos, no ensaio estático, o corpo-de-prova é submetido a uma carga estática que causa uma deformação uniaxial, e o ensaio dinâmico diferencia do estático por utilizar uma carga pulsante, em ambos os ensaios, são utilizados LVDTs para medir o deslocamento.

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

A deformação permanente ou afundamento de trilha de roda (Figura 6) pode ser causado por:

- ✓ Compactação inadequada durante a construção;

✓ Mistura asfáltica ruim;

✓ Enfraquecimento dos materiais abaixo do pavimento, devido à infiltração d'água;

O afundamento de trilha de roda aparece quando ocorre:

✓ Consolidação, compactação ou movimento lateral das camadas abaixo dos revestimentos do pavimento, devido às cargas de tráfego;

✓ Compactação do revestimento asfáltico, devido às cargas de tráfego;

✓ Fluidez plástica do material asfáltico do revestimento, em função da estação quente;



Figura 6: Deformação permanente ou afundamento de trilha de roda

Fonte: DNIT – 2003

2.6.2 Trincamento por Fadiga

Fadiga é a degradação do material sob carregamento repetido, sendo reconhecida como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais de pavimentos. Ela é sempre iniciada nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, já que se verifica que os materiais são mais resistentes a carregamento repetidos de compressão do que de tração. Estas máximas tensões ou deformações ocorrem naturalmente na camada do pavimento com maior rigidez. Ressalta-se aqui a importância do estudo e caracterização deste material em laboratório para que se possa utilizar ferramentas de dimensionamento mais confiáveis (Wesseling, 2002).

O trincamento por fadiga é um conjunto de trincas, causadas por diminuição gradual da resistência da superfície do revestimento asfáltico, sob repetida ação das cargas de tráfego. Inicialmente, ocorrem trincas capilares paralelas, na direção do eixo da rodovia. Nas severidades média e alta, estão interconectadas formando uma malha, composta de peças de orientações variadas, com ângulos agudos e muitos lados. Normalmente, o maior lado dessas peças mede menos que 30 cm.

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.

O trincamento por fadiga (Figura 7) pode ser causado por:

- ✓ Colapso do revestimento asfáltico devido à repetida ação das cargas do tráfego;
- ✓ Sub-dimensionamento ou má qualidade da estrutura ou de uma das camadas do pavimento;
- ✓ Solo com baixa capacidade de suporte;

✓Envelhecimento (fim da vida do pavimento);

✓Asfalto duro e quebradiço (extraordinariamente);

As trincas por fadiga aparecem, primeiro, na superfície inferior da capa asfáltica, onde as forças de tração e os esforços são maiores sob a carga de roda. Essas fendas se propagam para a superfície, inicialmente como uma ou mais trincas longitudinais paralelas. As trincas se conectam, depois de repetida ação das cargas do tráfego, formando peças que lembram a pele de um jacaré. O trincamento por fadiga, no seu estágio final de evolução, dá origem ao defeito denominado “panela”.

As condições ambientais (temperatura e umidade) podem acelerar o início e a propagação do trincamento. A água superficial penetra pelas fendas, enfraquecendo as camadas inferiores e o solo. Se a drenagem lateral for insuficientemente, o trincamento por fadiga aparecerá primeiro na trilha de roda externa.



Figura 7: Trincamento por fadiga

Fonte: DNIT – 2003

Segundo Pinto (1991), os equipamentos laboratoriais para ensaios dinâmicos permitem a aplicação de carregamentos cíclicos ao material sob o regime de tensão constante ou controlada e de deformação constante ou controlada.

No ensaio de tensão controlada (TC), o critério de fadiga está associado a fratura da amostra. A tensão é mantida de forma constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo-de-prova. Portanto a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à fratura completa da amostra.

O ensaio de deformação controlada (DC) envolve a aplicação de cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que conduz a uma diminuição da carga aplicada, para manter a deformação constante.

2.6.3 Efeito Deletério da Água

A perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de uma 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 mecanismos estão intimamente relacionados e, então, o dano causado pela umidade em misturas asfálticas é a combinação entre estes dois fatores (Specht *et al*, 2005).

Inúmeros fatores influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade. Hicks (1991) resumizou e classificou estes fatores que estão apresentados na Tabela 2. 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 (Specht *et al*, 2005).

Tabela 2: Fatores intervenientes nas características de adesividade

Fonte: Hicks 1991

Fator	Característica Desejável
1. Agregados a) textura superficial b) porosidade c) mineralogia d) cobertura do agregado por pó e) umidade superficial f) composição química superficial g) filer mineral	áspero depende do tamanho do poro agregados básicos são mais resistentes limpo seco capaz de formar pontes de hidrogênio aumenta a viscosidade do ligante
2. Cimento Asfáltico a) viscosidade b) química c) espessura filme	alta nitrogênio e fenóis alta
3. Tipo de Mistura a) vazios b) granulometria c) teor de ligante	muito baixo ou muito alto muito aberta ou muito densa alto
4. Condições Climáticas a) temperatura b) precipitações durante construção c) precipitações após construção d) ciclos de gelo/degelo	quente nenhuma mínima mínimo
5. Tráfego a) volume de tráfego	baixo tráfego

A perda de adesividade em misturas asfálticas é um problema comum nas nossas rodovias, conforme representado na Figura 8, sendo assim um fator importante e que devemos levar em consideração na realização de um projeto de misturas asfálticas.

**Figura 8:** Efeito deletério da água

Fonte: Mallick (2005)

A Metodologia Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) e a Metodologia Cantabro (CEC 325/86) determinam o comportamento mecânico das misturas em que as amostras são submetidas a condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada ou simular o que ocorre em campo.

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação do Estudo

Está pesquisa é laboratorial e de ordem quantitativa, uma vez que serão moldadas as amostras, cujos resultados serão tabelados e graficados, para realizar a análise dos resultados.

3.2 Planejamento da Pesquisa

A partir da determinação dos parâmetros da dosagem Marshall de três misturas de concreto asfáltico com diferentes tipos de ligantes asfálticos: ligante convencional (CAP 50/70), asfalto modificado por borracha (Ecoflex B) e asfalto modificado com polímero SBS (Stylink), determinou-se o teor de ligante de projeto, e então moldaram-se amostras de referência (sem envelhecimento) e amostras envelhecidas (2 e 4 horas) de cada mistura, alterando o percentual de ligante com 0,3% a mais e a menos em relação ao teor de ligante de projeto (conforme preconizado na ASTM D 6926-04) para a verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ensaio de módulo de resiliência) e para verificação das propriedades de abrasão (ensaio da metodologia Cantabro).

Na Tabela 3, estão apresentados resumidamente os números de amostras que foram preparadas para a realização de todos os ensaios.

Tabela 3: Número de amostras

Envelhecimento	Tipo de Ligante	Quant. de Ligante	Teor de Ligante (%) ↓	Número de Amostras		
				Mr ⁵	Rt ⁶	PM ⁷
0 horas	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴ - 0,3%	5,02	3	1	3
	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴	5,32	3	1	3
	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴ + 0,3%	5,62	3	1	3
2 horas	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴ - 0,3%	5,02	3	1	3
	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴	5,32	3	1	3
	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴ + 0,3%	5,62	3	1	3
4 horas	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴ - 0,3%	5,02	3	1	3
	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴	5,32	3	1	3
	CAP ¹ 50/70	TLP ⁴ + 0,3%	5,62	3	1	3
0 horas	AB ²	TLP ⁴ - 0,3%	6,36	3	1	3
	AB ²	TLP ⁴	6,66	3	1	3
	AB ²	TLP ⁴ + 0,3%	6,96	3	1	3
2 horas	AB ²	TLP ⁴ - 0,3%	6,36	3	1	3
	AB ²	TLP ⁴	6,66	3	1	3
	AB ²	TLP ⁴ + 0,3%	6,96	3	1	3
4 horas	AB ²	TLP ⁴ - 0,3%	6,36	3	1	3
	AB ²	TLP ⁴	6,66	3	1	3
	AB ²	TLP ⁴ + 0,3%	6,96	3	1	3
0 horas	AP ³	TLP ⁴ - 0,3%	5,05	3	1	3
	AP ³	TLP ⁴	5,35	3	1	3
	AP ³	TLP ⁴ + 0,3%	5,65	3	1	3
2 horas	AP ³	TLP ⁴ - 0,3%	5,05	3	1	3
	AP ³	TLP ⁴	5,35	3	1	3
	AP ³	TLP ⁴ + 0,3%	5,65	3	1	3
4 horas	AP ³	TLP ⁴ - 0,3%	5,05	3	1	3
	AP ³	TLP ⁴	5,35	3	1	3
	AP ³	TLP ⁴ + 0,3%	5,65	3	1	3
Total de amostras				189		

Nota: ¹Cimento Asfáltico de Petróleo; ²Asfalto-Borracha; ³Asfalto-Polímero; ⁴Teor de Ligante de Projeto; ⁵Ensaio de Módulo de Resiliência; ⁶Ensaio de Resistência à Tração; ⁷Perda de Massa;

3.3 Materiais Utilizados na Pesquisa

Todos os materiais utilizados na pesquisa são representativos da realidade regional, ou seja, são aqueles disponíveis para execução de obras nesta região do estado.

3.3.1 Agregados Minerais

O material utilizado como agregado pétreo é o usado comumente em obras de pavimentação na cidade de Ijuí e consiste de brita de basalto provenientes da pedreira Tabille

da cidade de Ijuí-RS, sendo sua jazida localizada na cidade de Coronel Barros-RS e areia de várzea proveniente da região de Santa Maria.

Os agregados coletados na pedreira foram submetidos a ensaios laboratoriais no LEC da Unijuí para comprovar sua qualidade. Os resultados dos ensaios estão apresentados no Quadro 1. Os resultados dos ensaios de análise granulométrica (média de duas determinações) estão apresentados na Tabela 4 e graficados na Figura 9.

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>	DAER/RS – EL 105/01	1,228%	---
<i>Massa Específica Real do Grão</i>	DAER/RS – EL 105/01	3,033kN/m ³	2,973 kN/m ³
<i>Massa Específica Aparente do Grão</i>	DAER/RS – EL 105/01	2,924 kN/m ³	---
<i>Índice de Lamelaridade</i>	DAER/RS – EL 108/01	21,8	---
<i>Desgaste ou Perda à Abrasão¹</i>	DAER/RS – EL 103/01	28%	---

Nota: ¹ Ensaio realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

Tabela 4: Resultado do ensaio de granulometria

pen.	mm	(% passante)			
		Pó-de-pedra	Areia	Pedrisco	Brita 3/4
3/4in	19,10	100,00	100,00	100,00	94,81
1/2in	12,70	100,00	100,00	100,00	7,88
3/8in	9,50	100,00	99,92	100,00	2,38
4	4,76	91,20	99,87	61,14	0,88
8	2,38	65,13	99,25	17,79	0,87
30	0,59	26,50	91,48	4,83	0,86
50	0,297	18,84	21,87	4,08	0,84
100	0,149	14,27	2,37	3,56	0,81
200	0,074	10,70	0,75	3,04	0,75

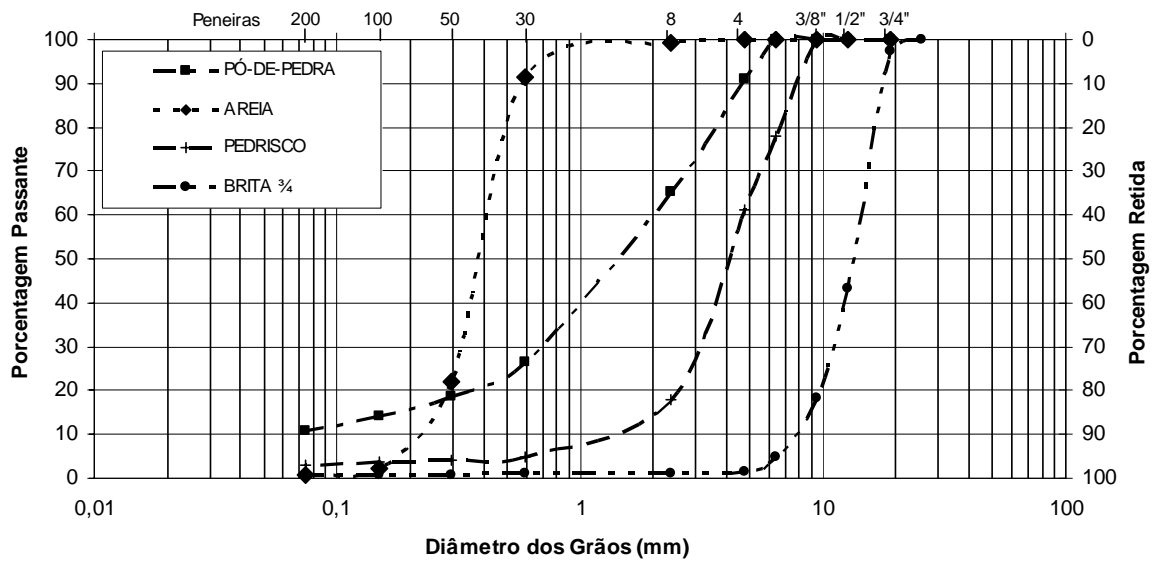


Figura 9: Distribuição granulométrica

3.3.2 Ligantes

Os ligantes asfálticos utilizados neste estudo são o ligante convencional (CAP 50/70), ligante modificado com borracha (Ecoflex B) e o ligante modificado com polímero SBS (Stylink).

As propriedades dos ligantes estão descritas nos Quadros 2, 3 e 4 e no anexo A.

Quadro 2: Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)

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

Quadro 3: Propriedades do ligante modificado com borracha (Ecoflex B)

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>	
		<i>Esp.</i>	<i>Resultado</i>
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	50 - 70	60
Penetração (0,1mm)	NBR 6576	25 - 75	54
Visc. Saybolt-Furol @175 °C (s)	MB 517	---	---
Recuperação Elástica	---	40 - 70	63
Ductilidade 25°C	NBR 6293	---	---
Massa Específica (g/cm ³)	DNER -M 16/64	---	1,030
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341	235	265
Viscosidade Brookfield @175 °C (Pa.s)	ASTM D 2669-87	1000 - 2000	1650

Quadro 4: Propriedades do ligante modificado com polímero (Stylink)

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Asfalto-Polímero</i>	
		<i>Esp.</i>	<i>Resultado</i>
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	60 - 85	66
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	45 - 80	70
Visc. Brookfield 135 °C	MB 517	850 - 3000	1115
Visc. Brookfield 150 °C	MB 517	2000 máx.	543
Visc. Brookfield 177 °C	MB 517	1000 máx.	266
Ductibilidade 25°C	NBR 6293	85 min.	93
Massa Específica (g/cm ³)	DNER - M 16/64	---	1,007
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341	235 min.	>35

Na Tabela 5 estão apresentadas as temperaturas de mistura e de compactação de cada mistura e, concreto asfáltico que foram determinados através do ensaio de viscosidade.

Tabela 5: Temperaturas de mistura e de compactação

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

3.3.3 Misturas Asfálticas

Na Tabela 6 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 esta a mais utilizada no Estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 10 está apresentado o ajuste granulométrico da mistura.

Tabela 6: Especificação e composição granulométrica da mistura – Faixa B DAER/RS

Especificação e composição granulométrica da mistura - Faixa B DAER/RS					
Peneira	mm	Limite da faixa	Centro faixa	Faixa de Trabalho	Mistura
3/4"	19,1	100,0	100	100 - 100	100
1/2"	12,7	80 - 100	90	84 - 96	90
3/8"	9,5	70 - 90	80	74 - 86	80
n 4	4,76	50 - 70	60	54 - 66	60
n 8	2,38	35 - 50	43	38,5 - 48,5	42
n 30	0,59	18 - 29	24	19,5 - 29	23
n 50	0,297	13 - 23	18	14 - 23	18
n 100	0,149	8 - 16	12	9 - 16	12
n 200	0,074	4 - 10	7	5 - 10	7

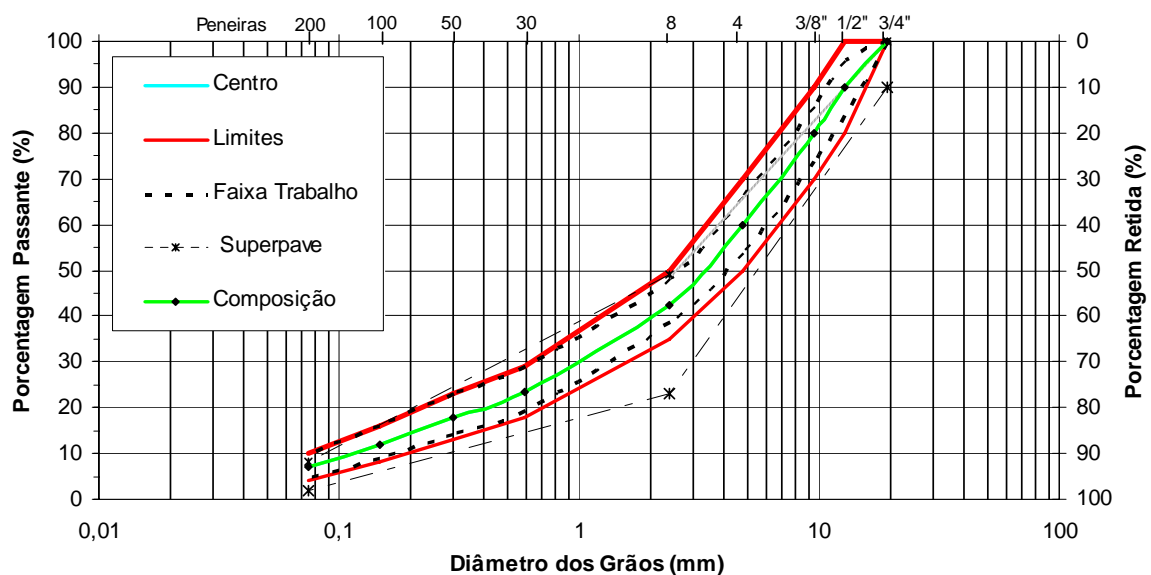


Figura 10: Ajuste granulométrico da mistura

A dosagem e a moldagem das amostras, juntamente com a obtenção dos parâmetros de dosagem Marshall (DNER – ME 043/95 e DAER/RS – ES – P 16/98) foram realizadas no LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ. Os resultados da dosagem das três misturas estão apresentados no Quadro 5. O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995a) e de acordo com ASTM D6926-04 e ASTM D 6927-05, nota-se que o volume de vazios (VV) adotado foi de 4% como critério de dosagem.

Quadro 5: Resultados da Dosagem Marshall

<i>Propriedade</i>	<i>Ligante</i> →	<i>CAP 50/70</i>	<i>AB</i> ¹	<i>AP</i> ²
	<i>Especificação 16/91 DAER</i> ↓			
Teor de Betume (%)	--	5,32	6,66	5,35
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	78,00	81,00	78,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	17,70	20,40	17,75
Densidade Máxima Teórica (kN/m ³)	--	2,69	2,64	2,69
Densidade Aparente (kN/m ³)	97% (mínimo)	2,58	2,54	2,59
Estabilidade (kgf)	>800	1080	1110	1560
Fluência (1/100 in)	8 a 16	11	13	14
Relação Est/Fluência (kgf.m)	--	64	82	130
Relação Filler/Betume (adm)	--	1,32	1,05	1,31

Nota: ¹Asfalto-Borracha; ²Asfalto-Polímero

3.4 Preparação das Amostras

Após a coleta dos agregados, este material foi separado em peneiras (retida na: # 1/2, # 3/8, # 4, # 8, # 30, # 50, # 100 e # 200), após foram lavados e pesados para moldar as amostras de acordo com a Metodologia Marshall, em síntese, a sistemática de procedimentos do método consiste no seguinte: molda-se, por compactação a quente, uma série de corpos-de-prova com a mistura de agregados e ligante asfáltico, dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois foram armazenados, ao ar livre, durante 24 horas; em seguida, esses corpos-de-prova foram desmoldados, medidos e pesados. A Figura 11 apresenta a seqüência de preparação das amostras.



Figura 11: Sequência da dosagem

O tempo e a temperatura de envelhecimento utilizada tentam simular o processo de transporte da massa e seguem as sugestões do trabalho de Ayrei (2003) e da norma ASTM D6926-04 que recomenda que a temperatura de envelhecimento esteja entre 8°C e 11°C acima da temperatura de compactação.

3.5 Procedimento de Ensaio e Descrição de Equipamentos

Nesta seção serão descritos os métodos de ensaio utilizados no decorrer da pesquisa.

3.5.1 Ensaio de Compressão Diametral

Segundo Bernucci *et. al* (2007), a resistência à tração (R_t) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e misturas asfálticas. Devido à dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente, diversos métodos indiretos têm sido desenvolvido para a sua determinação (Carneiro, 1943; Hawkes e Mellor, 1970; Roberts, 1977; Lama & Vutukuri, 1978). O ensaio tem sido adotado desde 1972 para a caracterização de misturas asfálticas.

O ensaio de compressão diametral 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. É conhecido em vários centros de pesquisa no exterior como “ensaio brasileiro” (Medina, 1997).

Atribui-se a Schmidt, da CHEVRON, Califórnia, aplicação deste ensaio sob carregamento dinâmico a misturas betuminosas (Medina, 1997).

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral segue a norma DNER-ME 138/94 e a velocidade de avanço do carregamento é de 0,8mm/s; e a Equação 1 é utilizada para o cálculo de R_t :

$$R_t = \frac{2F}{\pi.d.h} \quad (1)$$

onde:

R_t = Resistência à tração

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 (Figura 12); 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.



Figura 12: Equipamento de ensaio de compressão diametral

O estado biaxial de tensões, gerado na amostra durante o carregamento, está esquematicamente apresentado na Figura 13. Esta configuração de sollicitação é verificada também nos ensaios de módulo de resiliência (Specht, 2004).

A norma do DNIT (031/2004-ES) especifica o valor de R_t mínimo de 0,6 MPa para concretos asfálticos (Bernucci *et. al*, 2007).

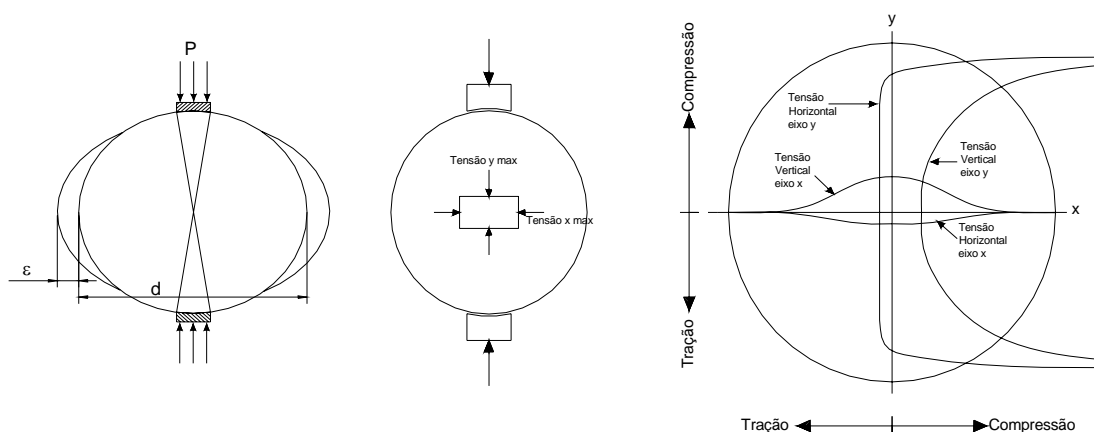


Figura 13: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro
 Fonte: Specht (2004)

O ensaio foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS à temperatura de 25°C conforme preconizado na norma.

3.5.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem. O órgão rodoviário da Califórnia havia começado, em 1938, as medições de deflexões de pavimentos sujeitos ao tráfego, segundo relataram Porter e Barton, foram utilizados sensores mecano-eletromagnéticos com a bobina instalada no revestimento e o núcleo preso à haste fincada em profundidade, ao todo 400 sensores, numa campanha de medições em 1951. É desta época o estabelecimento de valores máximos admissíveis de deflexões para a vida de fadiga satisfatória de diferentes tipos de pavimentos (Medina, 1997).

Hveem entendia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial o subleito, preferiu usar-se este termo ao invés de deformação elástica sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores que nos sólidos elásticos (concreto, aço, etc.) (Medina, 1997).

O termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações (Medina, 1997).

Segundo Marques *et al.* (2006) a previsão das tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura de um pavimento passou a ser necessária e de fundamental importância a partir do surgimento dos métodos de bases teórico-experimentais para dimensionamento de pavimentos. O conhecimento das características de respostas dos materiais as tensões impostas, especialmente o Módulo de Resiliência (M_r) de misturas asfálticas tornou-se extremamente necessário e tem sido estabelecido por meio de ensaios de laboratório ou por correlações.

O módulo de resiliência é determinado através das prescrições do DNER-ME 133/94. O equipamento utilizado, conforme Figura 14 e 15 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).

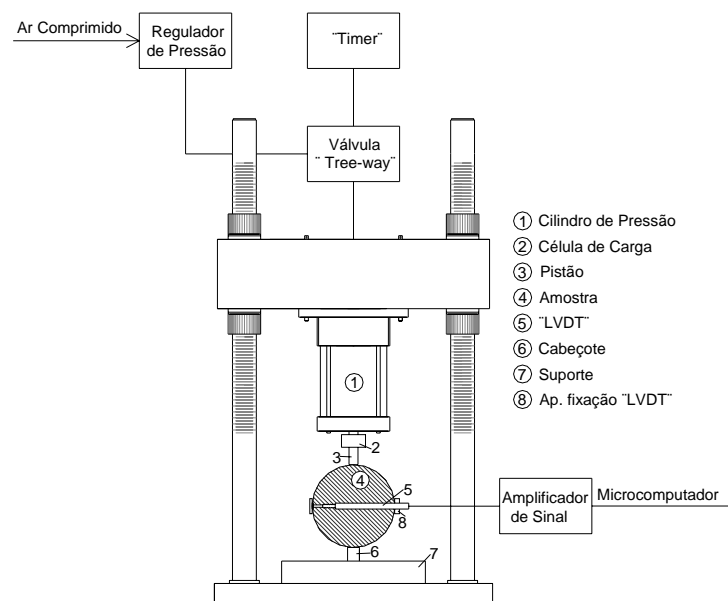


Figura 14: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência
 Fonte: Specht (2004)



Figura 15: Equipamento de módulo de resiliência da UFRGS

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 L.V.D.T.;
- colocar o corpo-de-prova sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos;
- fixar e ajustar os transdutores L.V.D.T. 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 L.V.D.T., ligado a um microcomputador (Figura 16). O ensaio é realizado em duas direções: após a execução do ensaio a amostra é rotacionada em 90° e o ensaio é novamente conduzido.



Figura 16: Equipamento de módulo de resiliência ligado ao microcomputador

Na Figura 17 estão apresentados o pulso de carga e o pulso de deformação versus tempo, típicos dos ensaios realizados.

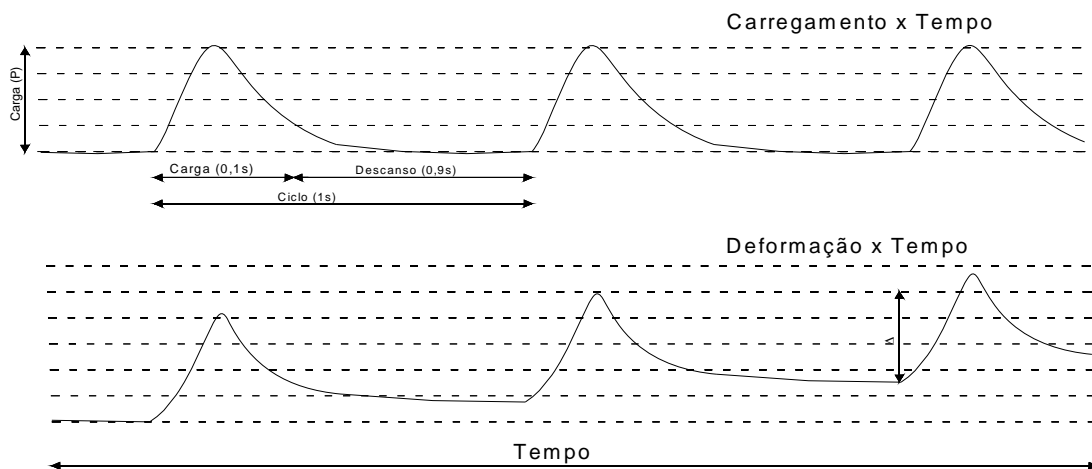


Figura 17: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência
Fonte: Specht (2004)

A Equação 2 utilizada para determinar o módulo de resiliência é a:

$$Mr = \frac{P}{\Delta.h} \cdot (0,2692 + 0,9976 \cdot \mu) \quad (2)$$

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.

O ensaio foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS, o ensaio foi executado à temperatura de 25°C.

3.5.3 Resistência ao Desgaste - Metodologia Cantabro

Segundo Bernucci *et. al* (2007), o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento é denominado desgaste, sendo uma patologia comum em revestimentos brasileiros.

A metodologia Cantabro foi selecionada para avaliar 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 foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS e executado à 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 18 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 18: 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 Equação 3:

$$PM = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad (3)$$

onde:

PM = perda no ensaio de desgaste Cantabro (%);

P = peso inicial do corpo-de-prova (g);

P' = peso após a realização do ensaio (g).

O ensaio foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS.

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.

A organização do capítulo se deu em função das diversas variáveis de resposta avaliadas e analisadas: comportamento mecânico (resistência à tração, módulo de resiliência e a relação M_r/R_t), propriedades de abrasão (ensaio metodologia Cantabro).

4.1 Comportamento Mecânico

4.1.1 Resistência à tração

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, uma das metodologias mais empregada é o ensaio de tração por compressão diametral (Medina *et. al*, 2005; Bernucci *et. al*, 2007; Hirsch, 2007).

Para cada mistura em estudo com diferentes tipos de ligante, percentuais de ligante e tempo de envelhecimento, moldaram-se quatro corpos-de-prova. A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados e o Anexo B os resultados obtidos através do ensaio de resistência à tração.

Tabela 7: Valores de resistência à tração em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento

Mistura/%ligante	Resistência à tração (MPa)					
	0 horas		2 horas		4 horas	
	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴
CAP ¹ - 5,02%	1,67	0,14	1,38	0,11	1,47	0,08
CAP ¹ - 5,32%	1,33	0,03	1,85	-	1,69	-
CAP ¹ - 5,62%	1,63	0,11	1,68	0,19	1,69	0,10
AP ² - 5,05%	2,00	0,08	1,49	0,05	1,73	0,10
AP ² - 5,35%	1,67	0,04	1,88	-	1,91	-
AP ² - 5,65%	1,87	0,05	1,71	0,11	1,82	0,21
AB ³ - 6,36%	1,17	0,09	1,00	0,11	0,74	0,44
AB ³ - 6,66%	0,90	0,12	0,88	0,07	1,20	0,08
AB ³ - 6,96%	1,01	0,10	0,95	0,15	1,05	0,25

Nota: ¹Cimento Asfáltico de Petróleo; ²Asfalto-Polímero; ³Asfalto-Borracha; ⁴Desvio-Padrão

A Figura 19 apresenta os valores de resistência à tração em relação ao tipo de mistura, percentual de ligante e tempo de envelhecimento. Analisando os resultados apresentados, verificou-se que para misturas com menos 0,3% do teor de ligante de projeto, as misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero há uma redução dos valores de 0 horas (1,67 e 2,00MPa) para 2 horas (1,38 e 1,49MPa) de envelhecimento e um aumento dos valores para 4 horas (1,47 e 1,73MPa), as misturas com Asfalto-Borracha há um redução dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento.

As misturas com teor de ligante de projeto (referência) com CAP 50/70 ocorre um aumento dos valores de 0 horas (1,33MPa) para 2 horas (1,85MPa) de envelhecimento e uma redução para 4 horas (1,69MPa), as misturas com Asfalto-Polímero há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento, para misturas com asfalto-borracha há uma redução dos valores de 0 horas (0,90MPa) para 2 horas (0,88MPa) de envelhecimento e um aumento dos valores para 4 horas (1,20MPa).

As misturas com mais 0,3% do teor de ligante de projeto, verificou-se que para misturas com CAP 50/70 há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento, para misturas com asfalto-polímero e asfalto-borracha há uma redução dos valores de 0 horas (1,87 e 1,01MPa) para 2 horas (1,71 e 0,95MPa) de envelhecimento e um aumento dos valores para 4 horas (1,82 e 1,05MPa).

Os valores médios de R_t indicam que as misturas com maiores valores foram a com asfalto-polímero (1,79MPa), seguida do CAP 50/70 (1,60MPa) e do asfalto-borracha (1,00 MPa).

Para misturas com menos 0,3% de ligante do teor de projeto há uma redução dos valores médios de R_t em relação ao tempo de envelhecimento para todas as misturas, este valor de 0,3% é aceito pelas especificações, mas esta variação pode levar, na prática, a um envelhecimento precoce das misturas.

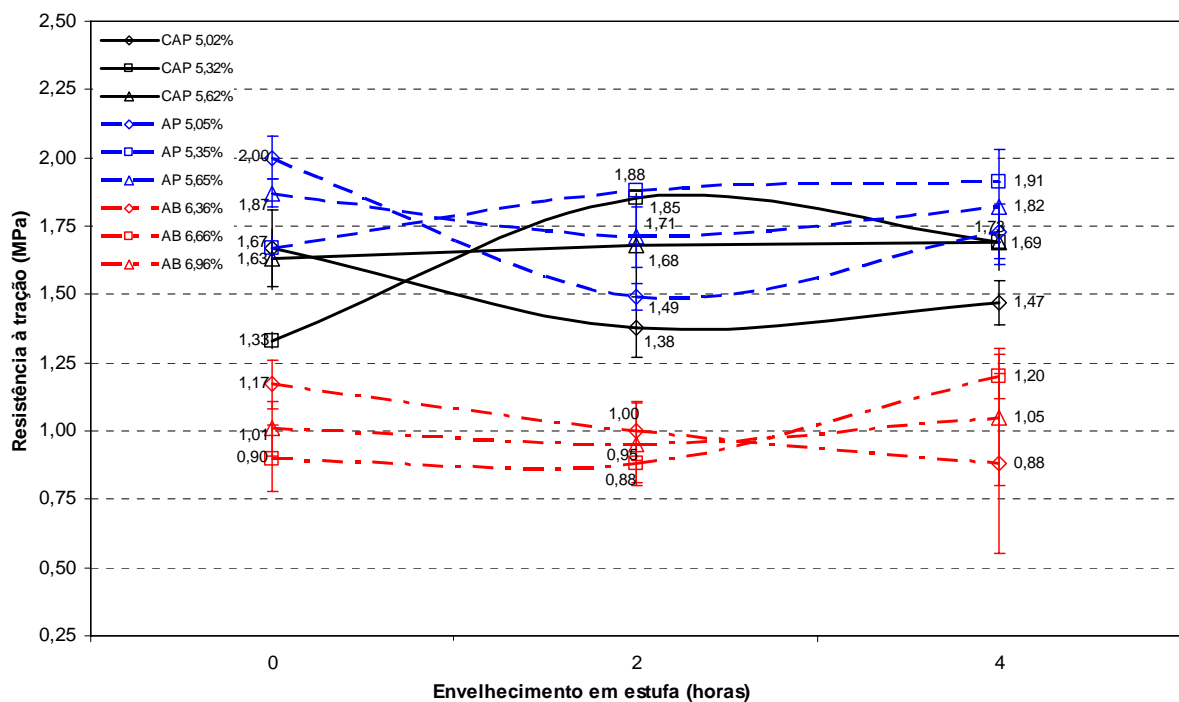


Figura 19: Resistência à tração *versus* envelhecimento em estufa

A partir dos dados coletados nos ensaios de resistência à tração, foi realizada uma análise estatística dos dados do tipo ANOVA utilizando o programa *Statistica for Windows* (versão 4.3B) para determinar quais as variáveis independentes influenciam na variável de resposta e determinar o modelo de regressão para prever a variável de resposta a partir das variáveis independentes.

As variáveis independentes são viscosidade Brookfield (VB), teor de ligante (TL), ponto de amolecimento (PA), penetração (PN), tempo de envelhecimento (TE) e as variáveis de resposta são resistência à tração (R_t), módulo de resiliência, relação Mr/R_t e perda de massa.

A Equação 4 representa a análise de regressão linear múltipla correlacionando a variável dependente R_t com as variáveis independentes, considerando os 112 dados coletados no ensaio de resistência à tração. As variáveis que influenciam a resistência à tração (conforme ANOVA) são a penetração (PN) e a viscosidade (VB), conforme apresentado na Figura 20, indicando que as características físicas do ligante são bastante importante na propriedade R_t .

$$R_t = 1,239477 + 0,014706.PN - 0,000332.VB - 0,054435.TL - 0,001861.PA - 0,002125.TE \quad (4)$$

onde: R_t = Resistência retida à tração;

VB = Viscosidade Brookfield @ 177°C;

TL = Teor de ligante;

PA = Ponto de amolecimento;

PN = Penetração;

TE = Tempo de envelhecimento;

O coeficiente de determinação R^2 é 0,70, R^2_{ajust} é 0,68, e o erro padrão de estimativa, ε_p , é de 0,22 MPa para a R_t , conforme verificado na Figura 20.

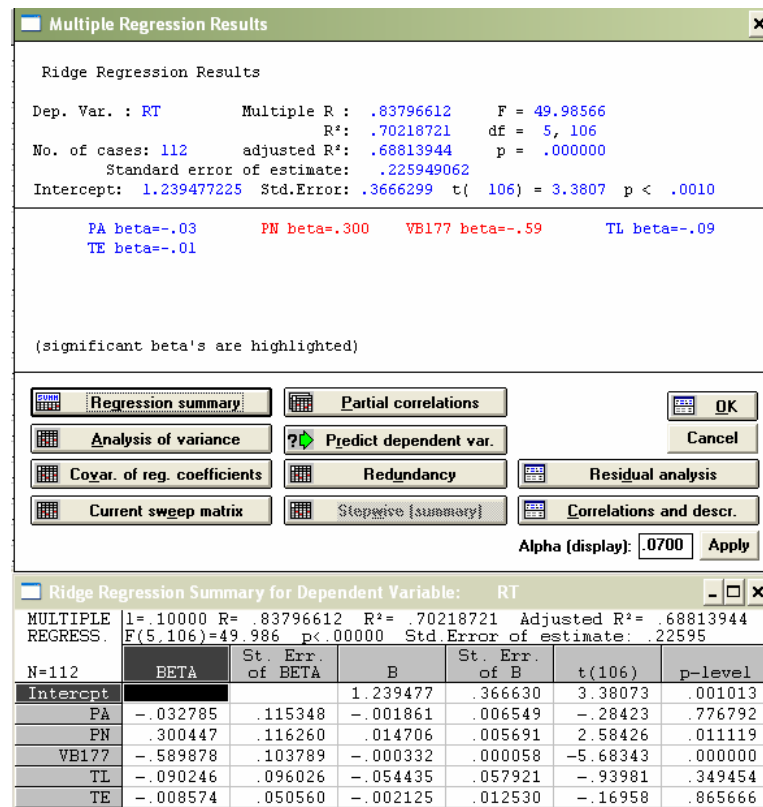


Figura 20: Análise de regressão linear múltipla de R_t

A Figura 21 apresenta os valores obtidos através da modelagem estatística *versus* os valores obtidos no ensaio de resistência à tração (Rt) e a Figura 22 a superfície de resposta para a resistência à tração (Rt), onde as variáveis independentes foram codificadas (-1 a 1) para normalizar as escalas x e y. Os resultados demonstram que as variáveis independentes que influenciam a Rt é a penetração e a viscosidade, sendo que a penetração é proporcional aos valores de Rt, ou seja, aumentando os valores de penetração aumenta os resultados de Rt, e a viscosidade é inversamente proporcional a Rt, ou seja, diminuindo a viscosidade aumenta a Rt.

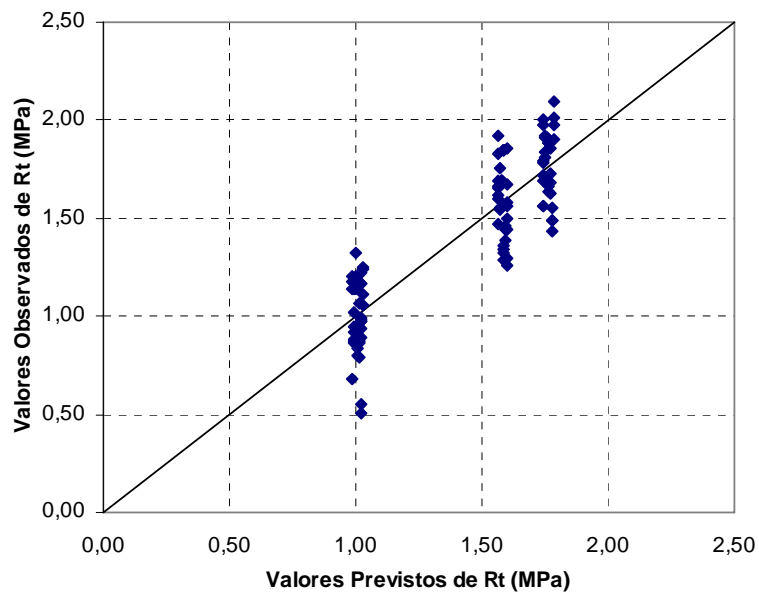


Figura 21: Valores previstos *versus* observados para variável Rt

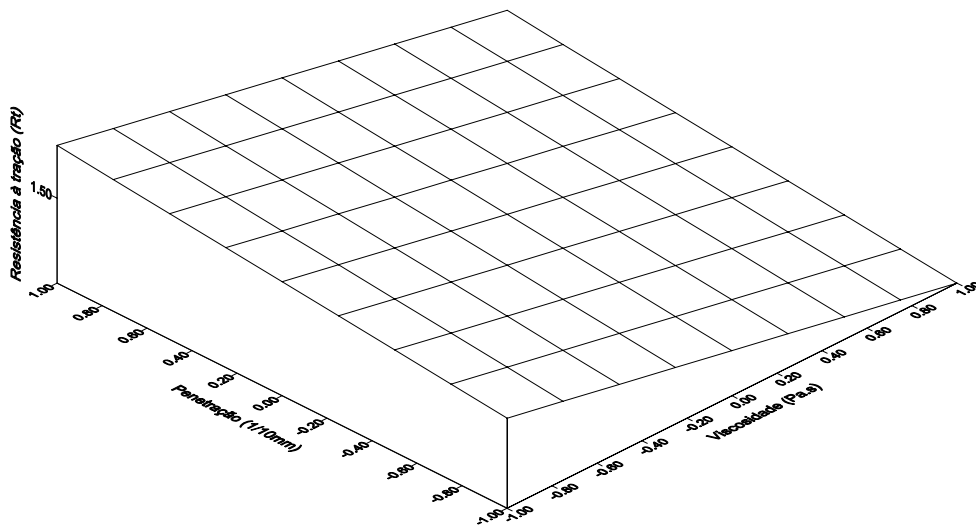


Figura 22: Superfície de resposta da variável Rt

4.1.2 Módulo de Resiliência

Para cada mistura em estudo ensaiaram-se três corpos-de-prova. A Tabela 8 apresenta o resumo dos resultados e o Anexo B os resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência.

Tabela 8: Valores de módulo de resiliência em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento

Mistura/%ligante	Módulo de Resiliência (MPa)					
	0 horas		2 horas		4 horas	
	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴
CAP ¹ - 5,02%	12514	341	9608	1216	9911	278
CAP ¹ - 5,32%	7848	850	9259	507	9898	244
CAP ¹ - 5,62%	9757	410	10721	1434	11470	1773
AP ² - 5,05%	10689	1000	7472	1437	8248	373
AP ² - 5,35%	6263	373	9924	1074	10489	817
AP ² - 5,65%	7713	561	8171	1068	8640	1117
AB ³ - 6,36%	5359	712	6048	1381	4046	2343
AB ³ - 6,66%	3708	221	4190	333	6521	1338
AB ³ - 6,96%	4597	681	5541	2120	5525	343

Nota: ¹Cimento Asfáltico de Petróleo; ²Asfalto-Polímero; ³Asfalto-Borracha; ⁴Desvio-Padrão

A Figura 23 apresenta os valores de módulo de resiliência em relação ao tipo de mistura, percentual de ligante e tempo de envelhecimento. Analisando os resultados apresentados, verificou-se que para misturas com menos 0,3% do teor de ligante de projeto, as misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero há uma redução dos valores de 0 horas (12514 e 10689MPa) para 2 horas (9608 e 7472MPa) de envelhecimento e um aumento dos valores para 4 horas (9911 e 8248MPa), as misturas com Asfalto-Borracha ocorre um aumento dos valores de 0 horas (5359MPa) para 2 horas (6048MPa) de envelhecimento e uma redução para 4 horas (4046MPa).

As misturas com teor de ligante de projeto (referência) com CAP 50/70, Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento.

As misturas com mais 0,3% do teor de ligante de projeto, verificou-se que para misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento, para misturas com asfalto-borracha há um aumento dos valores de 0 horas

(4597MPa) para 2 horas (5541MPa) de envelhecimento e uma redução dos valores para 4 horas (5525MPa).

Os valores médios de Mr indicam que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70 (10110MPa), seguida do asfalto-polímero (8623MPa) e do asfalto-borracha (5512 MPa).

As misturas com menos 0,3% do teor de projeto mostram uma redução dos valores de Mr, demonstrando uma incapacidade da cimentação do ligante envelhecido no agregado. Por outro lado, as misturas com teor de ligante de projeto e com mais 0,3%, há um aumento da viscosidade do ligante envelhecido e, conseqüentemente, um incremento na rigidez das misturas.

As misturas com mais 0,3% do teor de projeto tem um incremento menor nos valores de Mr, o que pode ser atribuído a maior espessura do ligante e menor alteração em sua viscosidade.

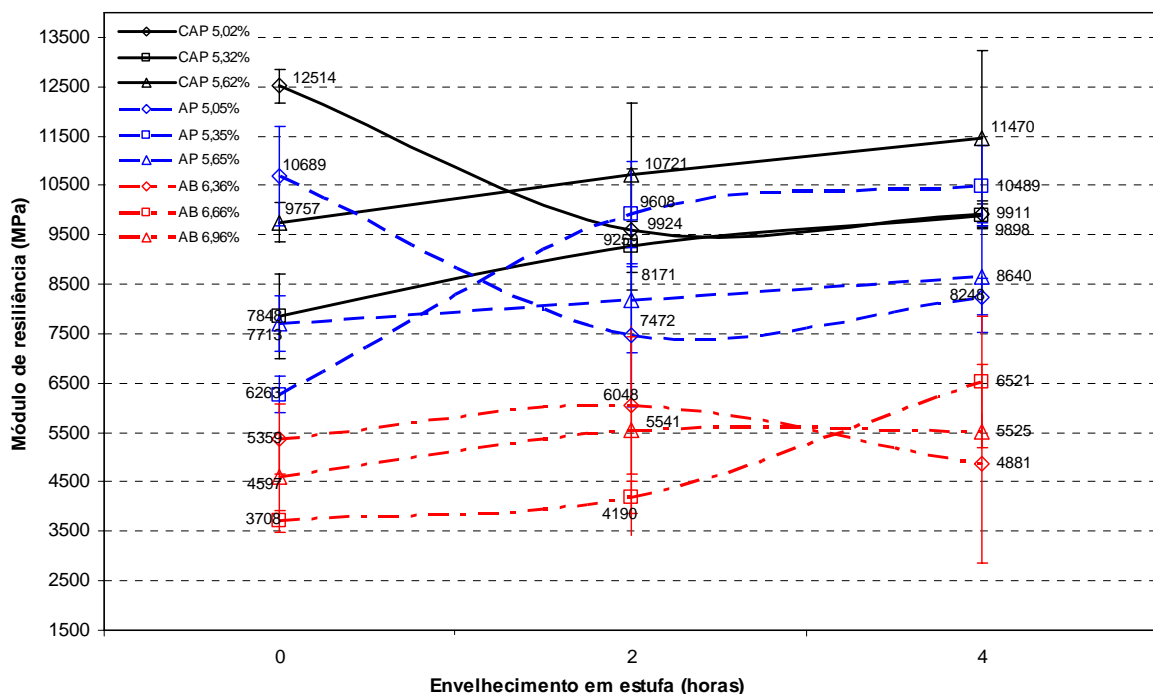


Figura 23: Módulo de resiliência *versus* envelhecimento em estufa

A Equação 5 representa a análise de regressão linear múltipla correlacionando a variável dependente Mr com as variáveis independentes, considerando os 83 dados coletados no ensaio de módulo de resiliência. As variáveis que influenciam o módulo de resiliência (segundo ANOVA) são a viscosidade (VB) e o teor de ligante (TL), conforme apresentado na Figura 24.

$$Mr = 17634,63 - 1,72.VB - 919,85.TL - 76,97.PA + 15,97.PN + 142,00.TE \quad (5)$$

onde: Mr = Módulo de resiliência;

VB = Viscosidade Brookfield @ 177°C;

TL = Teor de ligante;

PA = Ponto de amolecimento;

PN = Penetração;

TE = Tempo de envelhecimento;

O coeficiente de determinação R^2 é 0,63, R^2_{ajust} é 0,61, e o erro padrão de estimativa, ε_p , é de 1638,32 MPa para o Mr, conforme verificado na Figura 24.

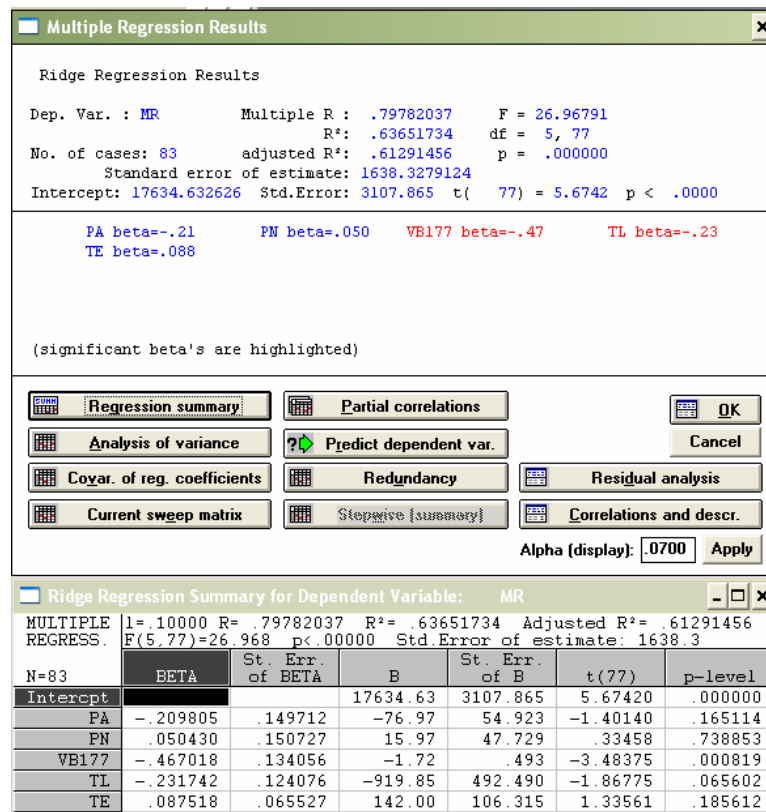


Figura 24: Análise de regressão linear múltipla do Mr

A Figura 25 apresenta os valores obtidos através da modelagem estatística *versus* os valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência (M_r) e a Figura 26 a superfície de resposta para o módulo de resiliência (M_r), onde as variáveis independentes foram codificadas (-1 a 1) para normalizar as escalas x e y. Os resultados demonstram que as variáveis independentes que influenciam M_r é o teor de ligante e a viscosidade, onde estas variáveis são inversamente proporcionais ao valores de M_r , ou seja, aumentando os teores de ligante ou a viscosidade, diminui os resultados de M_r .

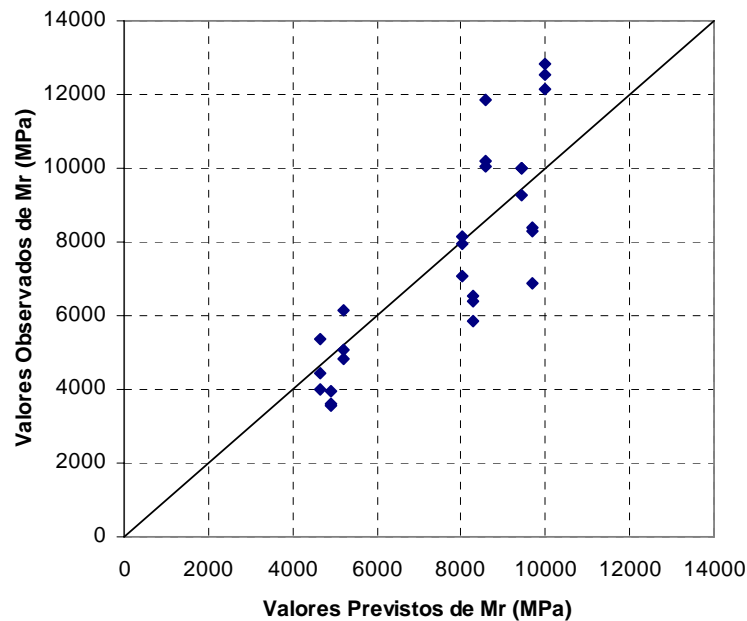


Figura 25: Valores previstos *versus* observados para variável M_r

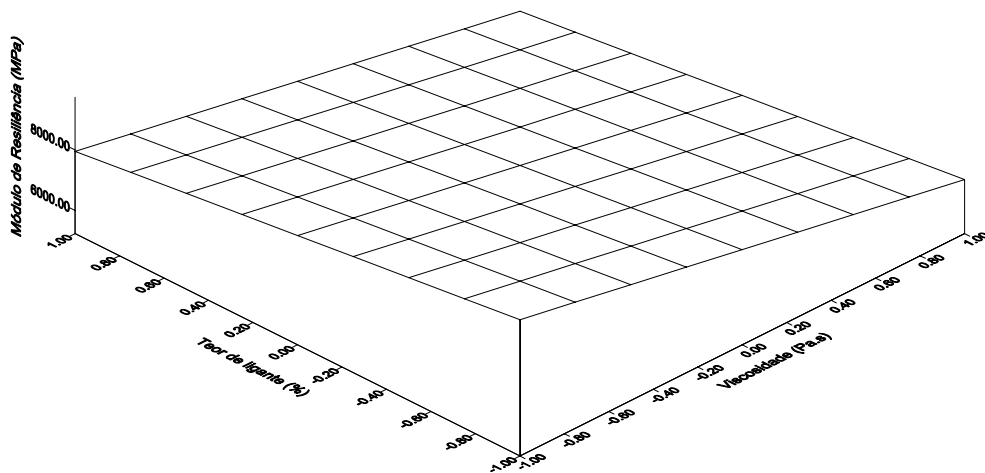


Figura 26: Superfície de resposta da variável M_r

4.1.3 Relação Mr/Rt

A Tabela 9 apresenta o resumo dos resultados da relação Mr/Rt.

Tabela 9: Relação Mr/Rt em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento

Mistura/%ligante	Mr/Rt (MPa)					
	0 horas		2 horas		4 horas	
	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴
CAP ¹ - 5,02%	7554,19	714,80	6847,93	278,94	6767,68	237,41
CAP ¹ - 5,32%	5892,83	498,27	5005,05	274,19	5856,80	144,19
CAP ¹ - 5,62%	6052,67	414,54	6381,77	109,10	6724,85	1214,77
AP ² - 5,05%	5331,43	321,00	5037,46	1132,11	4909,83	187,67
AP ² - 5,35%	3742,66	195,18	5279,08	571,22	5491,97	427,73
AP ² - 5,65%	4108,08	372,31	4764,72	276,19	4908,71	57,76
AB ³ - 6,36%	4702,21	236,72	5981,24	547,36	4850,34	264,03
AB ³ - 6,66%	4418,35	248,72	4899,36	363,43	5297,16	695,54
AB ³ - 6,96%	4465,59	193,91	5584,62	1080,30	4730,79	464,66

Nota: ¹Cimento Asfáltico de Petróleo; ²Asfalto-Polímero; ³Asfalto-Borracha; ⁴Desvio-Padrão

A Figura 27 apresenta os valores da relação Mr/Rt em relação ao tipo de mistura, percentual de ligante e tempo de envelhecimento. Analisando os resultados apresentados, verificou-se que para misturas com menos 0,3% do teor de ligante de projeto, as misturas com CAP 50/70 e Asfalto-Polímero há uma redução dos valores com o aumento do envelhecimento da mistura, para o asfalto-borracha há um aumento dos valores de 0 horas (4702,21MPa) para 2 horas (5981,24MPa) de envelhecimento e uma redução dos valores para 4 horas (4850,34MPa).

As misturas com teor de ligante de projeto (referência) com Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento, para misturas com CAP 50/70 há uma redução dos valores de 0 horas (5892,83MPa) para 2 horas (5005,05MPa) de envelhecimento e um aumento dos valores para 4 horas (5856,80MPa).

As misturas com mais 0,3% do teor de ligante de projeto, verificou-se que para misturas com CAP 50/70 e asfalto-polímero há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento, para misturas com asfalto-borracha há um aumento dos valores de 0 horas (4465,59MPa) para 2 horas (5584,62MPa) de envelhecimento e uma redução dos valores para 4 horas (4730,79MPa).

Os valores médios da relação Mr/Rt indicam que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70 (6342,64MPa), seguida do asfalto-borracha (4992,18MPa) e do asfalto-polímero (4841,55MPa).

A relação Mr/Rt nos dá uma idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior. Os valores destas relações estão apresentados na tabela 9 e demonstram que misturas com maiores valores são com CAP 50/70 seguida do asfalto-borracha e do asfalto-polímero.

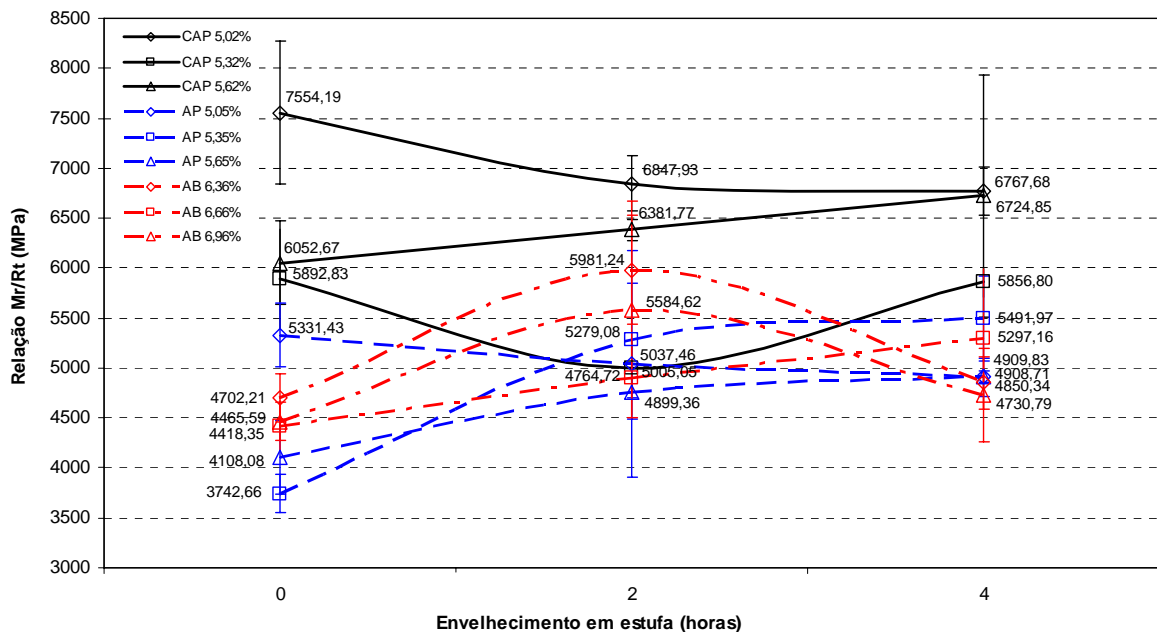


Figura 27: Relação Mr/Rt versus envelhecimento em estufa

A Equação 6 representa a análise de regressão linear múltipla correlacionando a variável dependente Mr/Rt com as variáveis independentes, considerando os 82 dados coletados. As variáveis que influenciam a relação Mr/Rt (segundo ANOVA) são o teor de ligante (TL) e o tempo de envelhecimento, conforme apresentado na Figura 28.

$$\text{Mr/Rt} = 13282,23 - 623,50 \cdot \text{TL} + 145,69 \cdot \text{TE} - 42,49 \cdot \text{PN} - 36,81 \cdot \text{PA} + 0,22 \cdot \text{VB} \quad (6)$$

onde: Mr/Rt = Relação Mr e Rt;

VB = Viscosidade Brookfield @ 177°C;

TL = Teor de ligante;

PA = Ponto de amolecimento;

PN = Penetração;

TE = Tempo de envelhecimento;

O coeficiente de determinação R^2 é 0,31, R^2_{ajust} é 0,27, e o erro padrão de estimativa, ϵ_p , é de 1052,32 MPa para a relação Mr/Rt, conforme verificado na Figura 28.

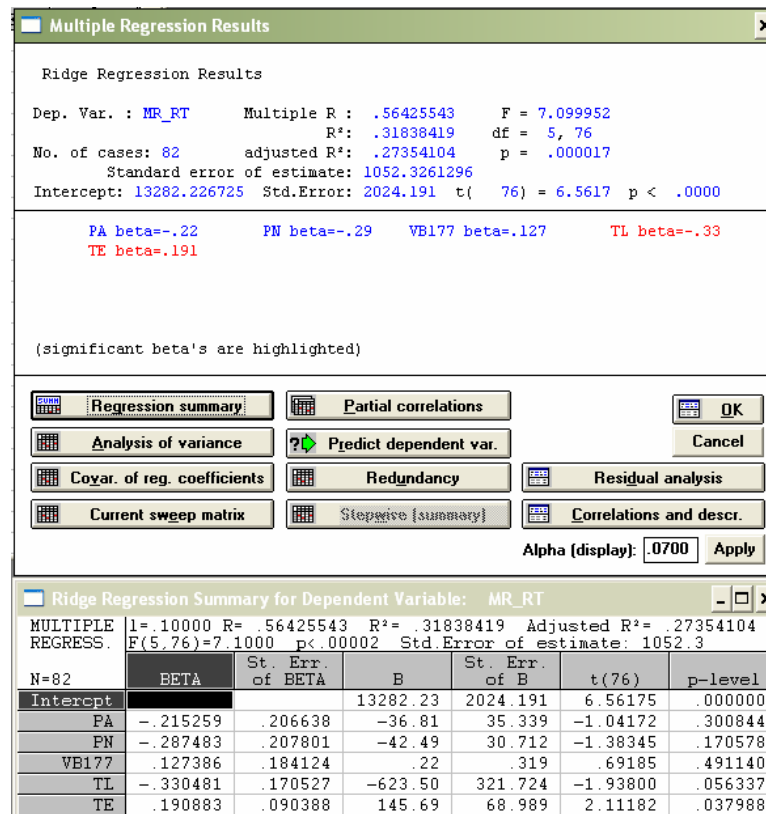


Figura 28: Análise de regressão linear múltipla da relação Mr/Rt

A Figura 29 apresenta os valores obtidos através da modelagem estatística *versus* os valores obtidos na relação Mr/Rt e a Figura 30 a superfície de resposta para o Mr/Rt, onde as variáveis independentes foram codificadas (-1 a 1) para normalizar as escalas x e y. Os resultados mostram as variáveis independentes que influenciam a relação Mr/Rt que são o tempo de envelhecimento e o teor de ligante; o tempo de envelhecimento é proporcional a relação Mr/Rt, ou seja aumentando o tempo de envelhecimento aumenta os resultados de Mr/Rt, e o teor de ligante é inversamente proporcional a relação Mr/Rt, ou seja, diminuindo o teor de ligante aumenta os valores de Mr/Rt.

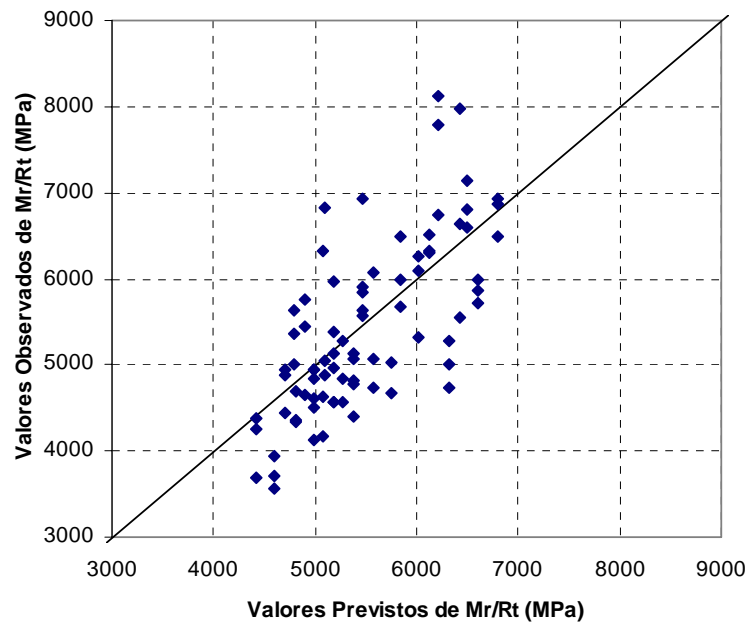


Figura 29: Valores previstos *versus* observados para variável Mr/Rt

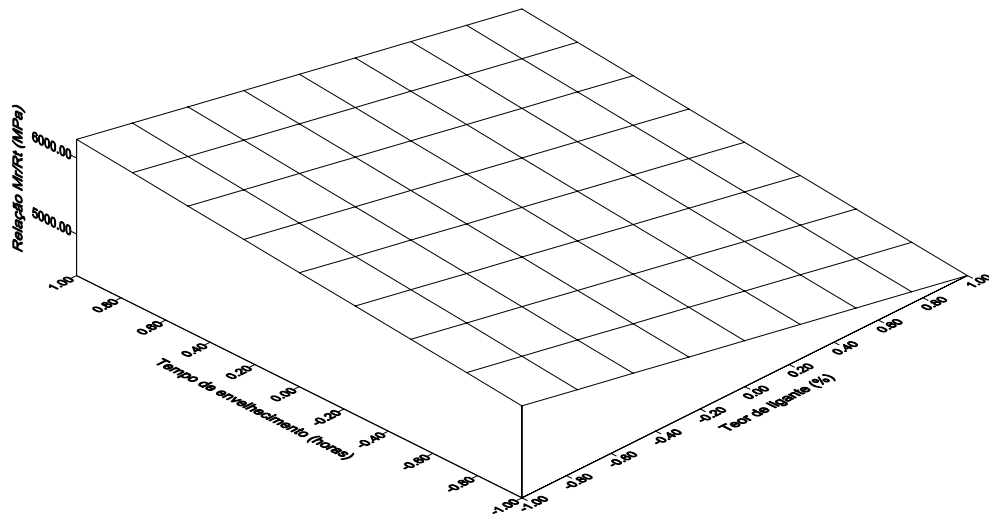


Figura 30: Superfície de resposta da variável Mr/Rt

4.2 Propriedades de Abrasão

A Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados e o Anexo B os resultados obtidos através do ensaio Cantabro, onde moldaram-se três corpos-de-prova para cada teor.

Tabela 10: Valores de perda de massa em relação ao teor de ligante e tempo de envelhecimento

Mistura/%ligante	Perda de Massa (%)					
	0 horas		2 horas		4 horas	
	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴	Média	DP ⁴
CAP ¹ - 5,02%	8,58	2,71	12,51	2,98	10,39	2,70
CAP ¹ - 5,32%	8,16	1,56	7,11	1,46	5,68	1,69
CAP ¹ - 5,62%	7,59	0,90	7,72	0,71	6,31	1,21
AP ² - 5,05%	4,63	0,64	5,38	0,85	6,10	0,51
AP ² - 5,35%	3,70	0,71	3,05	0,46	7,30	1,16
AP ² - 5,65%	2,62	0,54	3,01	0,70	8,32	2,38
AB ³ - 6,36%	1,90	0,63	1,12	0,14	6,07	5,80
AB ³ - 6,66%	1,10	0,12	0,91	0,16	2,07	0,62
AB ³ - 6,96%	0,87	0,29	0,99	0,62	3,64	3,13

Nota: ¹Cimento Asfáltico de Petróleo; ²Asfalto-Polímero; ³Asfalto-Borracha; ⁴Desvio-Padrão

A Figura 31 apresenta os valores de perda de massa em relação ao tipo de mistura, percentual de ligante e tempo de envelhecimento. Analisando os resultados apresentados, verificou-se que para misturas com menos 0,3% do teor de ligante de projeto, as misturas com CAP 50/70 há um aumento dos valores de 0 horas (8,58%) para 2 horas (12,51%) de envelhecimento e uma redução dos valores para 4 horas (10,39%), as misturas com Asfalto-Polímero há um aumento dos valores com o aumento do envelhecimento, as misturas com Asfalto-Borracha ocorre uma redução dos valores de 0 horas (1,90%) para 2 horas (1,12%) de envelhecimento e um aumento para 4 horas (6,07%).

As misturas com teor de ligante de projeto (referência) com CAP 50/70 há uma redução dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento, para misturas com Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha há uma redução dos valores de 0 horas (3,70% e 1,10%) para 2 horas (3,05% e 0,91%) e um aumento para 4 horas (7,30% e 2,07%).

As misturas com mais 0,3% do teor de ligante de projeto, verificou-se que para misturas com CAP 50/70 há um aumento dos valores de 0 horas (7,59%) para 2 horas (7,72%) de envelhecimento e uma redução dos valores para 4 horas (6,31%), as misturas com Asfalto-Polímero e Asfalto-Borracha há um aumento dos valores com o aumento do tempo de envelhecimento.

Os valores médios de PM indicou que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70 (8,23%), seguida do AP (4,90%) e do asfalto-borracha (2,07%).

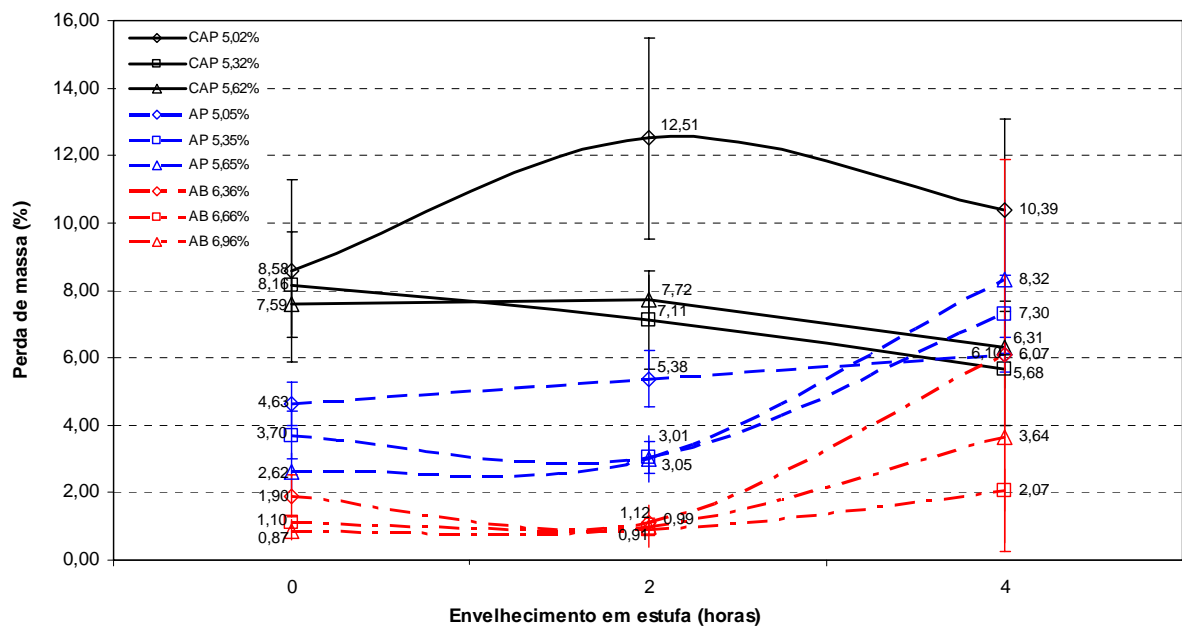


Figura 31: Perda de massa *versus* envelhecimento em estufa

A Equação 7 representa a análise de regressão linear múltipla correlacionando a variável dependente perda de massa com as variáveis independentes, considerando os 85 dados coletados no ensaio Cantabro. As variáveis que influenciam a perda de massa (segundo ANOVA) são o teor de ligante (TL) e o tempo de envelhecimento (TE), conforme demonstrado na Figura 32.

$$PM = 30,07848 - 2,81634.TL + 0,79140.TE - 0,08452.PN - 0,08682.PA + 0,00019.VB \quad (7)$$

onde: PM = Perda de massa;

VB = Viscosidade brookfield;

TL = Teor de ligante;

PA = Ponto de amolecimento;

PN = Penetração;

TE = Tempo de envelhecimento;

O coeficiente de determinação R^2 é 0,25, R^2_{ajust} é 0,21, e o erro padrão de estimativa, ϵ_p , é de 8,23% para perda de massa, conforme verificado na Figura 32.

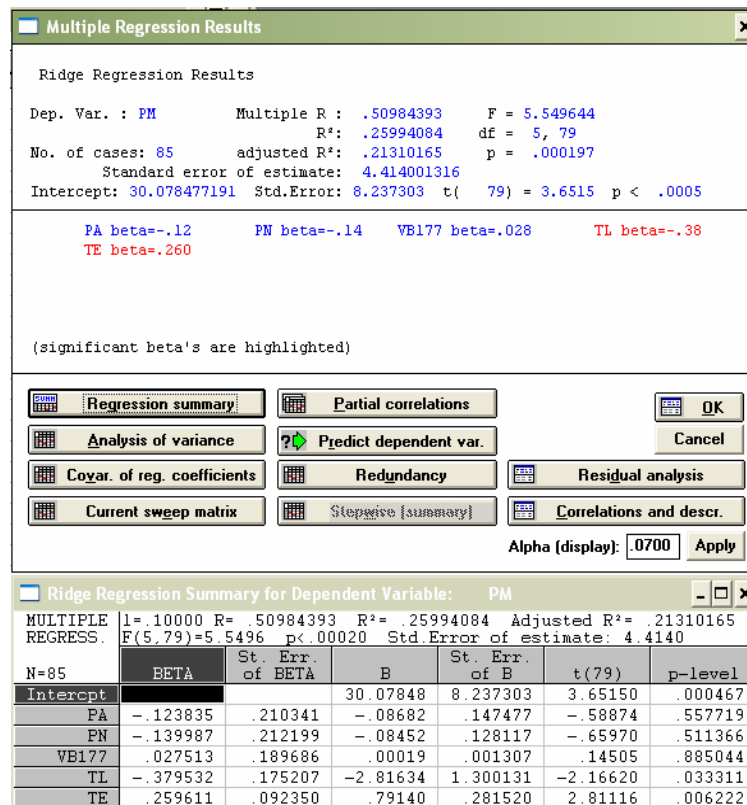


Figura 32: Análise de regressão linear múltipla do PM

A Figura 33 apresenta os valores obtidos através da modelagem estatística *versus* os valores obtidos no ensaio Cantabro (perda de massa) e a Figura 34 a superfície de resposta para a perda de massa (PM), onde as variáveis independentes foram codificadas (-1 a 1) para normalizar as escalas x e y, os resultados demonstram as variáveis independentes que influenciam a perda de massa é tempo de envelhecimento e o teor de ligante, sendo que a tempo de envelhecimento é proporcional a perda de massa, ou seja, aumentando o tempo de envelhecimento aumenta os resultados de PM, e a teor de ligante é inversamente proporcional a PM, ou seja, diminuindo o teor de ligante aumenta os valores perda de massa.

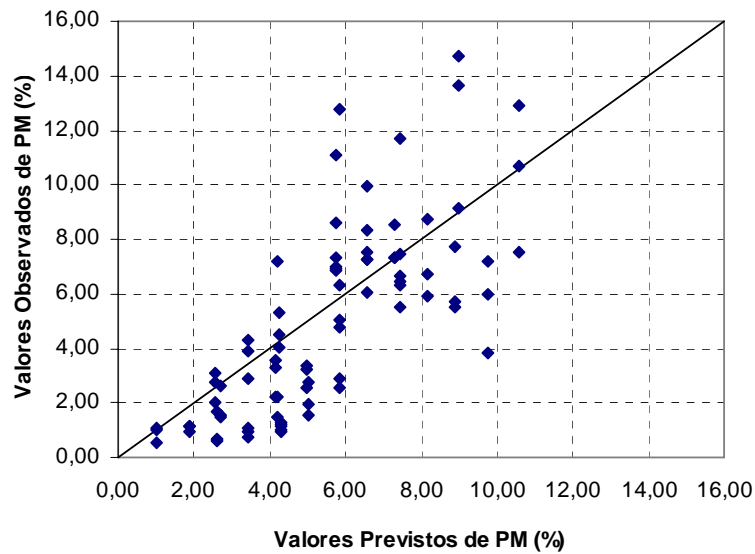


Figura 33: Valores previstos *versus* observados para variável PM

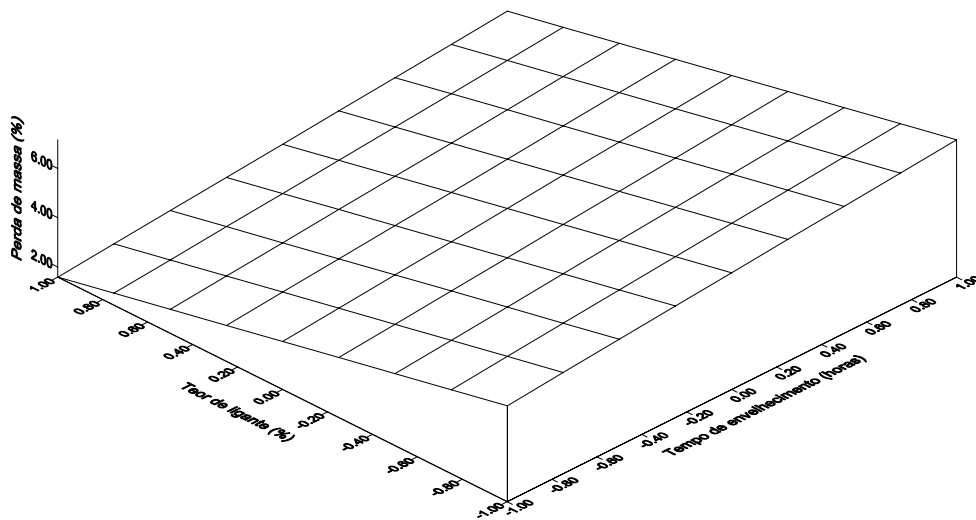


Figura 34: Superfície de resposta da variável PM

4.3 Resumo dos Resultados

A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados obtidos; os resultados da análise estatística demonstraram as variáveis independentes que influenciam as variáveis de resposta são teor de ligante (aparece em 3 modelos), seguido do tempo de envelhecimento (aparece em dois modelos), viscosidade (em 2 modelos) e penetração (em apenas 1 modelo);

Tabela 11: Resumo dos resultados

Variáveis de Resposta	Unid.	Variáveis Independentes Influentes	Modelo	ϵ_p ¹		$R^{2,2}$	$R^{2,3}$ _{ajust}
				valor	unid.		
Rt ⁴	MPa	PN; VB	$Rt = 1,239477 + 0,014706.PN - 0,000332.VB - 0,054435.TL - 0,001861.PA - 0,002125.TE$	0,22	MPa	0,70	0,68
Mr ⁵	MPa	VB; TL	$Mr = 17634,63 - 1,72.VB - 919,85.TL - 76,97.PA + 15,97.PN + 142,00.TE$	1.638,32	MPa	0,63	0,61
Mr/Rt ⁶	MPa	TL; TE	$Mr/Rt = 13282,23 - 623,50.TL + 145,69.TE - 42,49.PN - 36,81.PA + 0,22.VB$	1.052,32	MPa	0,31	0,27
PM ⁷	%	TL; TE	$PM = 30,07848 - 2,81634.TL + 0,79140.TE - 0,08452.PN - 0,08682.PA + 0,00019.VB$	8,23	%	0,25	0,21

Nota: ¹Erro Padrão de Estimativa; ²Coefficiente de Determinação; ³Coefficiente de Determinação Ajustado; ⁴Resistência à Tração; ⁵Módulo de Resiliência; ⁶Relação Mr/Rt; ⁷Perda de Massa

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa, que teve como objetivo geral avaliar as propriedades mecânicas e de desgaste do CA considerando as variáveis: tipo de ligante; teor de ligante e tempo de envelhecimento de curto prazo.

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

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados e dos dados analisados foi possível chegar às seguintes conclusões:

▪ *Quanto à influência do tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo na resistência à tração de misturas asfálticas:*

a) Os valores médios de resistência à tração indicaram que as misturas com maiores valores foram a com asfalto-polímero, seguida do CAP 50/70 e do asfalto-borracha;

b) Para misturas com menos 0,3% de ligante do teor de projeto há uma redução dos valores médios de R_t em relação ao tempo de envelhecimento para todas as misturas, este valor de 0,3% é aceito pelas especificações, mas esta variação pode levar, na prática, a um envelhecimento precoce das misturas;

c) Os resultados da análise estatística mostram as variáveis independentes que influenciam a R_t é a penetração e a viscosidade, sendo que a penetração é proporcional aos valores de R_t , ou seja, aumentando os valores de penetração aumenta os resultados de R_t , e a viscosidade é inversamente proporcional a R_t , ou seja, diminuindo a viscosidade aumenta a R_t ;

▪ ***Quanto à influência do tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo no módulo de resiliência de misturas asfálticas:***

a) Os valores médios de Mr indicaram que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70, seguida do asfalto-polímero e do asfalto-borracha;

b) As misturas com menos 0,3% do teor de projeto mostram uma redução dos valores de Mr, demonstrando uma incapacidade da cimentação do ligante envelhecido no agregado. Por outro lado as misturas com teor de ligante de projeto e com mais 0,3%, há um aumento da viscosidade do ligante envelhecido e, conseqüentemente, um incremento na rigidez das misturas;

c) As misturas com mais 0,3% do teor de projeto tem um incremento menor nos valores de Mr, o que pode ser atribuído a maior espessura do ligante e menor alteração em sua viscosidade;

d) Os resultados da análise estatística demonstram que as variáveis independentes que influenciam Mr é o teor de ligante e a viscosidade, onde estas variáveis são inversamente proporcionais ao valores de Mr, ou seja, aumentando os teores de ligante ou a viscosidade diminui os resultados de Mr;

▪ ***Quanto à influência do tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo relação Mr/Rt de misturas asfálticas:***

a) Os valores médios da relação Mr/Rt indicaram que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70, seguida do asfalto-borracha e do asfalto-polímero;

b) A relação Mr/Rt nos dá uma idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior. Os valores destas relações indicam que as misturas

com asfalto-polímero e asfalto-borracha são mais compatíveis com base granulares tradicionais ou revestimentos trincados do que as misturas com CAP 50/70.

c) Os resultados mostram as variáveis independentes que influenciam a relação Mr/Rt que são o tempo de envelhecimento e o teor de ligante; o tempo de envelhecimento é proporcional e o teor de ligante é inversamente proporcional a relação Mr/Rt;

▪ ***Quanto à influência do tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo na resistência ao desgaste de misturas asfálticas:***

a) Os valores médios de PM indicaram que as misturas com maiores valores foram a com CAP 50/70, seguida do asfalto-polímero e do asfalto-borracha;

b) Os resultados da análise estatística indicaram que as variáveis independentes que influenciam a perda de massa são tempo de envelhecimento e o teor de ligante; o tempo de envelhecimento é proporcional e o teor de ligante inversamente proporcional a esta resposta;

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

a) Realizar ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência em misturas em CA considerando tipo/teor de ligante e o tempo de envelhecimento de curto prazo, utilizando nesses ensaios micro LVDTs (*linear variable differential transformers*) para medir os deslocamentos horizontais e verticais;

b) Verificar a influência da substituição do passante # 200 por cal hidratada especial CHII em misturas de concreto asfáltico considerando tipo/teor de ligante e tempo de envelhecimento de curto prazo em ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, Cantabro e Lottman Modificada;

c) Construção de uma pista experimental para avaliar o envelhecimento de longo prazo, e durante o período de monitoramento desta pista, extrair amostras para realizar ensaios de laboratório;

d) Tentar correlacionar a massa feita em diversos tipos de usinas com uma massa feita em laboratório com a mesma composição granulométrica e teor de ligante, fazer uma análise a partir dos dados coletados através de ensaios de laboratório da massa extraída da usina e a feita em laboratório simulando o envelhecimento de curto prazo;

e) Estudar a reologia do ligante virgem e após usinado em diferentes usinas de asfalto visando determinar qual o tipo de usina provoca envelhecimento de curto prazo;

REFERÊNCIAS

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

ASPHALT INSTITUTE. **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types**. Lexington, Manual Series N°2 (MS-2), 6 ed. 1995a.141p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys**. ASTM D 5340-98. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Preparation of Bituminous Using Marshall Apparatus**. D 6926-04. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2004.

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.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Site consultado dia 03/09/2007. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/passageiro/apresentacaopas.asp>

AYREI, G. D. **State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials**. *International Journal of Pavement Engineering*. v4. p.165-176. 2003.

BECK, Jacson Johnson Kern. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas Preparadas com Diferentes Teores de Fílers**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2005.

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus**, São Carlos, 2002. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2002.

BERNUCCI, Liedi B...[et al.]. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2006. 1ed. 501p. 2007.

BONEMAZZI, F.; BRAGA, V.; CORRIERI, C.; GIAVARINI, C.; SARTORI, F. **Characteristics of polymer and polymer-modified binders.** Transportation Research Record. Washington, n.1535, p.36-47. 1996.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Uma pesquisa a favor do Brasil. Disponível em <http://www.cnt.org.br/informacoes/revista.asp> (acessado em 18/12/2006).

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS (CEC). (1986) **Propuesta de Norma de Ensayo – Determinacion de la perdida por Desgaste de Mezeclas Bituminosas mediante el empleo de la Maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro).** NLT – 325/86. Madri, 3p.

CERATTI, J. A.; RUWER, P. M.; OLIVEIRA, J. A. **Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímeros.** In: 13º ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUO BRASILEIRO DO PETRÓLEO. Rio de Janeiro. Anais... p. 290-303. 1996.

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 do Módulo de Resiliência.** DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com Asfalto-Polímero – Ensaio Cantabro.** DNER – ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999, 2p.

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

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

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (1998) **Concreto Asfáltico**: DAER/RS – ES 16/98. Porto Alegre, 21p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (2001) **Determinação da Perda por Desgaste de Misturas Betuminosas de Graduação aberta (Ensaio Cantabro)**: DAER/RS – EL 215/01. Porto Alegre, 4p.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3º ed. 274 p. Rio de Janeiro, 2003.

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

FRAZÃO, Ely Borges. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. SP. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2002.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis à partir de instrumentação e ensaios acelerados**. Porto Alegre, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 359p.

HICKS, R. P. (1991) Moisture damage in asphalt concrete. **National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175**, Transportation Research Board, Washington, 91p.

HIRSCH, Fábio. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Preparadas com Diferentes Tipos de Ligantes**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2007.

INSTITUTO DO ASFALTO. **Manual do Asfalto**. Edição revisada pela Petrobras, 426p. 2002.

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.

JACOBS, M. M. J.; HOPMAN, P. C.; MOLENAAR, A. A. **Characterization of fracture in asphaltic mixes based on a molecular approach.** Transportation Research Record. Washington, n.1535, p.22-28. 1996.

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

LEITE, L. F. M. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** Rio de Janeiro, 1999. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L. M.; MOTTA, L. M. G. **Efeito do filer nas características do ligante asfáltico.** Natal. *Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes* 2002. p.1007-1017. 2002.

MALLICK, R. B.; PELLAND, R.; HUGO, F. **Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt.** *The International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 6, Nº 2, p. 125-136. 2005

MARQUES, Geraldo L. O.; MOTTA, Laura M. G.; **Estudo da Influência de Alguns Fatores na Determinação do Módulo de Resiliência de Concretos Asfálticos.** 18º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2006.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 380p. 1997.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M. G.; **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

MELLO, José Carlos. **Transportes: Presente e Futuro.** ABPv – 33ª Reunião Anual de Pavimentação, 2001. Florianópolis, 10p.

MERIGUI, João Virgílio. **Estudo da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas em Ensaios de Laboratórios.** SP. São Paulo, 1999. Tese de Doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 275 p

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

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. M. **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.

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.

ODA, Sandra. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação,** São Carlos, 2000. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2000.

PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos,** Rio de Janeiro, 1991. (Tese de Doutorado) – COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

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

SHIN, E. E.; BHURKE, E. S.; ROSVELD, S.; LAWRENCE, T. D. **Microstructure, morphology, and failure modes of polymer-modified asphalts.** Transportation Research Record. Washington, n.1535, p.61-73. 1996.

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.

SILVA L. S.; FORTE M. C.; SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P. **Polímeros modificadores asfálticos.** Transportes. Rio de Janeiro, v.10, n.1, 2002. p. 84-106.

SPECHT, L. P. **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, L. P. **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: www.unijui.tche.br/~specht. Ijuí, 2005.

SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P.; BRITO L. A. **Avaliação da adesividade e do desgaste de misturas asfálticas preparadas com Ligantes Asfalto-Borracha**. Recife. Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes 2005. v.2. p.1173-1183. 2005.

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**. 18º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2006.

SPECHT, Luciano Pivoto; ROZEK, Thiago de Matos; HIRSCH, Fábio; 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**. 37º Reunião Anual de Pavimentação. Goiana, 2006a.

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, D. H. SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P. **Estudo Laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de fílers**. In: *34º Reunião anual de pavimentação*. São Paulo, p.307-321. 2003.

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 – UFRGS, 143p. Porto Alegre, 2005.

TONIAL, Ilonir Antonio. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2001. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, 2001.

TAYBALI, A. A.; MALPASS, G. A.; KOSLA, N. P. **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.

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

Data/hora da amostragem: 20/07/06 17:00

Data/hora do Recebimento: 20/07/06 17:30

Laboratório: REVAP/OT/DP

Endereço: Rod Pres Dutra Km 143 Jd Diamante

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 BROOKFIELD 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

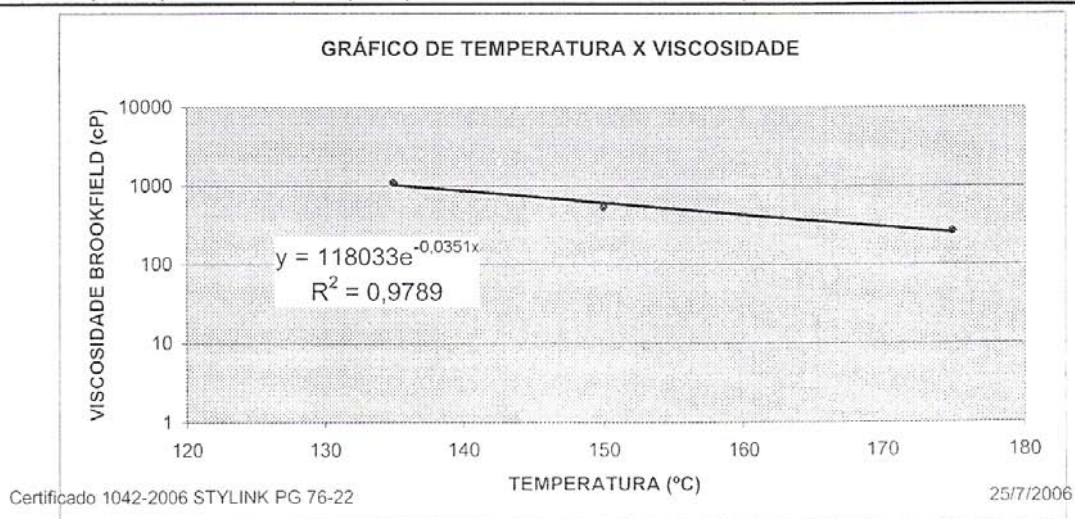
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada.
Este certificado só pode ser reproduzido integralmente e com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.

Original assinado por:

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						
VARIACÃO DE MASSA, MÁX., %		-1	1	NBR-15235	0,432	
VARIACÃO DO PA, °C, MÁX.		-6	6	NBR-6560	5	
PERCENTAGEM DE PENETRAÇÃO ORIGINAL, MÍN.		50	-	NBR-6576	59	
PERCENTAGEM DO RECUPERAÇÃO EL. ORIGINAL, MÍ		80	-	NBR-15086	92	
<p>PREZADO CLIENTE:FAVOR ASSINAR E DEVOLVER A 2 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	1.050

Após a determinação do teor de asfalto na mistura betuminosa com Rotarex ou Refluxo 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 GASTLER
RESPONSÁVEL FABRICAÇÃO

ANEXO B

Resultados dos ensaios realizados