

USP

Campus de São Carlos

*ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO LIGANTE
ASFALTO-BORRACHA EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO*

SANDRA ODA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA
UTILIZAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA
EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**

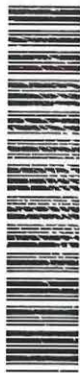
Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 11 / 01 / 01
Ass.: *[Assinatura]*

SANDRA ODA



Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017088

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior

São Carlos

2000

Class.	TESE-EENC
Cutt.	3982
Tombo	026/01

st 1128327

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

O22a Oda, Sandra
Análise da viabilidade técnica da utilização do
ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação /
Sandra Oda. -- São Carlos, 2000.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior.

1. Asfalto-borracha. 2. Borracha de pneus.
 3. Ligante asfáltico. 4. Superpave. 5. Processo úmido.
- I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **SANDRA ODA**

Tese defendida e aprovada em 08-12-2000
pela Comissão Julgadora:



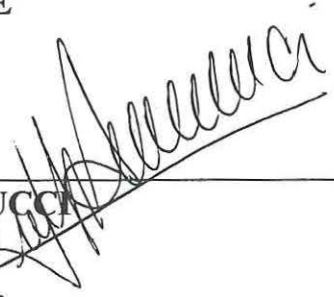
Prof. Doutor **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **MANOEL HENRIQUE ALBA SÓRIA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



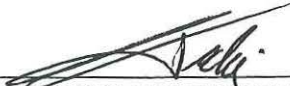
Doutora **LENI FIGUEIREDO MATIAS LEITE**
(PETROBRÁS)



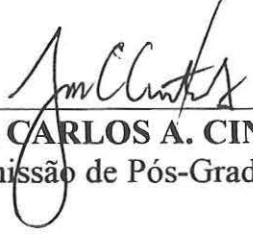
Profa. Doutora **LIÉDI LÉGI BARIANI BERNUCCI**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **WELLINGTON CYRO DE ALMEIDA LEITE**
(UNESP - Campus de Guaratinguetá)



Prof. Doutor **EDSON MARTINS DE AGUIAR**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*“No avanço da civilização, é o conhecimento que pavimenta o caminho;
e o pavimento é eterno”.*

W. R. Whitney

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Tetuo Oda, e
à minha mãe, Hisae Oda

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior, orientador desta tese, pessoa por quem cultivo grande respeito e admiração, pela amizade e pela paciência. O seu conhecimento e espírito crítico foram fatores primordiais para que eu pudesse desenvolver este trabalho;
- Ao Prof. Dr. Byron E. Ruth, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Flórida em Gainesville, pelas sugestões;
- Aos professores do Departamento de Transportes da EESC/USP, em especial ao Prof. Dr. Glauco T. P. Fabbri, ao Prof. Dr. Manoel H. A. Sória e ao Prof. Dr. Alexandre B. Parreira, pelo apoio e sugestões;
- Aos engenheiros Leni F. M. Leite e Rômulo Constantino do CENPES (Petrobrás, RJ), pelas sugestões e atenção dispensada;
- Ao engenheiro Luiz Carlos da Cunha Lima da empresa Relastomer Tecnologia e Participações S.A., por fornecer a borracha moída utilizada neste trabalho;
- Aos técnicos do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Antonio C. Gigante, Antonio R. Morasco e Antonio C. de Oliveira, pelo auxílio na realização da parte experimental da tese;
- Aos técnicos do Laboratório de Asfalto do CENPES (Petrobrás, RJ), Cíntia de Andrade Mello, Alexandre Florêncio, Áurea Canuto da Silva e Cláudio Loureiro, pelo auxílio na realização da parte experimental da tese;
- Ao técnico do Laboratório de Estradas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Mariano Herculano da Costa;

À Cynthia Perpétua Lotti, pela competência e paciência na revisão final deste trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, em especial à Heloísa Helena Morgado Belo e ao Antônio Carlos Mariano, pelo apoio técnico e administrativo;

Aos acadêmicos Dener M. L. de Rezende e Leandro C. Cunha do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, bolsistas do Programa de Iniciação Científica CNPq/UEM;

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, em especial ao Sergio H. Demarchi, ao Héilo H. Arita, ao Roberto L. Ferraz, à Fernanda A. Simões e ao José K. Yshiba, pelo apoio e incentivo;

Aos amigos com quem tenho convivido durante esses anos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS	4
1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
2 - LIGANTES ASFÁLTICOS	9
2.1 - INTRODUÇÃO	9
2.2 - REOLOGIA DE LIGANTES ASFÁLTICOS	13
2.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ASFÁLTICOS.....	21
2.3.1 - CLASSIFICAÇÃO POR PENETRAÇÃO.....	22
2.3.2 - CLASSIFICAÇÃO POR VISCOSIDADE.....	24
2.3.3 - CLASSIFICAÇÃO SUPERPAVE.....	26
2.4 - SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS PELO MÉTODO SUPERPAVE.....	27
2.5 - USO DE MODIFICADORES EM LIGANTES ASFÁLTICOS	31

3 - REUTILIZAÇÃO DE PNEUS	33
3.1 - INTRODUÇÃO	33
3.2 - ALTERNATIVAS PARA REUTILIZAÇÃO DE PNEUS.....	38
3.2.1 - RECICLAGEM: FABRICAÇÃO DE NOVOS PNEUS E CÂMARAS DE AR	39
3.2.2 - GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA QUEIMA DE PNEUS	40
3.2.3 - DIVERSOS.....	41
3.2.4 - INCORPORAÇÃO EM MATERIAIS ASFÁLTICOS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	41
3.3 - REAPROVEITAMENTO DE PNEUS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO.....	42
3.4 - BREVE HISTÓRICO DA ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS MOÍDA EM MATERIAIS ASFÁLTICOS - PROCESSO ÚMIDO	43
3.4.1 - DESENVOLVIMENTO DO ASFALTO-BORRACHA	44
3.4.2 - VANTAGENS PREVISTAS COM A UTILIZAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA	49
3.4.3 - APLICAÇÃO DO LIGANTES ASFALTO-BORRACHA.....	50
a) Selante de trincas e juntas (<i>asphalt-rubber crack/ joint sealant</i>).....	51
b) SAM (<i>Stress Absorbing Membrane</i>)	52
c) SAMI (<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>).....	53
d) Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).....	54
4 - PRODUÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA - FATORES INTERVENIENTES E ESPECIFICAÇÕES	57
4.1 - INTRODUÇÃO	57
4.2 - MATERIAIS.....	64
4.2.1 - BORRACHA.....	65
a) Tipo de borracha	65
b) Tamanho das partículas de borracha.....	67
c) Teor de borracha	69

4.2.2 - LIGANTE ASFÁLTICO	70
4.2.3 - DILUENTE.....	70
4.3 - TEMPERATURA E TEMPO DE REAÇÃO	71
4.4 - EQUIPAMENTO	73
4.5 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ASFALTO-BORRACHA	74
5 - PROGRAMAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL	78
5.1 - INTRODUÇÃO	78
5.2 - PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	79
5.3 - VARIÁVEIS INDEPENDENTES - FATORES E NÍVEIS	81
5.3.1 - TIPO DE BORRACHA.....	81
5.3.2 - TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA	81
5.3.3 - TEOR DE BORRACHA	82
5.3.4 - TIPO E TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO.....	82
5.3.5 - TEMPERATURA E TEMPO DE REAÇÃO	82
5.3.6 - DILUENTE.....	84
5.4 - PROGRAMAÇÃO FATORIAL DO EXPERIMENTO	84
5.4.1 - MATRIZ FATORIAL INICIAL.....	84
5.4.2 - MATRIZ FATORIAL DEFINITIVA	87
5.5 - VARIÁVEIS DEPENDENTES.....	89
5.5.1 - ENSAIOS TRADICIONAIS	89
a) Penetração.....	90
b) Ponto de Amolecimento	91
c) Ponto de Fulgor.....	92
d) Viscosidade Saybolt-Furol	93
e) Ductilidade	94
5.5.2 - ENSAIOS SUPERPAVE.....	94
a) Viscosidade Aparente (Brookfield)	96
b) Cisalhamento Dinâmico	98
c) Envelhecimento de Curto Prazo	101

d) Envelhecimento de Longo Prazo	103
e) Rigidez à Fluência na Flexão.....	104
6 - RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	107
6.1 - ENSAIOS CONVENCIONAIS.....	107
6.1.1 - PENETRAÇÃO	107
6.1.2 - PONTO DE AMOLECIMENTO	109
6.1.3 - PONTO DE FULGOR.....	110
6.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SUPERPAVE.....	112
6.2.1 - VISCOSIDADE APARENTE (BROOKFIELD).....	112
6.2.2 - MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE VIRGEM.....	115
6.2.3 - MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE APÓS ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO	118
6.2.4 - MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE APÓS ENVELHECIMENTO DE LONGO PRAZO.....	121
6.2.5 - RIGIDEZ À FLUÊNCIA NA FLEXÃO	124
6.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA - MODELOS ESTATÍSTICOS.....	126
6.3.1 - TESTES DE SIGNIFICÂNCIA.....	126
6.3.2 - CÁLCULO DAS VARIÂNCIAS.....	127
a) Soma de Quadrados Total	127
b) Fatores A, B e C.....	127
c) Interação entre os Fatores A, B e C	128
d) Réplica.....	130
6.3.3 - ANÁLISE DE REGRESSÃO	138
6.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	143
6.4.1 - EFEITOS DOS PARÂMETROS NAS PROPRIEDADES DOS ASFALTO-BORRACHA	143
a) Ponto de Amolecimento	143
b) Ponto de Fulgor.....	145

c) Penetração.....	146
d) Viscosidade Brookfield.....	149
e) Cisalhamento Dinâmico antes do Envelhecimento	153
f) Cisalhamento Dinâmico após Envelhecimento de Curto Prazo.....	157
g) Cisalhamento Dinâmico após Envelhecimento de Longo Prazo	159
h) Rigidez à Fluência na Flexão	165
7 - CONCLUSÕES	169
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174
ANEXO A.....	186
ANEXO B	195
ANEXO C.....	201
ANEXO D.....	206
ANEXO E.....	214
ANEXO F	245
ANEXO G.....	250

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Trincas por fadiga do revestimento asfáltico.....	2
FIGURA 1.2 - Deformação permanente nas trilhas de roda	3
FIGURA 2.1 - Comportamento do ligante asfáltico em função do tempo de aplicação de carga	11
FIGURA 2.2 - Susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos	11
FIGURA 2.3 - Resposta visco-elástica típica de um ligante asfáltico sob carregamento, destacando-se as componentes elásticas (γ_E), elástica retardada (γ_{ER}) e viscosa (γ_V)	15
FIGURA 2.4 - Curvas de fluência realizadas a diferentes temperaturas utilizadas para determinar a curva-mestra.....	16
FIGURA 2.5 - Superposição tempo-temperatura.....	16
FIGURA 2.6 - Comportamento visco-elástico de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos	17
FIGURA 2.7 - Comportamento tensão-deformação de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos.....	18
FIGURA 2.8 - Curva-mestre típica	19
FIGURA 2.9 - Intervalos de temperatura para mistura e compactação em função da viscosidade do ligante asfáltico	20
FIGURA 2.10 - Comparação entre as especificações tradicionais.....	26

FIGURA 3.1 - Milhões de pneus descartados anualmente nos EUA	34
FIGURA 3.2 - Incêndio de pneus nos Estados Unidos causa a contaminação do ar, da água e do solo	35
FIGURA 3.3 - Os pneus retirados do Rio Tietê, em São Paulo-SP, acumulam-se na margem.....	37
FIGURA 3.4 - Destino final de pneus descartados.....	39
FIGURA 3.5 - Milhões de pneus dispostos inadequadamente	44
FIGURA 3.6 - Configuração de selante "band-aid"	45
FIGURA 3.7 - Aplicador manual utilizado na selagem de trincas	51
FIGURA 3.8 - Aplicação de selante de trincas no Estado do Arizona	52
FIGURA 3.9 - Execução de um SAM.....	53
FIGURA 3.10 - Execução de um SAMI.....	54
FIGURA 3.11 - Exemplo de usina de asfalto-borracha no Estado da Flórida ...	56
FIGURA 3.12 - Esquema de produção de concreto asfáltico com asfalto- borracha	56
FIGURA 4.1 - Fatores que influenciam a produção do ligante asfalto-borracha	58
FIGURA 4.2 - Curva granulométrica da borracha fornecida pela Relastomer	69
FIGURA 4.3 - Efeito do tempo de mistura na viscosidade do ligante asfalto- borracha	71
FIGURA 4.4 - Efeito do tempo de reação na viscosidade do ligante asfalto- borracha	72
FIGURA 4.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha: efeito preponderante do teor de borracha em relação à temperatura da mistura	72
FIGURA 4.6 - Equipamento utilizado na preparação de ligante asfalto- borracha	73
FIGURA 4.7 - Equipamento utilizado na preparação de misturas asfalto- borracha no Laboratório de Asfalto do Cenpes.....	74

FIGURA 4.8 - Agitador mecânico e panela elétrica utilizados na preparação dos ligantes asfalto-borracha no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP.....	75
FIGURA 4.9 - Recipiente utilizado para armazenar o ligante asfalto-borracha	77
FIGURA 5.1 - Histograma dos valores de temperatura de mistura (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1).....	83
FIGURA 5.2 - Histograma dos valores de tempo de reação (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1).....	83
FIGURA 5.3 - Equipamento utilizado na determinação da penetração de ligantes asfálticos.....	90
FIGURA 5.4 - Equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos - Método Anel e Bola.....	91
FIGURA 5.5 - Equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor de ligantes asfálticos	92
FIGURA 5.6 - Equipamento utilizado na determinação da viscosidade Saybolt-Furol.....	93
FIGURA 5.7 - Equipamento Utilizado na Determinação da Ductilidade.....	94
FIGURA 5.8 - Fluxograma da estratégia utilizada no desenvolvimento da especificação de ligante asfáltico Superpave (adaptada de ANDERSON <i>et al.</i> , 1991).....	95
FIGURA 5.9 - Viscosímetro Brookfield utilizado para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos	97
FIGURA 5.10 - Detalhe do sistema de controle de temperatura e da câmara onde é colocada a amostra de ligante asfáltico.....	97
FIGURA 5.11 - Hastes (<i>spindles</i>) utilizadas no viscosímetro Brookfield	97
FIGURA 5.12 - Operação do viscosímetro rotacional.....	98
FIGURA 5.13 - Reômetro de cisalhamento dinâmico	99
FIGURA 5.14 - Esquema de um Reômetro de cisalhamento dinâmico	99

FIGURA 5.15 - Funcionamento de um reômetro de cisalhamento dinâmico	101
FIGURA 5.16 - Estufa de Filme Fino Rotativo (Ensaio RTFOT).....	102
FIGURA 5.17 - Frascos utilizados no ensaio RTFOT	102
FIGURA 5.18 - Vaso de pressão (PAV) utilizado para envelhecimento acelerado de ligantes asfálticos.....	103
FIGURA 5.19 - Detalhe do vaso de pressão para ensaio de envelhecimento de longo prazo - foto de equipamento da Universidade do Texas em Austin	104
FIGURA 5.20 - Reômetro de viga à flexão.....	105
FIGURA 5.21 - Esquema do reômetro de viga à flexão - adaptado de HARRIGAN, LEAHY e YOUTCHEFF (1994)	105
FIGURA 6.1 - Efeito do teor de borracha na penetração do ligante asfalto- borracha	108
FIGURA 6.2 - Efeito do teor de borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha	110
FIGURA 6.3 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha	111
FIGURA 6.4 - Variação da viscosidade em função do teor de borracha	114
FIGURA 6.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha em função do teor e da granulometria da borracha	114
FIGURA 6.6 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento complexo	116
FIGURA 6.7 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ	117
FIGURA 6.8 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente, representada pelo parâmetro ($G^*/\text{sen}\delta$)	117
FIGURA 6.9 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico	119
FIGURA 6.10 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ	120

FIGURA 6.11 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente	120
FIGURA 6.12 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico	122
FIGURA 6.13 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ	123
FIGURA 6.14 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga.....	123
FIGURA 6.15 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica.....	125
FIGURA 6.16 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica.....	125
FIGURA 6.17 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	143
FIGURA 6.18 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	144
FIGURA 6.19 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	144
FIGURA 6.20 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	145
FIGURA 6.21 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha	146
FIGURA 6.22 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha	147
FIGURA 6.23 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha	147
FIGURA 6.24 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha	148
FIGURA 6.25 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha	148

FIGURA 6.26 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C	149
FIGURA 6.27 - efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C	150
FIGURA 6.28 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C	150
FIGURA 6.29 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C	151
FIGURA 6.30 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C	151
FIGURA 6.31 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C	152
FIGURA 6.32 - efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C	152
FIGURA 6.33 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C	153
FIGURA 6.34 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	154
FIGURA 6.35 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	154
FIGURA 6.36 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	155
FIGURA 6.37 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	155
FIGURA 6.38 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	156
FIGURA 6.39 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	156

FIGURA 6.40 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo	157
FIGURA 6.41 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo.....	157
FIGURA 6.42 - Efeito do teor de ligante nas resistências à deformação permanente do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo	158
FIGURA 6.43 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	159
FIGURA 6.44 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	159
FIGURA 6.45 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	160
FIGURA 6.46 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	160
FIGURA 6.47 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	161
FIGURA 6.48 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	161
FIGURA 6.49 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	162
FIGURA 6.50 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	162

FIGURA 6.51 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	163
FIGURA 6.52 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	163
FIGURA 6.53 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	164
FIGURA 6.54 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	164
FIGURA 6.55 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha	165
FIGURA 6.56 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha	166
FIGURA 6.57 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha	166
FIGURA 6.58 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha	167
FIGURA 6.59 - Efeito do teor de borracha no módulo de relaxação (m) do ligante asfalto-borracha	167

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por penetração	23
TABELA 2.2 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por viscosidade.....	25
TABELA 2.3 - Tipos de ligantes Superpave	27
TABELA 2.4 - Classificação Superpave de Ligantes Asfálticos.....	29
TABELA 2.5 - Temperaturas mínima, máxima, mínima absoluta e máxima absoluta do Estado de São Paulo	30
TABELA 2.6 - Temperaturas máxima e mínima de projeto (no pavimento).....	30
TABELA 2.7 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar	32
TABELA 3.1 - Composição química de pneus de automóveis e caminhões	38
TABELA 3.2 - Pesquisadores que avaliaram o ligante asfalto-borracha durante as décadas de 70, 80 e 90.....	43
TABELA 3.3 - Granulometria da borracha recomendada para misturas asfálticas de graduação densa	55

TABELA 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha	61
TABELA 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha (continuação)	62
TABELA 4.2 - Especificação para diferentes tipos de ligantes asfalto-borracha proposta por BAKER RUBBER Inc. (1988).....	63
TABELA 4.3 - Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997)	63
TABELA 4.4 - Porcentagem de borracha natural e sintética estudada por TAKALLOU <i>et al.</i> (1986)	66
TABELA 4.5 - Propriedades químicas da borracha Relastomer	67
TABELA 4.6 - Efeito do teor de borracha moída nas propriedades do ligante asfalto-borracha	70
TABELA 5.1 - Granulometria da borracha Relastomer	81
TABELA 5.2 - Matriz fatorial que representa a programação dos ensaios.....	88
TABELA 5.3 - Numeração das amostras que representam a combinação de todos os fatores e níveis (seqüência aleatória).....	88
TABELA 6.1 - Resultados de penetração (1/10 mm) das misturas asfalto-borracha	108
TABELA 6.2 - Resultados de ponto de amolecimento (°C).....	109
TABELA 6.3 - Resultados de ponto de fulgor (°C) das misturas asfalto-borracha	110
TABELA 6.4 - Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 175°C).....	112
TABELA 6.5 - Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 135°C).....	113
TABELA 6.6 - Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - G* (Pa) (temperatura de ensaio: 64°C)	115

TABELA 6.7 - Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - δ (graus).....	115
TABELA 6.8 - Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - G*/sen δ (kPa)	116
TABELA 6.9 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - G* (Pa) (temperatura de ensaio: 64°C)	118
TABELA 6.10 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - δ (graus).....	118
TABELA 6.11 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - G*/sen δ (kPa)	119
TABELA 6.12 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - G* (Pa) (temperatura de ensaio: 31°C)	121
TABELA 6.13 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - δ (graus).....	121
TABELA 6.14 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - G*.sen δ (kPa).....	122
TABELA 6.15 - Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de S (temperatura de ensaio: 0°C)	124
TABELA 6.16 - Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de m	124
TABELA 6.17 - Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaio de penetração.....	130
TABELA 6.18 - Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaio de ponto de amolecimento	131
TABELA 6.19 - Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaio de ponto de fulgor.....	131
TABELA 6.20 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: G* (Pa).....	132
TABELA 6.21 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: δ (graus)	132

TABELA 6.22 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa).....	133
TABELA 6.23 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: G^* (Pa).....	133
TABELA 6.24 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: δ (graus).....	134
TABELA 6.25 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: $G^*/\text{sen } \delta$	134
TABELA 6.26 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: G^*	135
TABELA 6.27 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: δ (graus)	135
TABELA 6.28 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: $G^*\text{sen } \delta$	136
TABELA 6.29 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio de viscosidade aparente (Brookfield) - 175°C.....	136
TABELA 6.30 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio de viscosidade aparente (Brookfield) - 135°C.....	137
TABELA 6.31 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio do BBR - valores de S	137
TABELA 6.32 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio do BBR - valores de m	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional de Indústrias de Pneumáticos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CENPES	Centro de Pesquisa Leopoldo A. Miguez de Mello (Petrobrás)
CONAMA	<i>National Council for The Environment</i>
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Tester</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
RV	<i>Rotational Viscometer</i>
SAM	<i>Stress Absorbing Membrane</i>
SAMI	<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>

RESUMO

Este trabalho apresenta estudo sobre a viabilidade técnica da incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação. Trata-se de uma alternativa para solucionar um grave problema ambiental, pois no Brasil, anualmente, são descartados mais de 30 milhões de pneus, dos quais a maior parte é disposta em locais inadequados, servindo para a procriação de vetores de doenças e representando risco de contaminação do meio-ambiente. Os efeitos dos principais fatores que condicionam o comportamento do ligante asfalto-borracha (teor e granulometria da borracha, temperatura de mistura, tempo de reação) são avaliados através de ensaios tradicionais de caracterização de ligantes asfálticos e também ensaios do Método Superpave, que determinam propriedades fundamentais, diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos no campo. Os resultados da análise estatística da programação fatorial de ensaios laboratoriais desenvolvida evidenciam o efeito preponderante do teor de borracha e, principalmente, que o ligante asfalto-borracha pode aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga do revestimento.

Palavras-chaves: asfalto-borracha, borracha de pneus, ligante asfáltico, Superpave, processo úmido

ABSTRACT

This work presents the results of a study about the technical feasibility of the use of asphalt-rubber binder by the asphalt paving industry. In Brazil, more than 30 million tires a year are disposed, mostly in inadequate sites, causing serious health and environmental problems. The effects of the main factors (rubber content, rubber particle size, temperature of mixture, reaction time) on the behavior of asphalt-rubber binders are evaluated by traditional tests and also by tests of the Superpave Method, which are based on fundamental properties, directly related to field performance. The results of the statistical analysis of the factorial design of laboratory experiments show the most significant effect of rubber content and, mainly, that asphalt-rubber binder can increase the resistance to permanent deformation and fatigue cracking.

Keywords: asphalt-rubber; tire rubber; asphalt binder; Superpave, wet process

1 – INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura em camadas construída sobre uma fundação, denominada de subleito. De modo geral, as camadas mais próximas da superfície têm melhores características e custos mais elevados. Do ponto de vista estrutural a camada mais importante é a base. Sobre ela, para suportar os efeitos destrutivos do tráfego e das intempéries, está o revestimento ou camada de rolamento. Abaixo da base, como transição ao subleito, pode haver uma sub-base e/ou um reforço do subleito.

Do ponto de vista funcional, o pavimento tem a tarefa de suportar o tráfego e fornecer aos usuários segurança, conforto e economia. Essa função está intimamente relacionada com o estado da superfície de rolamento. A evolução das condições de rolamento, por sua vez, depende das intempéries, do tráfego e também das características estruturais do pavimento.

No caso dos pavimentos flexíveis, o revestimento, geralmente, é formado pela combinação de ligante asfáltico e agregado mineral (mistura asfáltica), podendo conter ainda material de preenchimento (filler mineral), aditivos etc. O ligante pode ser um cimento asfáltico ou um cimento asfáltico modificado e suas principais funções são: atuar como um elemento de ligação, colando as partículas minerais; e agir como um agente impermeabilizante da mistura.

Uma mistura asfáltica deve ser resistente ao impacto e tenaz. O desempenho de uma mistura, como por exemplo, o concreto asfáltico usinado a quente, CAUQ (também denominado concreto betuminoso usinado a quente, CBUQ), depende tanto das propriedades de seus componentes individuais quanto da relação entre ligante e agregado.

Devido a sua natureza viscoelástica, um ligante asfáltico apresenta grande variação da consistência quando submetido a diferentes temperaturas, o que pode influenciar o desempenho do pavimento. Para evitar que ocorram problemas, como por exemplo, deformação permanente devido a baixa consistência sob elevadas temperaturas e formação de trincas devido a alta rigidez sob baixas temperaturas, é importante conhecer a susceptibilidade térmica do ligante asfáltico ou, melhor ainda, o seu comportamento reológico.

Dentre os defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis, dois se destacam: as trincas por fadiga do revestimento e o acúmulo de deformações permanentes nas trilhas de roda. As trincas por fadiga (Figura 1.1) ocorrem devido às cargas repetidas do tráfego e, também, devido a falta de flexibilidade ou elasticidade no componente asfáltico do pavimento, que não consegue suportar (“responder”) as solicitações do tráfego pesado sem trincar.



FIGURA 1.1 - Trincas por fadiga do revestimento asfáltico (Fonte: FERNANDES, JR. *et al.*, 1999)

A deformação permanente nas trilhas de roda (Figura 1.2) é um tipo de distorção que se manifesta sob a forma de depressões longitudinais, sendo decorrente da densificação dos materiais ou, principalmente, de ruptura por cisalhamento. A resistência ao cisalhamento de uma mistura asfáltica depende da estrutura de agregados, mas também depende das características de rigidez do ligante asfáltico.

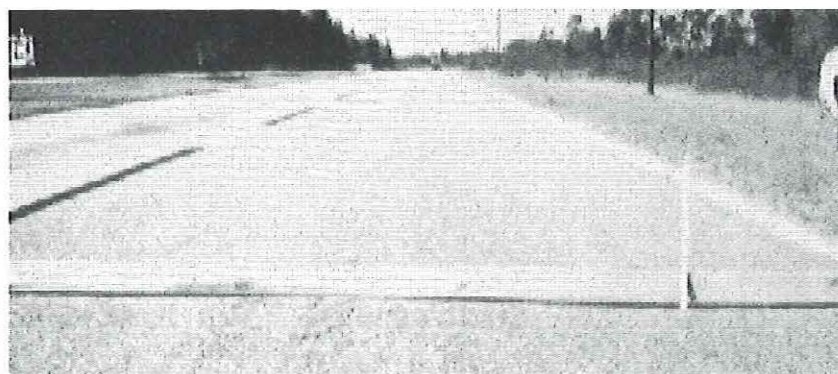


FIGURA 1.2 - Deformação permanente nas trilhas de roda (Fonte: FERNANDES, JR. *et al.*, 1999)

A importância dos ligantes asfálticos para o desempenho dos pavimentos flexíveis tem levado ao uso de aditivos para melhorar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, aumentando a resistência à formação de defeitos. São adicionados aos cimentos asfálticos produtos como agentes melhoradores de adesividade (DOPE), agentes rejuvenescedores, polímeros (SBR, SBS, EVA etc.) e, particularmente, borracha de pneus moída.

Durante muito tempo os asfaltos modificados foram caracterizados por métodos e controles tecnológicos convencionais que não refletem todos os benefícios desses materiais, porque são baseados em métodos empíricos que não quantificam as propriedades de engenharia (propriedades fundamentais dos ligantes). Ou seja, os ensaios tradicionais (penetração, ponto de amolecimento, ductilidade) não conseguem avaliar os efeitos dos modificadores sobre o comportamento reológico dos ligantes asfálticos.

Os ensaios desenvolvidos durante o Programa de Pesquisa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) e organizados dentro do método SUPERPAVE (*Superior Performance Pavement*) consideram as principais variáveis reológicas (tensão, deformação, tempo de carregamento e temperatura) e têm sido utilizados para caracterizar as propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos.

A classificação, a caracterização e, principalmente, a seleção do tipo de ligante a ser utilizado no pavimento através de ensaios baseados apenas na consistência a uma determinada temperatura não consegue prever o comportamento de materiais asfálticos no campo. Desta forma, podem ocorrer graves insucessos quando as condições em serviço, para as quais uma determinada mistura está sendo dimensionada, forem diferentes das condições para as quais o método foi desenvolvido, mesmo se o dimensionamento seguir corretamente as recomendações normalizadas.

A evolução tecnológica da modalidade rodoviária com veículos mais pesados e solicitações dos pavimentos cada vez mais acentuadas, principalmente em termos de carga por eixo, pressão dos pneus e tipos de rodagem, aliada à necessidade de utilização de materiais não-convencionais e/ou menos nobres, também ressaltam as limitações inerentes dos métodos tradicionais para avaliar solicitações e materiais diferentes daqueles que existiam quando os métodos empíricos foram desenvolvidos.

1.1 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica da utilização de borracha de pneus descartados moída em materiais para pavimentação asfáltica. Dentre as informações necessárias à avaliação da adição de borracha de pneus em materiais asfálticos destacam-se o método de incorporação da

borracha ao ligante (processo úmido), os fatores que podem influenciar o desempenho das misturas asfálticas (tipo, teor e granulometria da borracha, tipo e teor de asfalto, tempo de reação e temperatura de mistura) e os ensaios utilizados na avaliação das propriedades físicas, químicas e reológicas das misturas (ensaios tradicionais e ensaios do método Superpave).

O processo utilizado para produzir as misturas consiste no processo úmido, onde a borracha de pneus moída é incorporada ao ligante asfáltico antes da adição do agregado. O produto obtido do processo úmido é denominado de asfalto-borracha (*asphalt-rubber*).

Os objetivos da adição de borracha de pneus usados em ligantes asfálticos e misturas betuminosas são:

- minimizar o problema da disposição de pneus usados, pois em aterros sanitários ocupam muito espaço e, quando dispostos em locais inadequados, causam problemas ambientais e de saúde pública por facilitar a procriação de insetos e outros vetores de doença;
- melhorar o desempenho dos pavimentos mediante aumento na rigidez a elevadas temperaturas (reduzindo a deformação permanente nas trilhas de roda), aumento na flexibilidade (retardando o aparecimento de trincas), aumento na impermeabilização proporcionada pelos revestimentos asfálticos e utilização como selante de trincas existentes.

Este trabalho foi norteado por algumas perguntas: Quais os métodos existentes para misturar borracha de pneus e asfalto? Quais as características dos materiais (borracha e asfalto) que mais afetam a mistura e as propriedades do ligante produzido? Como escolher a porcentagem ótima de borracha a ser

incorporada ao ligante asfáltico? Quais os ensaios necessários para avaliar o ligante asfalto-borracha?

E, para atingir o objetivo principal, procurou-se:

- avaliar a utilização de materiais recicláveis (pneus, particularmente) em materiais asfálticos através de ensaios empíricos tradicionais e de ensaios desenvolvidos no Programa SHRP e utilizados no método Superpave;
- comparar o desempenho de ligantes asfálticos sem e com adição de borracha de pneus, através da avaliação de propriedades fundamentais, relacionadas com o desempenho em campo, e verificar se a adição de borracha de pneus em materiais asfálticos pode aumentar a resistência à formação de defeitos, particularmente deformação permanente e trincas por fadiga;
- avaliar o ligante asfalto-borracha e identificar os fatores que influenciam o seu desempenho;
- desenvolver modelos estatísticos para todas as propriedades medidas (penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, módulo de cisalhamento complexo, ângulo de fase e viscosidade Brookfield) em função dos fatores selecionados.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 7 capítulos. O **Capítulo 2** apresenta um estudo sobre as características e comportamento dos materiais asfálticos (propriedades reológicas) quando submetidos a diferentes carregamentos e temperaturas, durante um determinado período de tempo.

O **Capítulo 3** trata da revisão bibliográfica sobre as várias formas de utilização da borracha de pneus usados (inclusive reciclagem), enfatizando a sua aplicação em obras de pavimentação asfáltica. Aborda também, os principais aspectos do grave problema ambiental que representam os pneus descartados.

O **Capítulo 4** aborda o processo de produção do ligante asfalto-borracha, denominado de processo úmido e consiste em uma mistura de borracha e cimento asfáltico, a uma temperatura elevada (entre 150 e 200°C), durante um determinado período de tempo (entre 20 e 60 minutos). São identificados os principais fatores intervenientes, analisando-se como eles interferem no processo.

O **Capítulo 5** apresenta a programação fatorial de ensaios, desenvolvida para determinar a influência de alguns fatores sobre o desempenho do ligante asfalto-borracha. Para tanto, são considerados como variáveis dependentes os resultados dos ensaios tradicionais (penetração, ponto de fulgor e ponto de amolecimento), assim como resultados dos principais ensaios do método Superpave (viscosidade Brookfield, cisalhamento dinâmico, envelhecimento de curto e longo prazo e rigidez à fluência na flexão).

O **Capítulo 6** apresenta os resultados e a análise estatística dos resultados dos ensaios realizados no laboratório, em que as amostras de ligante asfalto-borracha foram submetidas aos ensaios tradicionais utilizados para caracterização de materiais asfálticos, assim como aos ensaios Superpave. Os resultados da análise estatística são apresentados em forma de tabelas, gráficos e, principalmente, modelos estatísticos de comportamento das variáveis dependentes em função dos fatores significativos.

O **Capítulo 7** apresenta as principais conclusões e os comentários finais, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 - LIGANTES ASFÁLTICOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Os asfaltos, materiais aglutinantes de cor escura, são derivados do petróleo, sendo que o elemento predominante é o betume (99,5%). Betume, muitas vezes usado como sinônimo de asfalto, é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (ROBERTS *et al.*, 1998).

Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação das frações mais leves (mais voláteis) do petróleo e aflorados à superfície em épocas remotas. São exemplos sempre citados os asfaltos naturais de Trinidad e do Lago Bermudez. Atualmente, quase toda a produção de asfalto resulta da destilação de petróleo em unidades industriais (refinarias). Em obras de pavimentação, os asfaltos podem ser denominados ligantes asfálticos, cimentos asfálticos ou materiais asfálticos, sendo adotado neste trabalho o termo mais genérico ligante asfáltico, pois aos asfaltos podem ser adicionados produtos que visam melhorar suas propriedades de engenharia (modificadores).

Cerca de 32 milhões de toneladas de asfalto são produzidas anualmente nos Estados Unidos, sendo que 84% são empregados como materiais para pavimentação, 12,5% como impermeabilizantes e o restante em outros diversos tipos de aplicações (ESTAKHRI *et al.*,1992). No Brasil, são produzidos pela Petrobrás cerca de 2 milhões de toneladas de cimento asfáltico de petróleo por ano (LEITE, 1999), utilizados principalmente em pavimentação asfáltica.

Em comparação com os pavimentos de concreto de cimento Portland (pavimentos rígidos), os pavimentos flexíveis, construídos com ligante asfáltico e agregado pétreo, apresentam menor custo de construção e proporcionam um conforto muito maior aos usuários, pois não requerem a construção de juntas de dilatação. Essas têm sido as principais razões do grande emprego de ligantes asfálticos em obras de pavimentação (ZAMAN *et al.*, 1995), principalmente em misturas asfálticas usadas na camada de revestimento.

O asfalto é um material complexo, tanto do ponto de vista de composição química como de propriedades de engenharia. Apresenta um comportamento viscoso (Figura 2.1), caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica (Figura 2.2), caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura.

Somente sob condições extremas o CAP se comporta como sólido elástico (baixa temperatura e pequeno tempo de carregamento) ou como líquido

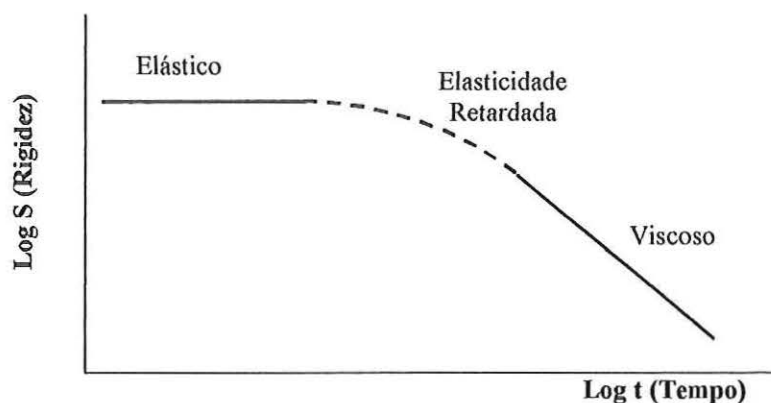


FIGURA 2.1 – Comportamento do ligante asfáltico em função do tempo de aplicação de carga (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

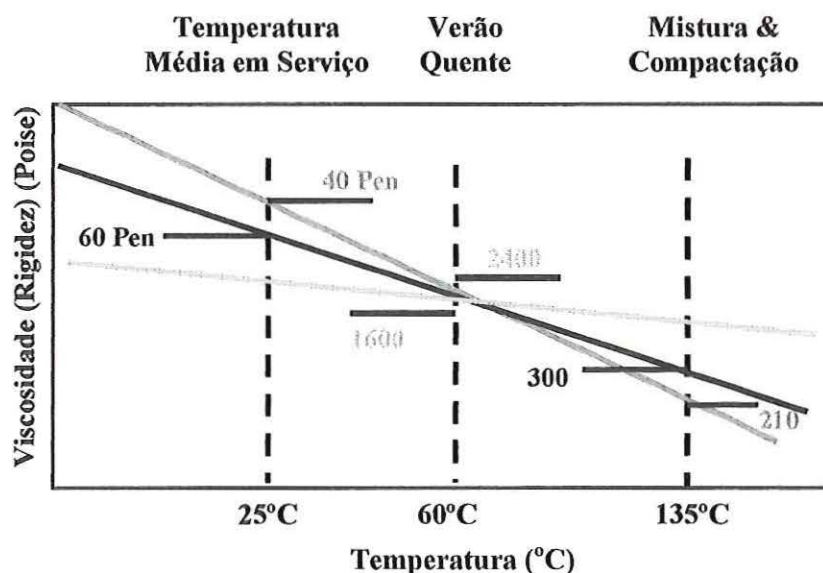


FIGURA 2.2 – Susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

Para ser utilizado em pavimentação, o asfalto, material termoplástico que é semi-sólido à temperatura ambiente, precisa ser aquecido para atingir a viscosidade adequada à mistura (>100°C). Além do aquecimento, as outras alternativas para tornar o asfalto trabalhável são a diluição com solventes derivados de petróleo e o emulsionamento. De forma geral, os ligantes asfálticos são classificados, de acordo com o seu processo de produção, em:

cimento asfáltico de petróleo (CAP), asfalto diluído de petróleo (ADP) e emulsão asfáltica (PETROBRÁS, 1996).

O asfalto diluído resulta da mistura do cimento asfáltico com derivados de petróleo mais leves, que proporcionam produtos menos viscosos e podem ser aplicados a temperaturas mais baixas. Os asfaltos diluídos são classificados em função do tipo de solvente que é misturado ao CAP: cura rápida, CR (nafta), cura média, CM (querosene) e cura lenta, CL (gasóleo) (IBP, 1990; LEITE, 1999).

As emulsões asfálticas são constituídas pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, formando um produto estável que pode ser empregado em serviços de pavimentação à temperatura ambiente. De acordo com o tempo de ruptura, as emulsões são classificadas em três tipos: ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL) (IBP, 1990).

Tanto nos asfaltos diluídos como nas emulsões asfálticas, o produto que permanece, respectivamente, após a evaporação dos solventes e da água, é o cimento asfáltico. O desempenho das misturas asfálticas, portanto, é função das propriedades do cimento asfáltico. Como visto, o cimento asfáltico apresenta um comportamento termoplástico, ou seja, quando aquecido apresenta características de um líquido viscoso e à temperatura ambiente torna-se semi-sólido. Essa consistência variável pode ser medida por ensaios empíricos (penetração) ou fundamentais (viscosidade).

Geralmente, em pavimentos, o ligante asfáltico é exposto a uma grande variação de temperatura (-20 a +60°C) e de carregamento, suportando considerável deformação quando submetido a cargas durante um determinado período de tempo.

Os principais defeitos de um pavimento asfáltico são o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as trincas por fadiga do revestimento e as trincas por contração de origem térmica.

Um ligante apresenta menor resistência à deformação permanente no início de sua vida em serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas temperaturas elevadas e por veículos trafegando a baixas velocidades (maior tempo de aplicação de carga). Por outro lado, a resistência às trincas por fadiga diminui com o envelhecimento, que aumenta a rigidez e diminui a ductilidade do ligante.

O estudo dos ligantes asfálticos apresenta um campo com evidente necessidade de pesquisas com o objetivo de desenvolver e viabilizar a utilização de novos produtos, capazes de tornar os pavimentos mais seguros, confortáveis e econômicos aos usuários, mediante redução ou retardamento do aparecimento de defeitos, particularmente as trincas por fadiga do revestimento, o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e as trincas por contração de origem térmica. Dentre as alternativas existentes destaca-se a incorporação da borracha de pneus aos ligantes asfálticos, objeto de estudo deste trabalho.

2.2 - REOLOGIA DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os materiais, de uma forma geral, apresentam um comportamento que varia de acordo com o tipo de solicitação (estática, dinâmica, longa ou curta duração), com as condições do meio ambiente (temperatura e umidade) e com as condições de confinamento. O estudo do comportamento tensão-deformação de um material, considerando-se também o tempo de aplicação do carregamento, se dá dentro da reologia.

A origem da palavra reologia data de 500 a.C., quando o filósofo grego Heráclito usou a expressão "πανταξει", "panta rhei", "all moves", "everything flows", que significa "tudo flui" (TRAXLER¹, 1961 *apud* LEITE, 1990). Algumas definições têm sido apresentadas. FERREIRA (1986) apresenta reologia como sendo a parte da física que estuda o comportamento mecânico dos materiais que não são nem sólidos nem líquidos.

Segundo BARTH (1968), a reologia do asfalto é o estudo dos modelos tensão-deformação do material em relação ao tempo. CHAMECKI² (1961) *apud* COELHO (1996) define reologia (do grego, rhéos = fluxo) como o ramo da física que trata do estudo da deformação e do fluxo (ou fluência) dos materiais quando sujeitos a um carregamento qualquer, levando-se em consideração o tempo de duração desse carregamento.

A relação entre tensão e deformação em função do tempo de carregamento e da temperatura pode ser empregada para explicar o conceito de rigidez de um cimento asfáltico. A resposta típica de um material visco-elástico submetido a um carregamento durante um determinado tempo de aplicação de carga é apresentada na Figura 2.3 (no caso, tensões e deformações de cisalhamento, τ e γ). No instante da aplicação de carga, há uma deformação elástica (γ_E), a que são somadas, durante o tempo de aplicação de carga, uma componente elástica retardada (γ_{ER}) e uma componente viscosa (γ_V). Imediatamente após o descarregamento, ocorre a recuperação da deformação elástica, sendo necessário um período de tempo para a recuperação da deformação elástica retardada. A componente viscosa constitui a deformação permanente.

¹TRAXLER, R. N. (1961) - El asfalto, su composición, propiedades y usos. Companhia Editorial Continental. México

²CHAMEKI, S. (1961) - Síntese da reologia e da sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos. Curso de Especialização de Pavimentação Rodoviária. Publicação B-10-59. Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER, 1959. reimp. 1961. Rio de Janeiro, RJ

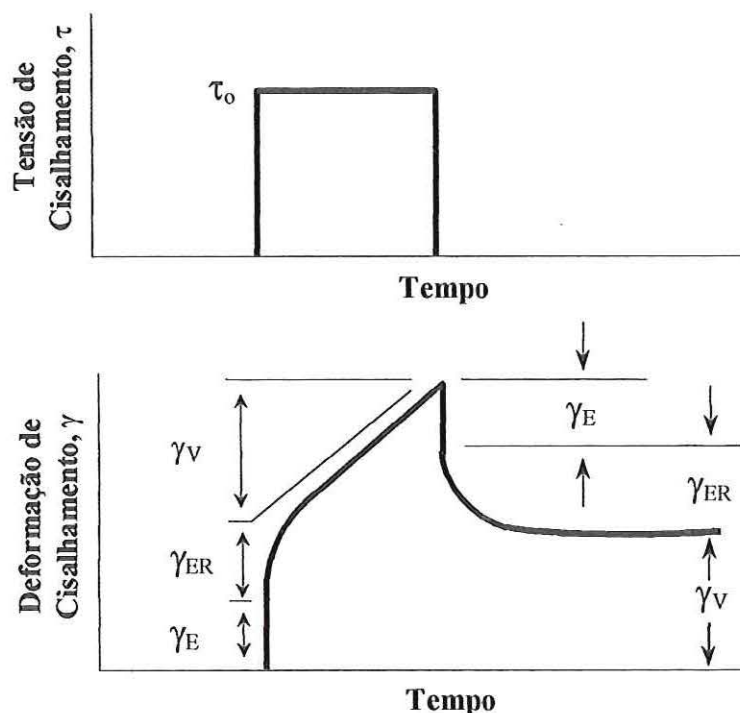


FIGURA 2.3 - Resposta visco-elástica típica de um ligante asfáltico sob carregamento, destacando-se as componentes elásticas (γ_E), elástica retardada (γ_{ER}) e viscosa (γ_V) (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)

Para a caracterização da rigidez de um ligante asfáltico, em virtude das amplitudes de temperatura e tempo de carregamento, é indicado a representação em escala logarítmica.

A Figura 2.4 apresenta curvas de ensaios de fluência (medida de deformação sob condição de carregamento constante, Figura 2.3, que permite a determinação da variação da rigidez) realizados a diferentes temperaturas (T_1 , T_2 , T_r , T_4 e T_5). Os resultados podem ser combinados em uma única curva denominada “curva mestra”, mediante translação das curvas de fluência ao longo do eixo das abscissas. Para cada curva de fluência, determinada a uma dada temperatura, tem-se um fator de conversão, $a(T)$. Os fatores de conversão podem ser plotados em função da temperatura (Figura 2.5).

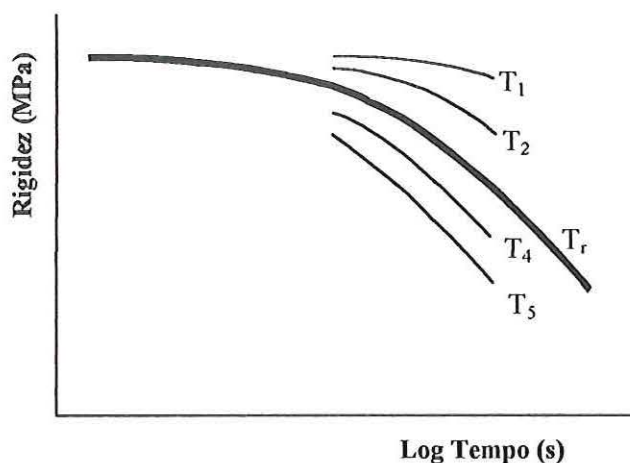


FIGURA 2.4 - Curvas de fluência realizadas a diferentes temperaturas utilizadas para determinar a curva-mestre (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)



FIGURA 2.5 – Superposição tempo-temperatura (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)

Esta equivalência entre tempo e temperatura é conhecida como superposição tempo-temperatura e permite que uma curva-mestre, associada a fatores de conversão tempo-temperatura, possa caracterizar completamente o comportamento reológico (tensão, deformação, tempo e temperatura) de um ligante asfáltico. Ou seja, a influência do tempo de carregamento é representada na curva-mestre, enquanto a influência da temperatura é representada pelos fatores de conversão.

A caracterização de um ligante asfáltico geralmente é feita através de ensaios dinâmicos. Num ensaio dinâmico, a amostra de asfalto atinge uma condição estável após número limitado de ciclos. Nessa condição são determinados o pico de tensão e o pico de deformação, cuja razão é o valor absoluto do módulo de cisalhamento dinâmico ou módulo complexo, G^* .

O G^* é, portanto, a medida da resistência total do material à deformação, quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento, e consiste de dois componentes: um elástico (recuperável) e um viscoso (não-recuperável). As setas indicam na Figura 2.6, G_1^* e G_2^* , que representam os módulos complexos dos asfaltos 1 e 2.

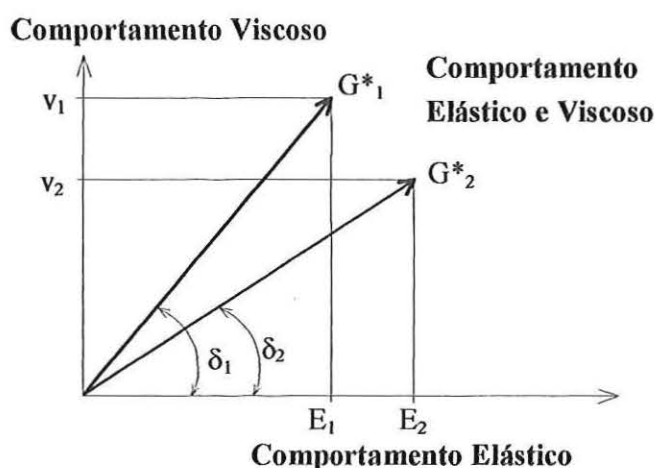


FIGURA 2.6 - Comportamento visco-elástico de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

O ângulo de fase, δ , é um indicador da quantidade de deformação recuperável e não-recuperável e corresponde ao intervalo de tempo entre a aplicação da carga (tensão aplicada) e a resposta obtida (deformação) (Figura 2.7). Para materiais puramente elásticos, o ângulo de fase será zero, enquanto que para materiais puramente viscosos, será 90° .

Os valores de G^* e δ dos asfaltos dependem da temperatura e da frequência de carregamento. A temperaturas altas, os asfaltos comportam-se como fluidos viscosos, sem nenhuma capacidade de recuperação ou restauração. Neste caso, a componente viscosa do asfalto é representada pelo eixo vertical (apenas o componente viscoso) na Figura 2.6, sem nenhum componente elástico de G^* , já que $\delta = 90^\circ$. A baixas temperaturas (menores que -20°C), os asfaltos comportam-se como sólidos elásticos e esta condição é representada pelo eixo horizontal (apenas o componente elástico) na Figura 2.6. Neste caso, não existe o componente viscoso de G^* , já que $\delta = 0^\circ$.

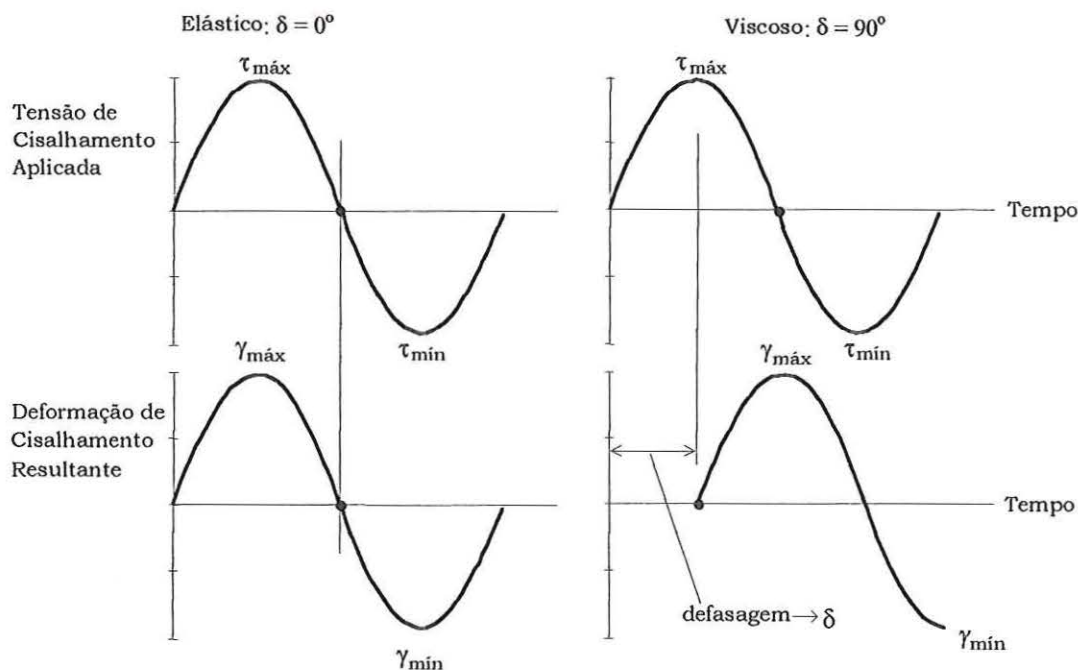


FIGURA 2.7 - Comportamento tensão-deformação de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

Para a construção de uma curva-mestre, CHRISTENSEN e ANDERSON (1992), que analisaram esse aspecto dos ligantes asfálticos durante o Programa SHRP, recomendam a coleta de dados de ensaios dinâmicos realizados com diferentes temperaturas e frequências. Posteriormente, deve-se selecionar uma temperatura de referência (25°C , no caso do Programa SHRP). Os dados de

todas as outras temperaturas são então convertidos em relação ao tempo de carregamento, até que as curvas se confundam em uma única função. A conversão pode ser feita com base em funções visco-elásticas, embora no Programa SHRP a determinação dos fatores de conversão tenha sido baseada no módulo de cisalhamento dinâmico (G^* , módulo complexo), determinado através do ensaio DSR (*Dynamic Shear Rheometer*).

Uma curva-mestra típica, determinada a partir de dados de ensaio DSR (que será discutido em detalhes no capítulo 5), é apresentada na Figura 2.8. O módulo vítreo corresponde a baixas temperaturas e elevadas frequências, apresentando geralmente valores muito próximos de 1 GPa para muitos ligantes asfálticos. O índice reológico é um parâmetro definido como a diferença entre o módulo vítreo e o módulo complexo (G^*) na frequência ω_0 (frequência para a qual o ângulo de fase, δ , é igual a 45°). O índice reológico pode ser um parâmetro de susceptibilidade térmica como o índice de penetração (PI, *penetration index*) e o número penetração-viscosidade (PVN, *penetration viscosity number*) (CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992).

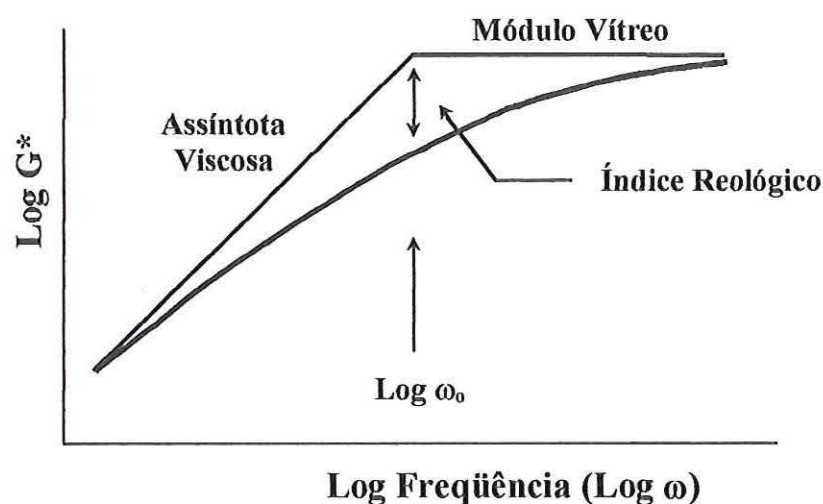


FIGURA 2.8 – Curva-mestra típica

Antes de ser colocado em serviço, um pavimento asfáltico passa pelas etapas de mistura (normalmente em usina), lançamento e compactação. Nessas etapas, o ligante asfáltico deve apresentar o comportamento de um fluido, facilitando sua mistura com os agregados minerais e aumentando a eficiência da compactação. A propriedade utilizada para caracterizar o comportamento dos ligantes asfálticos a altas temperaturas é a viscosidade, definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação de cisalhamento.

Os intervalos de viscosidade recomendados para mistura e compactação são, respectivamente, $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e $0,28 \pm 0,03$ Pa.s (Figura 2.9). São com esses intervalos que se faz a escolha das temperaturas adequadas para a mistura na usina e a compactação no campo.

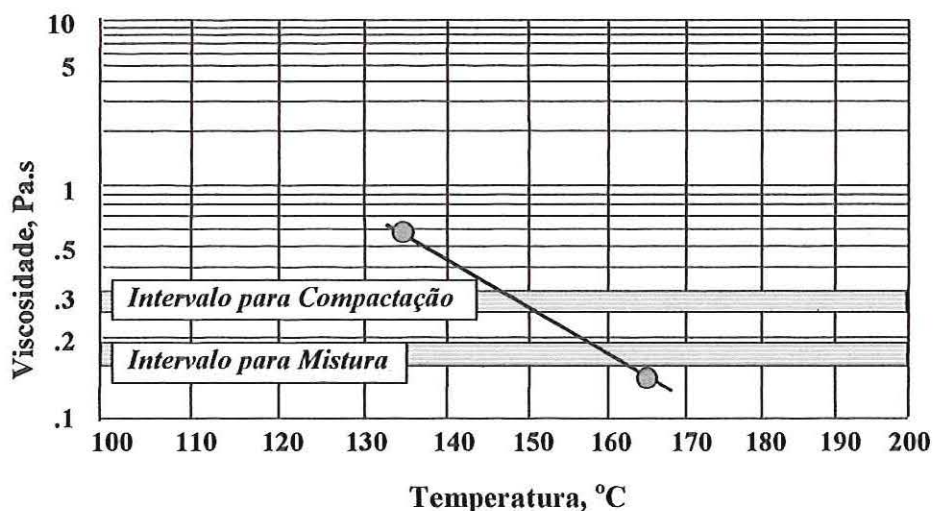


FIGURA 2.9 – Intervalos de temperatura para mistura e compactação em função da viscosidade do ligante asfáltico (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

O princípio mais usado para medir a viscosidade consiste em determinar a taxa (razão) de fluxo do material através de um tubo com seção transversal conhecida. Dessa forma, podem ser determinadas a viscosidade absoluta,

realizada a 60°C e que necessita de vácuo para o material escoar (fluir), e a viscosidade cinemática realizada a 135°C, em que o fluxo é proporcionado pela força da gravidade e por pressão da coluna de asfalto.

Para a caracterização dos ligantes asfálticos, visando o controle de qualidade nas etapas de mistura e compactação, tem sido mais utilizado o viscosímetro Brookfield (detalhado no capítulo 5) que determina a viscosidade aparente. A viscosidade do ligante é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado e misturado com o agregado. Apesar de algumas especificações recomendarem a temperatura de 135°C para a realização do ensaio, tem-se utilizado também a temperatura de 175°C quando se trabalha com ligantes modificados.

2.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A seleção de um ligante asfáltico envolve a análise das suas características reológicas, físicas e químicas. Historicamente, o parâmetro mais utilizado para classificar ligantes asfálticos é a sua consistência, que pode ser determinada através dos seguintes ensaios: penetração (ABNT/MB107); viscosidade absoluta a 60°C (ASTM D2171); viscosidade cinemática a 135°C (ASTM D2170) e ponto de amolecimento (Método Anel e Bola - ABNT/MB164).

Visando a segurança durante o manuseio dos ligantes asfálticos, as especificações recomendam limites para o ponto de fulgor, pois se um ligante asfáltico é aquecido a uma temperatura muito elevada pode ocorrer a liberação de vapores do produto, suficientes para, em mistura com ar e na presença de uma chama, provocar uma centelha. O ponto de fulgor indica a temperatura acima da qual o asfalto pode ser considerado um produto inflamável, sempre que houver uma fonte de ignição. Para determinar o ponto de fulgor pode ser usado o método de vaso aberto de Cleveland (ABNT/MB50).

Outro fator importante a ser analisado é o envelhecimento. Um cimento asfáltico é formado por moléculas orgânicas que reagem com o oxigênio do meio ambiente, ocasionando a oxidação, ou seja, a formação de uma estrutura mais dura e rígida. A oxidação aumenta com o aumento da temperatura.

Os ligantes asfálticos, quando misturados ao agregado mineral, sofrem um envelhecimento substancial em um curto período de tempo. Posteriormente, durante a vida em serviço, os pavimentos são submetidos a determinadas condições ambientais e de carregamento que resultam no envelhecimento a longo prazo. Sendo assim, é importante simular o envelhecimento dos ligantes asfálticos durante as fases de produção e de aplicação e também durante a vida em serviço, sendo para isso realizados os ensaios de filme fino em estufa (TFOT), os ensaios de rotação de filme fino em estufa (RTFOT), e os ensaios de envelhecimento em vaso de pressão (PAV), respectivamente.

Apesar de não existir material similar aos ligantes asfálticos quanto à sua aplicabilidade na construção de pavimentos, muitas vezes seu emprego requer o uso de aditivos para melhorar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, o que acaba alterando as propriedades reológicas do ligante (particularmente, borracha de pneus moída) (PETROBRÁS, 1996).

2.3.1 – Classificação por Penetração

A primeira especificação dos ligantes asfálticos desenvolvida nos Estados Unidos era baseada na aparência do asfalto natural e em ensaios químicos, usados para determinar a quantidade de betume (solúvel em dissulfeto de carbono) e de matérias orgânicas e inorgânicas presentes no asfalto. Com o crescimento da produção de misturas asfálticas, tornou-se evidente a necessidade de materiais que apresentassem uma determinada consistência para serem utilizadas na produção dessas misturas (ROBERTS *et al.*, 1998).

Em 1888, H.C. Brown inventou a máquina de penetração para determinar a consistência de um ligante asfáltico. Esse instrumento passou por algumas modificações até que, em 1910, tornou-se o principal equipamento para medir e controlar a consistência de asfaltos semi-sólidos a uma temperatura de 25°C. Entretanto, somente em 1918 o sistema de classificação por penetração (Tabela 2.1) foi introduzido pela ASTM (ROBERTS *et al.*, 1998).

A classificação por penetração é baseada, principalmente, na consistência do cimento asfáltico a uma temperatura de 25°C, considerada a temperatura média do pavimento em serviço, além de outros ensaios complementares (Tabela 2.1). Apresenta as classes 40/50, 60/70, 85/100, 120/150 e 200/300 (ASTM), sendo que no Brasil são utilizadas as classes 30/45, 50/60, 85/100 e 120/150.

TABELA 2.1 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por penetração - Regulamento Técnico 01/92 - REV.02 - DNC

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	VALORES				MÉTODOS	
		CAP 30/45	CAP 50/60	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 a 45	50 a 60	85 a 100	150 a 200	MB-107	D 5
Ductilidade a 25°C	cm	60 mín.	60 mín.	100 mín.	100 mín.		
Índice susceptibilidade térmica		-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1	(2)	
Ponto de fulgor	°C	230 mín.	235 mín.	235 mín.	220 mín.	MB-50	D 92
Solubilidade tricloroetileno	% massa	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	MB-166	D2042
Viscosidade Saybolt-Furol 135°C	s	110 mín.	110 mín.	85 mín.	70 mín.	MB-517	E 102; D2170; D2161(3)
Efeito do calor e do ar (ECA) a 163°C por 5hs:							
Penetração	(1)	50 mín.	50 mín.	47 mín.	40 mín.	MB-107	D 5
Varição em massa	%	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	MB-425	D1757

O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

Esta tabela não se aplica aos tipos de CAP produzidos pela ASFOR e RLAM.

(1) % da penetração original.

(2) Índice de susceptibilidade = $\frac{(500)(\log \text{ PEN}) + (20)(t \text{ } ^\circ\text{C}) - 1951}{120 - (50)(\log \text{ PEN}) + (t \text{ } ^\circ\text{C})}$ onde (t°C) = ponto de amolecimento

(3) Permitida determinação pelo método ASTM D2170 e posterior conversão pelo método ASTM D2161.

As principais vantagens da especificação com base na penetração são:

- a classificação é feita através de ensaios realizados a temperaturas próximas da temperatura de serviço;
- os ensaios são rápidos e necessitam de baixo custo de investimentos.

As principais desvantagens da especificação com base na penetração são:

- os ensaios são empíricos: não avaliam tensões e deformações;
- taxa de cisalhamento: alta e variável (agulha penetra mais rapidamente em asfaltos moles); incapaz de avaliar desempenho de materiais dependentes da taxa de cisalhamento (polímeros);
- penetrações similares a 25°C não refletem grandes diferenças entre asfaltos: não fornece informações sobre o desempenho a temperaturas de mistura e de compactação.

2.3.2 – Classificação por Viscosidade

Em meados da década de 60, o *Federal Highway Administration* (FHWA), a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a AASHTO e alguns departamentos de estradas de rodagem mudaram o sistema de classificação com base na penetração a 25°C para viscosidade a 60°C. Os principais objetivos eram substituir o ensaio de penetração (empírico) por um ensaio de viscosidade (científico) e medir a consistência a 60°C, que é a temperatura próxima da máxima temperatura que um pavimento atinge no verão (ROBERTS *et al.*, 1998).

No sistema de classificação pela viscosidade (Tabela 2.2) a unidade de medida é o poise, P (1P = 0,1 Pa.s). Essa classificação é baseada na viscosidade a 60°C, que apresenta a temperatura máxima obtida na superfície do pavimento, sendo dividida nas classes CAP7, CAP20 (ligantes mais utilizados) e CAP 40.

TABELA 2.2 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por viscosidade - Regulamento Técnico 01/92 - REV.02 - DNC

CARACTERÍSTICAS	unidade	VALORES			MÉTODOS	
		CAP-7	CAP-20	CAP-40	ABNT	ASTM
Viscosidade a 60°C	P	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000	MB-827	D 2171
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C	S	100 mín.	120 mín.	170 mín.	MB-517	E 102
	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150		D 2170 e D 2161(1)
Ductilidade a 25°C	cm	50 mín.	20 mín.	10 mín.	MB-167	D 113
Índice susceptibilidade térmica	-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1	(3)		
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	90 mín.	50 mín.	30 mín.	MB-107	D5
Ponto de fulgor	°C	220 mín.	235 mín.	235 mín.	MB-50	D 92
Solubilidade em tricloroetileno	% massa	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	MB-166	D 2042
Efeito do calor e do ar (ECA) a 163°C por 5hs:						
Variação em massa	%	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	MB-425	D 1757
Relação de viscosidade		4,0 máx.	4,0 máx.	4,0 máx.	(2)	

O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

Esta tabela não se aplica aos tipos de CAP produzidos pela ASFOR e RLAM.

(1) Permitida sua determinação pelo método ASTM D2170 e sua posterior conversão pelo método ASTM D2161.

$$(2) \text{ Relação de viscosidade} = \frac{\text{VISC. a } 60^{\circ}\text{C (poise) depois ECA}}{\text{VISC. a } 60^{\circ}\text{C (poise) antes ECA}}$$

$$(3) \text{ Índice de susceptibilidade} = \frac{(500)(\log \text{PEN}) + (20)(t \text{ } ^{\circ}\text{C}) - 1951}{120 - (50)(\log \text{PEN}) + (t \text{ } ^{\circ}\text{C})}$$

As principais vantagens da especificação com base na viscosidade são:

- propriedade fundamental;
- amplo intervalo de temperaturas;
- baseada na máxima temperatura da superfície do pavimento;
- precisão do ensaio bem estabelecida;
- controla a máxima susceptibilidade térmica;
- limita o envelhecimento (mudança de propriedades);
- informa sobre temperaturas de mistura e compactação.

As principais desvantagens da especificação com base na viscosidade são:

- é mais cara do que a classificação por penetração;
- os ensaios são mais demorados;

- não é aplicável a materiais não-Newtonianos, cujas propriedades são dependentes da taxa de cisalhamento;
- ampla faixa de propriedades para uma mesma classificação: falta de limite inferior para a susceptibilidade térmica.

Ainda durante a década de 60, o Departamento de Estradas da Califórnia desenvolveu o outro sistema de classificação, baseado na viscosidade do resíduo envelhecido (*aged residue*, AR) em um ensaio de rotação de filme fino em estufa (RTFOT): AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000, AR-16000. O valor numérico representa a viscosidade (a 60°C) do resíduo envelhecido em poises (ROBERTS *et al.*, 1991). A Figura 2.10 mostra uma comparação entre várias especificações tradicionais (relação entre rigidez e viscosidade).

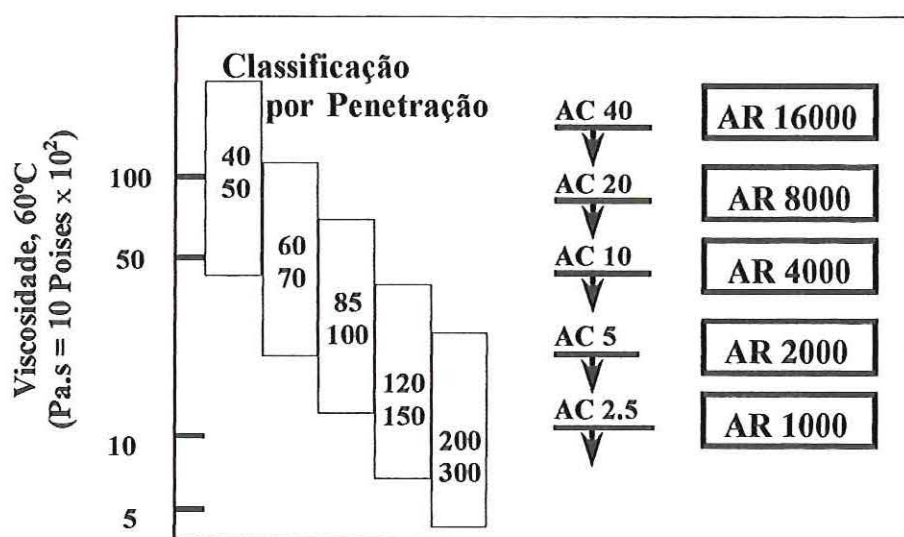


FIGURA 2.10 - Comparação entre as especificações tradicionais (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

2.3.3 – Classificação Superpave

Baseada em propriedades fundamentais, a nova especificação Superpave para materiais asfálticos seleciona o ligante em função do desempenho (PG, *Performance Grade*) sob condições climáticas da região em que será utilizado. Nesse sentido, são consideradas a maior média das máximas temperaturas do

pavimento durante 7 dias consecutivos e a mínima temperatura do mês mais frio (SHRP, 1994). A classificação Superpave é composta por dois números: o primeiro número corresponde à temperatura mais elevada do pavimento, ou seja, aquela em que os ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente devem ser realizados. O segundo número corresponde à temperatura mínima do pavimento, aquela em que os ensaios que analisam a resistência às trincas por contração de origem térmica devem ser realizados (ASPHALT INSTITUTE, 1995).

A Tabela 2.3 mostra os tipos de ligantes considerados pela especificação Superpave, onde os tipos PG 76 e 82 são necessários em climas muito quentes ou em locais de carregamento lento ou estático ou ainda tráfego excessivo de caminhões pesados. A Tabela 2.4 apresenta o sistema de classificação de ligantes do Superpave.

TABELA 2.3 - Tipos de ligantes Superpave

CLASSIFICAÇÃO A ALTA TEMPERATURA	CLASSIFICAÇÃO A BAIXA TEMPERATURA
PG 46-	34, 40, 46
PG 52-	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58-	16, 22, 28, 34, 40
PG 64-	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 70-	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 76-	10, 16, 22, 28, 34
PG 82-	10, 16, 22, 28, 34

2.4 - SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS PELO MÉTODO SUPERPAVE

A caracterização da consistência de ligantes asfálticos através dos ensaios de penetração e viscosidade apresenta limitações quando utilizada para seleção de ligantes e para a estimativa do desempenho ao longo da vida em serviço. Apesar da viscosidade ser uma propriedade fundamental, ela apenas fornece informações sobre o comportamento viscoso a alta temperatura, sem nenhuma

outra informação sobre o desempenho a média e a baixa temperatura. O ensaio de penetração, por sua vez, apenas descreve a consistência a uma temperatura intermediária, 25°C.

A seleção de um ligante pelo método Superpave começa pela determinação das temperaturas máxima e mínima do pavimento no local de projeto. O Superpave possui três métodos para auxiliar na seleção de um ligante:

- pela área geográfica: desenvolvimento de um mapa mostrando o tipo de ligante com base no clima e/ou em normas e orientações;
- pela temperatura do pavimento: necessidade de conhecer as temperaturas (máxima e mínima) do projeto do pavimento;
- pela temperatura do ar: necessidade de determinar as temperaturas do ar para convertê-las em temperaturas de projeto (do pavimento).

A temperatura máxima de projeto é determinada a 20 mm de profundidade da camada asfáltica de revestimento. Pode ser usada a seguinte equação:

$$T_{20\text{mm}} = 0,9545(T_{\text{ar}} - 0,0061\text{Lat}^2 + 0,2289\text{Lat} + 42,2) - 17,78 \quad (2.1)$$

onde:

$T_{20\text{mm}}$ = temperatura máxima do pavimento a 20 mm de profundidade, em °C;

T_{ar} = máxima média das temperaturas máximas de 7 dias consecutivos, em °C;

Lat = latitude da região de projeto, em graus.

A temperatura mínima de projeto pode ser determinada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$T_{\text{min}} = 0,859 T_{\text{ar}} + 1,7^\circ \quad (2.2)$$

onde:

T_{min} = temperatura mínima do pavimento, em °C;

T_{ar} = temperatura mínima do ar em um ano típico, em °C.

TABELA 2.4 - Classificação Superpave de Ligantes Asfálticos (D-4 – Proposal P248)

GRAU DE DESEMPENHO	PG 52							PG 58							PG 64							PG 70			
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28		
Temperatura máxima de projeto de pavimento, °C ^a (média das máximas de 7 dias consecutivos)	< 52							< 58							< 64							< 70			
Temperatura mínima de projeto de pavimento, °C ^b	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28		
LIGANTE ORIGINAL																									
Temperatura de Ponto de Fulgor, T48: min, °C	230																								
Viscosidade, ASTM D4402: máx. 3 Pa.s (3000 cP), °C	135																								
Cisalhamento Dinâmico, TP5 ^c G*/senδ, mín. 1,00kPa, Temp. Teste @10 rad/s, °C	52							58							64							70			
RESÍDUO DA ESTUFA DE FILME FINO ROTATIVO (RTFOT T240) OU ESTUFA DE FILME FINO (ECA T179)																									
Perda de massa máxima, %	1,00																								
Cisalhamento Dinâmico, TP5 ^c G*/senδ, mín. 2,20kPa, Temp. Teste @10 rad/s, °C	52							58							64							70			
RESÍDUO DA ESTUFA DE ENVELHECIMENTO SOB PRESSÃO (PAV PP1)																									
Temperatura de envelhecimento PAV, °C ^d	90							100							100							100 (110)			
Cisalhamento Dinâmico, TP5 ^c G*/senδ, máx. 5,0 MPa, Temp. Teste @10 rad/s, °C	25	22	19	16	13	10	7	28	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25		
Endurecimento físico ^e	Anotar																								
Rigidez a Fluência, TP1 ^f : S, máx., 300 MPa e valor-m, mín. 0,300. Temp. do Teste @ 60s	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18		
Tração Direta, TP3 ^f : deformação de ruptura, mín. 1,0%. Temp. Teste @ 1mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18		

^a A temperatura do pavimento pode ser estimada a partir da temperatura do ar usando uma equação contida no programa Superpave ou pode ser fornecida por uma agência específica, ou seguindo os procedimentos descritos no PPX.

^b Este requisito pode ser mudado a critério de uma agência específica, se o fornecedor garantir que o ligante asfáltico possa ser adequadamente bombeado e misturado em temperaturas onde todos os padrões de qualidade são atendidos.

^c Para controle de qualidade de produção de asfaltos não modificados, medidas de viscosidade de cimento asfáltico original podem substituir medidas de cisalhamento dinâmico G*/senδ, na temperatura em que o asfalto é um fluido Newtoniano. Qualquer medida padrão de viscosidade pode ser usada, incluindo medidas com os viscosímetros capilar e rotacional (AASHTO T201 ou T202).

^d A temperatura de envelhecimento do PAV é baseada nas condições climáticas: 90°C, 100°C ou 110°C. A temperatura de envelhecimento de 100°C é usada para PG-58 (e acima), exceto em condições de clima desértico, onde utiliza-se 110°C.

^e O ensaio de rigidez a fluência (TP1) é realizado em um grupo de vigotas de asfalto de acordo com a Seção 13.1. O valor da rigidez (S) e do módulo de relaxação (m) são determinados apenas para fins de informação.

^f Se a rigidez a fluência é inferior a 300 MPa, o teste de tração direta é desnecessário. Se a rigidez estiver entre 300 e 600 MPa, é necessário determinar o valor da ruptura no teste de tração direta.

No Estado de São Paulo, por exemplo, foram obtidas informações climáticas de uma região localizada na latitude 23°32,0'S e na longitude: 46°37,0'W. A Tabela 2.5 apresenta as temperaturas mínima, máxima, mínima absoluta e máxima absoluta dessa região do Estado de São Paulo nos seguintes períodos: 1931 a 1960, 1961 a 1990, 1995, 1996, 1997, 1998 e 1999 (Anexo A).

TABELA 2.5 – Temperaturas mínima, máxima, mínima absoluta e máxima absoluta do Estado de São Paulo

TEMPERATURA (°C)	ANO						
	1931-1960	1961-1990	1995	1996	1997	1998	1999
MÍNIMA	10,0	11,5	13,0	11,5	12,0	12,0	11,5
MÁXIMA	28,0	28,5	29,0	28,5	29,0	29,5	31,5
MÍNIMA ABSOLUTA	-2,0	1,0	13,0	11,5	6,0	10,0	5,0
MÁXIMA ABSOLUTA	35,0	37,0	29,0	28,5	35,0	36,0	37,0

Fonte: Instituto Astronômico e Geofísico – USP

Utilizando-se as equações 2.1 e 2.2 foram determinados os valores da máxima temperatura do pavimento e da mínima temperatura do mês mais frio (Tabela 2.6). Com base na Tabela 2.3, pode-se verificar que no Estado de São Paulo deve ser utilizado um ligante Superpave PG 64-10, o que significa que o ligante deve apresentar propriedades físicas adequadas de -10 até 64°C.

TABELA 2.6 – Temperaturas máxima e mínima de projeto (no pavimento)

TEMPERATURA (°C)	ANO						
	1931-1960	1961-1990	1995	1996	1997	1998	1999
T _{min}	10,3	11,6	12,9	11,6	12,0	12,0	11,6
T _{20mm}	51,1	51,6	52,1	57,9	52,1	52,6	54,5
T _{min} (min. abs.)	-0,02	2,6	12,9	11,6	6,9	10,3	6,0
T _{20mm} (max. abs.)	57,8	59,7	52,1	51,6	57,8	58,8	59,7

2.5 - USO DE MODIFICADORES EM LIGANTES ASFÁLTICOS

A mistura de materiais betuminosos e polímeros, visando melhorar as características do ligante asfáltico, não é recente. A primeira patente da combinação de uma borracha natural com asfalto, a ser utilizada como impermeabilizante, foi obtida por T. Hancock em 1823. Já a primeira patente de uma mistura de material betuminoso com borracha natural para construção de estradas foi obtida por E.E. Castell em 1844 (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

Aplicações práticas de asfaltos modificados se iniciaram em 1901, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. A primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época. O principal objetivo em se combinar asfalto com polímeros é inibir a formação de trincas por fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos, além de aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente a altas temperaturas e a formação de trincas por origem térmica quando submetidos a baixas temperaturas (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

O uso de modificadores para melhorar as propriedades de um ligante em misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados visando melhorar o desempenho dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade (LING *et al.*, 1997).

BAHIA *et al.* (1998) destacam que os principais tipos de modificadores utilizados em materiais asfálticos são os polímeros (SBR, SBS e EVA) e a borracha de pneus descartados moída (Tabela 2.7). Para ROMINE *et al.* (1991), a borracha reciclada é um dos melhores modificadores utilizados em materiais asfálticos para pavimentação, ficando atrás apenas dos polímeros.

Outras evidências de que borracha de pneus usados podem melhorar algumas propriedades físicas e aumentar a vida útil do pavimento foram apresentadas por CHARANIA *et al.* (1991), por SCHNORMEIER (1980, 1983 e 1986) e por ROBERTS *et al.* (1989), que obtiveram resultados que indicam uma redução de tensões internas do ligante asfáltico a baixas temperaturas, e conseqüente aumento da resistência à formação de trincas por origem térmica, quando são adicionados o polímero SBR e a borracha de pneus.

TABELA 2.7 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar (Fonte: BAHIA *et al.*, 1998)

TIPO DE MODIFICADOR	CLASSE	DEFEITOS		
		DP	TF	TT
Polímero-Elastômero	Copolímero Estireno-Butadieno (SB)	x	x	x
	Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)	x	x	x
	Borracha Estireno-Butadieno (SBR)	x	x	x
	Borracha de Pneus	x	x	x
Polímero-Plastômero	Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	x	x	
Hidrocarboneto	Asfalto Natural	x	x	x
Fibra	Celulose	x		x
	Polipropileno	x	x	x
	Polyester	x		x
	Mineral	x	x	x

DP = Deformação Permanente; TF = Trincas por Fadiga; TT = Trincas Térmicas

3 – REUTILIZAÇÃO DE PNEUS

3.1 – INTRODUÇÃO

O processo de vulcanização de borracha foi descoberto casualmente por Charles Goodyear, em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida. Com isso, foi descoberto um material mais resistente e elástico, cuja demanda se multiplicou no mundo todo (GOODYEAR, 1999). Uma das principais aplicações da borracha vulcanizada sempre foi como pneu de veículos rodoviários.

Com o desenvolvimento da indústria automobilística no século XX, o consumo de pneus atingiu números estratosféricos. Cerca de 285 milhões de pneus, o equivalente a mais de 2 milhões de toneladas de borracha, são descartados anualmente nos Estados Unidos (Figura 3.1). No Brasil são colocados no mercado aproximadamente 61 milhões de pneus por ano, sendo que cerca de 38 milhões são resultados da produção nacional e 23 milhões são pneus reaproveitados (usados importados e recauchutados) (ANIP, 1996).

Quando abandonados em locais inadequados, os pneus servem como local para procriação de mosquitos e outros vetores de doenças e representam um risco constante de incêndio, que contamina o ar com uma fumaça altamente tóxica e

deixa um óleo que se infiltra e contamina o lençol freático. Além disso, a disposição de pneus em aterros sanitários é problemática, pois os pneus dificultam a compactação, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros. Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo caro.

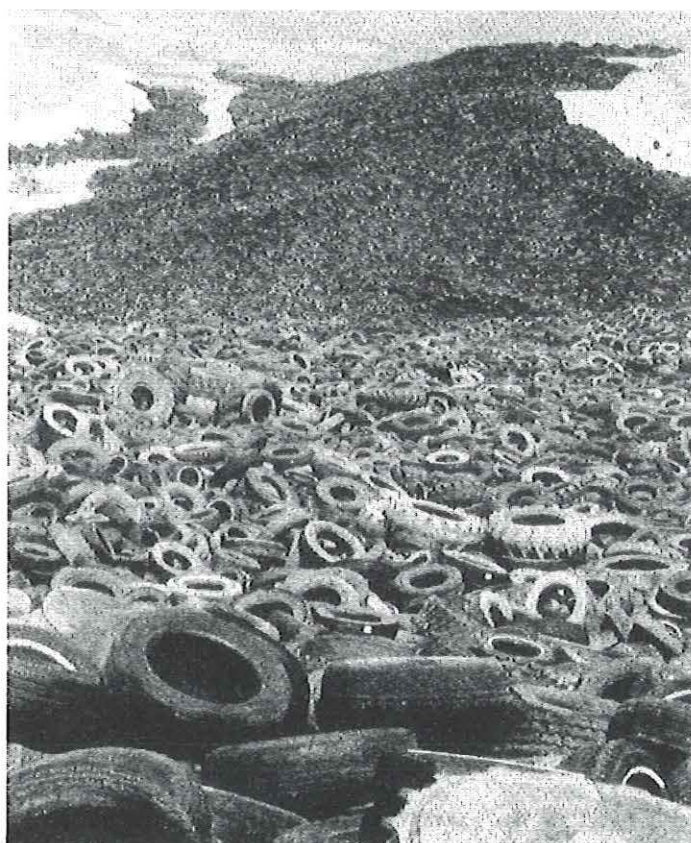


FIGURA 3.1 – Milhões de pneus descartados anualmente nos EUA
(ARPG, 1993)

A maior parte dos pneus descartados nos Estados Unidos (cerca de 65% do total, o que equivale a 188 milhões de pneus por ano) é disposta de forma inadequada, gerando graves problemas. Estima-se que haja, nos Estados Unidos, um passivo ambiental de 2 a 3 bilhões de pneus (HEITZMAN, 1992a). No Brasil, estima-se que pelo menos 50% dos pneus produzidos anualmente estão sendo descartados e dispostos em locais inadequados e que o passivo ambiental seja superior a 100 milhões de pneus (ANIP, 1996).

Na década de 80, nos Estados Unidos, grandes incêndios de pneus (Figura 3.2) causaram a contaminação do ar, da água e do solo. Dada a magnitude do problema, surgiu o interesse no desenvolvimento de pesquisas visando a reutilização de borracha de pneus em obras de engenharia. Em 1991, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (*Public Law 102-240 - ISTEA, 1991*) obrigou os Departamentos de Transportes Estaduais (DOTs) e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), em cooperação, a desenvolver estudos para utilizar pneus na construção de pavimentos asfálticos. Dessa forma, os estados americanos começaram a construir pavimentos asfálticos com borracha de pneus descartados moída: em 1994, cerca de 5% de pavimentos asfálticos, foram construídos com borracha de pneus descartados moída; em 1995, 10%; em 1996, 15% e a partir de 1997, 20% (EPPS, 1994).

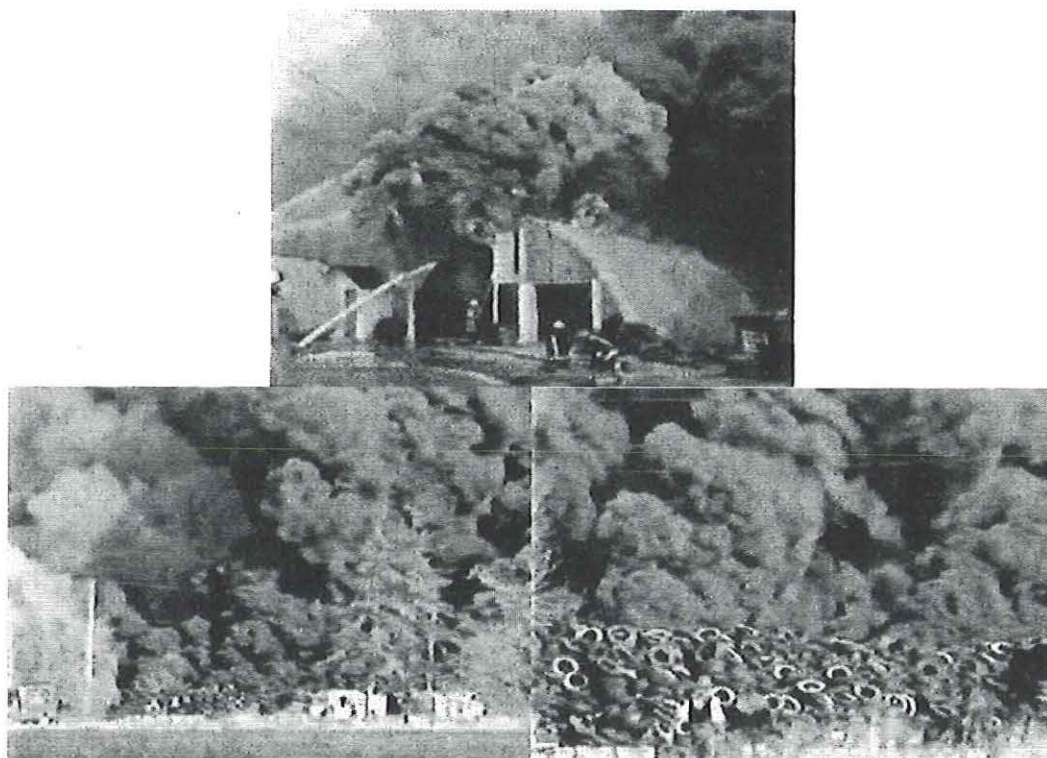


FIGURA 3.2 – Incêndio de pneus nos Estados Unidos causa a contaminação do ar, da água e do solo

No Brasil, ainda não há uma lei semelhante que obrigue a utilização de uma porcentagem mínima de pneus descartados em obras de pavimentação. Mas já ocorreram avanços, como a Resolução N^o258 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), aprovada em 26 de agosto de 1999, que estabelece o conceito de que o produtor é o responsável pelo destino final do produto. Por exemplo, no caso dos pneus, a carcaça voltaria para a montadora. Pela resolução N^o258, a partir de janeiro de 2002, produtores e importadores de pneus serão forçados a coletá-los e colocá-los em locais ambientalmente adequados. Além disso, a partir de 2005 começará a redução do passivo ambiental.

Independente do avanço de legislação brasileira, algumas empresas já estão trabalhando no sentido de transformar o que sempre foi rejeitado em fonte de renda. Um exemplo é a reutilização de pneus velhos e novos que não passaram no controle de qualidade das indústrias pela Borcol, Indústria de Borracha (Sorocaba-SP), que transforma cerca de 5,5 milhões de carcaças por ano em 8,4 milhões de peças, entre capachos, tapetes para banheiros e automóveis, pisos antiderrapantes e *pelétes* emborrachados (FARRO, 1997).

O Departamento de Meio Ambiente e Uso de Solo da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) e do Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (CIESP) promove, pelo menos uma vez por mês, seminários técnicos que orientam as empresas sobre as tecnologias e equipamentos disponíveis, visando a recuperação de produtos químicos, energia, água, combustível etc. Alguns municípios, como Santa Maria-RS, Porto Alegre-RS, Rio de Janeiro-RJ, Sorocaba-SP, São Paulo-SP, Piracicaba-SP, Apucarana-PR etc., dentre outros, tentando minimizar o problema, utilizam os pneus descartados em obras de drenagem e na fabricação de tapetes de automóveis, solas de sapatos, tiras para estofados etc. (CEMPRE, 1998).

A geração de energia pela queima e a recauchutagem foram as primeiras formas de reutilização de pneus. Com o avanço tecnológico, surgiram novas aplicações, como a mistura com asfalto, considerada nos Estados Unidos como uma das melhores soluções para a disposição dos milhões de pneus descartados anualmente.

Nos últimos 40 anos, a melhoria das técnicas de manufatura aumentou muito a vida útil dos pneus. A recauchutagem, que no Brasil atinge 70% da frota de transporte de carga e passageiros, é outro importante meio para a redução desses resíduos, pois prolonga a vida dos pneus em 40%. Porém, a maior parte deles, quando desgastada pelo uso ou imprestável para novas recauchutagens, acaba parando nos lixões, na beira de estradas e rios (um exemplo é o Rio Tietê, em São Paulo-SP, Figura 3.3) e até no quintal das casas, onde acumulam água que atrai insetos transmissores de doenças (TUNES, 1998).



FIGURA 3.3 - Os pneus retirados do Rio Tietê, em São Paulo-SP, acumulam-se na margem (TUNES, 1998)

3.2 – ALTERNATIVAS PARA REUTILIZAÇÃO DE PNEUS

Os pneus são compostos aproximadamente por 30% (em peso) de aço, 20 a 26% de borracha sintética e 21 a 33% de borracha natural. Geralmente, um pneu com cerca de 9 kg fornece entre 4,5 a 5,5 kg de borracha (RUTH *et al.*, 1997). A Tabela 3.1 apresenta os componentes químicos de pneus de automóveis e caminhões.

TABELA 3.1 - Composição química de pneus de automóveis e caminhões

COMPONENTES (%)	BANDA DE RODAGEM		PNEUS INTEIROS	
	AUTOMÓVEL	CAMINHÃO	AUTOMÓVEL	CAMINHÃO
NEGRO DE FUMO	32,0	30,0	31,0	28,5
BORRACHA SINTÉTICA	37,0	23,0	26,0	21,0
BORRACHA NATURAL	5,0	27,0	20,0	33,0
SOLÚVEL EM ACETONA	21,0	16,0	19,0	12,5
SÍLICA	5,0	4,0	5,0	5,0

Fonte: HEIZTMAN, 1992b

Os pneus descartados inteiros podem ser utilizados em diversas aplicações, como por exemplo em obras de contenções, nas margens de rios para evitar desmoronamentos, na construções de quebra-mares, na construção de parques infantis, no controle de erosões, na drenagem de gases em aterros sanitários etc. No Brasil, as carcaças são reaproveitadas como estrutura de recifes artificiais no mar, visando o aumento da produção pesqueira.

A Figura 3.4 ilustra as principais formas de disposição e reutilização de pneus descartados, que são apresentadas a seguir.

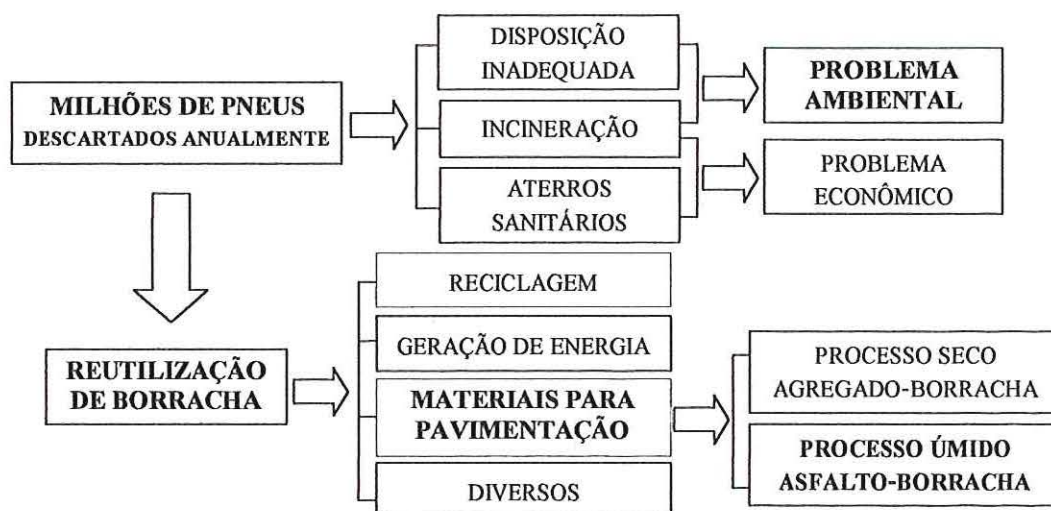


FIGURA 3.4 – Destino final de pneus descartados

3.2.1 – Reciclagem: fabricação de novos pneus e câmaras de ar

Apenas 10% das 300 mil toneladas de sucata de pneus disponíveis no Brasil para obtenção de borracha regenerada são de fato recicladas. A reciclagem de pneus é capaz de devolver ao processo produtivo um insumo regenerado por menos da metade do custo da borracha natural ou sintética, que é utilizado na fabricação de novos pneus e câmaras de ar. Além disso, economiza energia e poupa petróleo usado como matéria-prima virgem e até melhora as propriedades de materiais feitos com borracha (CEMPRE, 1998).

No Brasil, existe tecnologia em escala industrial para regeneração da borracha pelo processo a frio, obtendo um produto reciclado com elasticidade e resistência semelhantes às do material virgem. Além disso, essa técnica usa solventes capazes de separar o tecido e o aço dos pneus, permitindo seu reaproveitamento (CEMPRE, 1998).

Uma alternativa para reciclagem de borracha de pneus é dada pela empresa Relastomer Tecnologia e Participações S.A. (Anexo B). Os pneus velhos são cortados em lascas, transformados em pó de borracha e passados por um

sistema de peneiras, que permite a obtenção da granulometria desejada. Em seguida, passam por tratamento químico para possibilitar a desvulcanização da borracha. Em autoclaves giratórios, o material recebe o oxigênio, calor e elevada pressão, que provocam o rompimento de sua cadeia molecular. Assim, a borracha é passível de novas formulações. Ela sofre um refino mecânico, ganhando viscosidade, para depois ser prensada. No final do processo, o material ganha a forma de fardos de borracha regenerada. Eles são misturados com outros ingredientes químicos para formar uma massa de borracha que é moldada ao passar por uma calandra e um gabarito. Numa bateria de prensas, a borracha é vulcanizada, formando os produtos finais (CEMPRE, 1998). O produto obtido do processo Relastomer (borracha de pneus moída) pode ser empregado também em materiais asfálticos para pavimentação, como é o caso deste trabalho (mais detalhado no capítulo 4).

3.2.2 – Geração de energia através da queima de pneus

A queima a céu aberto, que gera fumaça negra de forte odor (dióxido de enxofre), é proibida em vários países, inclusive no Brasil (TUNES, 1998). Porém, a queima de pneus velhos em fornos controlados é uma alternativa rentável de reaproveitamento, pois cada pneu contém a energia de 9,4 litros de petróleo. No Brasil, calcula-se que são utilizados cerca de 500 mil pneus como combustível, proporcionando uma economia de 12 mil toneladas de óleo.

Segundo TUNES (1998), o melhor método para queimar os pneus sem que ocorra problema com a fumaça negra e poluente é o co-processamento, ou seja, a queima de resíduos industriais em fornos de cimento em que resíduos são usados para gerar energia. A queima de resíduos industriais a 1700°C transforma quimicamente as substâncias perigosas, fazendo com que as emissões de gases na atmosfera sejam menos poluentes. As cinzas resultantes

são incorporadas ao cimento e ficam encapsuladas em concentrações aceitáveis (TUNES, 1998).

No Brasil, empresas como a Pirelli e a Mercedes Benz, por exemplo, já estão economizando 50% no descarte de seus resíduos, enquanto os fabricantes de cimento economizam em combustível. Os principais usuários de pneus em caldeiras são as indústrias de papel e celulose e as fábricas de cal e cimento, que usam a carcaça inteira e aproveitam alguns óxidos contidos nos metais dos pneus radiais (TUNES, 1998).

3.2.3 – Diversos

A trituração dos pneus para uso na regeneração da borracha, mediante a adição de óleos aromáticos e produtos químicos desvulcanizantes, é um dos principais mercados para a reutilização desse material. Com a pasta resultante deste processo, as indústrias produzem tapetes de automóveis, solados de sapato, pisos industriais e borrachas de vedação, entre outros. Uma outra forma de reaproveitamento dos pneus é utilizar a borracha cortada em pedaços de 5 cm na aeração de composto orgânico (suporte estrutural). Essas partículas devem ser retiradas do adubo antes da sua comercialização.

3.2.4 – Incorporação em materiais asfálticos para pavimentação

Estima-se que 40% dos gastos públicos com rodovias sejam empregados em pavimentos. Considerando-se os custos para os usuários (consumo de combustível, desgaste de pneus e equipamentos), da ordem de 10 vezes maiores que os custos para os organismos rodoviários (construção, manutenção e restauração), tem-se que os custos totais da modalidade rodoviária podem representar de 2 a 17% do PIB de um país (PATERSON, 1991).

Portanto, no caso da utilização de pneus usados em obras de pavimentação, objeto de estudo deste trabalho e que será detalhado a seguir, além da redução significativa dos problemas ambientais, as pesquisas devem primeiro considerar os impactos sobre a qualidade dos pavimentos asfálticos, pois as rodovias representam grande parcela dos investimentos em transportes.

3.3 - REAPROVEITAMENTO DE PNEUS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Em obras de pavimentação, a borracha de pneus pode ser incorporada aos materiais asfálticos através de dois processos: úmido e seco. No processo úmido, a borracha de pneus descartados moída (cerca de 5 a 25% do peso total de ligante) é incorporada ao ligante asfáltico antes de se adicionar o agregado. Quando da adição de borracha ao ligante asfáltico, ocorre reação entre os componentes e a alteração de suas propriedades. No processo seco, a borracha de pneus é misturada com o agregado antes de se adicionar o ligante asfáltico. As técnicas de produção de mistura para o processo seco são semelhantes a às utilizadas na produção de CAUQ convencional.

Apesar de algumas evidências de que misturas betuminosas executadas com adição de borracha picada têm suas propriedades melhoradas, o que pode ser verificado em vários trabalhos realizados nas décadas de 70, 80 e 90 (Tabela 3.2), não existem resultados conclusivos sobre o desempenho dos pavimentos a longo prazo. Muito precisa ainda ser pesquisado, não só mediante ensaios tradicionalmente utilizados, mas também com ensaios e conceitos considerados durante as pesquisas de materiais betuminosos do Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) (ROMINE *et al.*, 1991; SOUSA *et al.*, 1994; BAHIA *et al.*, 1998).

TABELA 3.2 – Pesquisadores que avaliaram o ligante asfalto-borracha durante as décadas de 70, 80 e 90

PESQUISADORES	ANO
MORRIS e McDONALD	1976
COETZEE e MONISMITH	1979
HUFF e VALLERGA	1981
OLIVER	1981
ESCH	1982
JIMENEZ	1982
STEPHENS	1982
CHEHOVITS e MANNING	1984
JIMENEZ e MEIER, JR	1985
SHULER <i>et al.</i>	1985
ROBERTS e LYTTON	1987
TAKALLOU e HICKS	1988
ROGEE <i>et al.</i>	1990
SALTER e MAT	1990
HEITZMAN	1992a
HEITZMAN	1992b
KRUTZ e STROUP-GARDINER	1992
EPPS	1994
SHASHIDHAR e CHOLLAR	1994
LIANG e LEE	1996
MADAPATTI <i>et al.</i>	1996
ZAMAN <i>et al.</i>	1995
BILLITER <i>et al.</i>	1996
SHIH <i>et al.</i>	1996

3.4 – BREVE HISTÓRICO DA ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS MOÍDA EM MATERIAIS ASFÁLTICOS - PROCESSO ÚMIDO

Durante muitos anos, engenheiros e químicos trabalharam misturando borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos na tentativa de melhorar as propriedades elásticas do ligante asfáltico. Mas é

só na década de 40 que se inicia a história da adição de borracha de pneus reciclada em materiais para pavimentação asfáltica com a Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company*, que introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado Ramflex™. E, a partir da década de 80, a adição de borracha de pneus usados em misturas asfálticas passou a ser considerada, também, uma alternativa excelente para diminuir os problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos (Figura 3.5).



FIGURA 3.5 – Milhões de pneus dispostos inadequadamente

3.4.1 - DESENVOLVIMENTO DO ASFALTO-BORRACHA

Vários trabalhos publicados no *National Seminar on Asphalt-Rubber*, realizado pelo FHWA, em 1981, apresentam os aspectos históricos do desenvolvimento do asfalto-borracha.

Em 1963, Charles H. McDonald, considerado o pai do sistema asfalto-borracha (*asphalt-rubber*) nos Estados Unidos, trabalhando para a *Sahuaro Petroleum*,

iniciou uma pesquisa com o intuito de desenvolver, com a incorporação de borracha moída, um material "altamente elástico" para ser aplicado na manutenção da superfície de pavimentos asfálticos.

Suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um produto composto de ligante asfáltico e 25% de borracha de pneu moído (de 0,6 a 1,2 mm), misturados a uma temperatura de 190°C durante 20 minutos, para ser utilizado em remendos. Esse produto, denominado "band-aid", foi utilizado também como selante de trincas (Figura 3.6) e como camada de reforço (através do processo denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer*, SAMI). A primeira aplicação foi feita em uma rua na cidade de Phoenix, onde pôde-se verificar que, após 6 anos, o pavimento não apresentava a formação de trincas por reflexão. McDonald continuou seu trabalho experimental na cidade de Phoenix, juntamente com a empresa *Atlos Rubber Inc.*, onde foram construídos trechos no *Phoenix Sky Harbor International Airport*, em 1966.

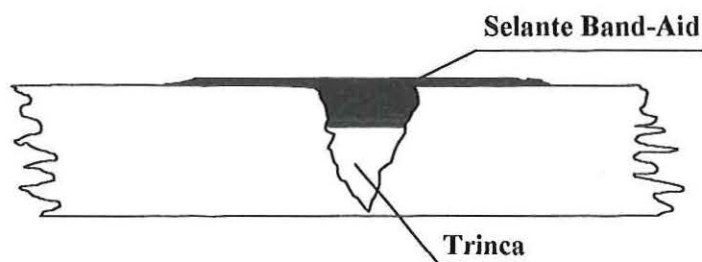


FIGURA 3.6 - Configuração de selante "band-aid" (Fonte: CRAFCO, 1980)

Em 1968, o Departamento de Transportes do Arizona (*Arizona Department of Transportation*, ADOT) construiu o primeiro pavimento usando o sistema *Stress Absorbing Membrane* (SAM), que consistia de um tratamento superficial com ligante asfalto-borracha. A maior dificuldade na utilização do produto estava na sua aplicação, pois mesmo aquecido o composto ficava muito viscoso para ser lançado com o distribuidor de asfalto convencional. Por

esse motivo, para construir trechos grandes foi usada a máquina de lama asfáltica para aplicar o asfalto-borracha. De 1968 a 1971 o estudo foi direcionado para aperfeiçoar o processo de aplicação e, em 1971, o ADOT construiu um trecho experimental de 21 quilômetros na *Interstate* 40, próxima a Winslow, onde foi adicionado querosene ao asfalto-borracha para facilitar sua aplicação.

A *Sahuaro Petroleum* e a *Asphalt Company* desenvolveram um tipo de asfalto-borracha para aplicar em capas selantes. Esse produto foi patenteado pela *Sahuaro Petroleum* e pela *Asphalt Company* como *Overflex*TM.

O *Federal Highway Administration* (FHWA), desde o início da década de 70, tem contribuído para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de pesquisas sobre o uso de borracha de pneus moída em materiais para pavimentação asfáltica. Em 1971, foi publicado o trabalho *An Annotated Bibliography on Use of Rubber in Asphalt Pavements* (FHWA-RD-71-1), que contém um resumo de 86 projetos onde foi adicionada borracha de pneus em materiais para pavimentos asfálticos.

Em 1974, a Divisão de Projetos do FHWA, *Demonstration Projects Division*, iniciou um estudo sobre materiais para pavimentos asfálticos contendo borracha reciclada. O principal objetivo desse estudo foi incentivar o uso de asfalto-borracha na construção e manutenção de rodovias, uma vez que o produto apresentava características de desempenho superiores aos materiais convencionais quando comparados aos resultados de laboratório e de campo. Além disso, esperava-se que o aumento do uso de asfalto-borracha expandiria o mercado de borracha reciclada, cooperando com a redução do problema de disposição de resíduos causado por milhões de pneus de caminhões e automóveis descartados anualmente nos Estados Unidos.

Em 1975, a *Arizona Refining Company Inc.* (ARCO) desenvolveu um novo ligante, com 80% de ligante asfáltico e 20% de borracha moída, utilizando borracha reciclada desvulcanizada e óleo, ao invés de querosene, para diferenciar do produto da *Sahuaro*. Esse produto foi denominado de Arm-R-Shield™. Mais tarde (em 1985), as companhias fundiram-se em uma associação comercial conhecida como *Asphalt Rubber Producers Group* (ARPG). No entanto, a técnica ficou conhecida como Tecnologia McDonald. O principal resultado dos trabalhos desenvolvidos por McDonald, Arizona DOT, Sahuaro e ARCO foi que cerca de 35 estados americanos passaram a utilizar o asfalto-borracha em pavimentos.

No início de 1976, o FHWA anunciou oficialmente o uso de asfalto-borracha na construção de pavimentos asfálticos através do trabalho *Demonstration Project No. 37, The Use of Discarded Tires in Highway Construction*. Esse projeto incentivava os departamentos rodoviários a construir tratamentos superficiais (SAM) e camadas de reforços (SAMI) usando o ligante asfalto-borracha. Como parte da tentativa de divulgar essa nova técnica, o FHWA também forneceu recursos para a construção e avaliação de projetos experimentais, em virtude dos custos mais elevados (quando comparado ao material convencional). Com isso, 40 projetos foram construídos e avaliados pelo programa.

Como outra forma de tentar divulgar a técnica, congressos e conferências (como por exemplo, o *National Seminar on Asphalt-Rubber*, realizado pelo FHWA, em 1981 e 1989) enfatizavam a necessidade de maiores informações sobre aplicações, especificações, ensaios e formas de avaliação do uso de asfalto-borracha em pavimentos flexíveis, o que poderia ser alcançado com os resultados dos projetos desenvolvidos com o incentivo do próprio FHWA.

Dessa forma, algumas empresas e órgãos responsáveis pela infra-estrutura rodoviária demonstraram interesse em desenvolver essa nova técnica.

Em 1981, a “*Beugnet Company*” iniciou o uso de asfalto-borracha na França, misturando cerca de 10 a 30% de borracha com ligante asfáltico, a uma temperatura de 200°C. Este material foi patenteado com o nome de *Flexochape*. Os resultados da caracterização desse material foram: viscosidade alta (8 Poise a 200°C), ponto de amolecimento maior que 60°C, maior elasticidade, resiliência alta a baixas temperaturas e adesividade dez vezes maior que asfalto sem borracha a 20°C. Em 1985 foi feita uma modificação no processo de mistura, através da incorporação de um catalisador na mistura. Os resultados foram os seguintes: maior viscosidade, aumento na temperatura de ponto de amolecimento (de 15 a 20% dependendo do catalisador), manutenção por mais tempo das propriedades elásticas originais no ligante e maior adesividade.

Em 1983, a Divisão de Projetos do FHWA iniciou um trabalho experimental (*Experimental Projects No. 3, EP-3 - Asphalt Additives*), que tinha como objetivo principal o desenvolvimento de materiais asfálticos modificados com uso de aditivos para aplicar em obras de pavimentação asfáltica. Em 1986, o FHWA publicou o trabalho *Investigation of Materials and Structural Properties of Asphalt-Rubber Paving Materials* (FHWA-RD-86-027), onde foi apresentado o resultado das avaliações de campo de mais de 200 seções de testes, construídas entre 1977 e 1984.

Até o início da década de 90 já existiam cerca de 16.000 quilômetros de rodovias construídas com o asfalto-borracha. Em 1991, foi formulada a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (*Section 1038 - Intermodal Surface Transportation Efficiency Act - Public Law 102-240*) que

obrigava os Departamentos de Transportes e de Proteção Ambiental a desenvolverem estudos para utilizar borracha de pneus descartados em materiais para pavimentação.

No Brasil, na década de 90, o CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás) começou a desenvolver pesquisas voltadas à área de materiais asfálticos modificados por polímeros, com o objetivo principal de estudar o desempenho desses materiais. Foram realizados, também, alguns experimentos com materiais asfálticos modificados por borracha de pneus moída, sendo desenvolvida uma pesquisa, com a UFSC, que tinha como objetivo comparar tipos de borracha de diferentes fornecedores e processos de produção. Outros estudos utilizando borracha de pneus moída estão sendo desenvolvidos em universidades e centros de pesquisas (como por exemplo, na UFRJ, UFRGS, UFSC, UEM e USP).

3.4.2 - VANTAGENS PREVISTAS COM A UTILIZAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA

Muitas são as vantagens previstas em função da incorporação de borracha de pneus usados a um cimento asfáltico. Merecem destaque:

- **Redução do envelhecimento** - a presença de antioxidantes e carbono na borracha dos pneus que é incorporada ao cimento asfáltico proporciona uma redução do envelhecimento por oxidação;
- **Aumento da flexibilidade** – misturas asfálticas com o ligante asfalto-borracha são mais flexíveis que as misturas asfálticas convencionais (STEPHENS, 1982; TAKALLOU e HICKS, 1988; McQUILLEN *et al.*, 1988), em virtude da maior concentração de elastômeros na borracha de pneus;

- **Aumento do ponto de amolecimento** - a adição de borracha faz com que o ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha aumente até 17°C em relação ao do ligante convencional (SALTER e MAT, 1990), o que significa um aumento da resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de rodas;
- **Redução da Susceptibilidade Térmica** - o uso de um ligante asfalto-borracha proporciona misturas asfálticas mais resistentes às variações de temperatura, ou seja, tanto o desempenho a baixas quanto a altas temperaturas são melhores quando comparados com pavimentos construídos com ligante asfáltico convencional (HEIZTMAN, 1992a, RUTH *et al.*, 1997).

3.4.3 - APLICAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA

O ligante asfalto-borracha tem sido aplicado em vários serviços de pavimentação, de selagem de trincas até um concreto asfáltico usinado a quente. Apesar da ocorrência de defeitos na superfície de rolamento, de uma maneira geral os resultados têm sido positivos. Os principais defeitos relatados são a exsudação e as trincas por contração de origem térmica, associados, principalmente, à dosagem inadequada do teor de asfalto-borracha (ESTAKHRI *et al.*, 1992). Quando comparado com o ligante convencional, pode-se verificar que a quantidade de asfalto-borracha necessária para uma determinada mistura é maior, o que justifica o problema de exsudação, mas ao mesmo tempo proporciona uma maior durabilidade à mistura asfáltica.

Inicialmente, o ligante asfalto-borracha foi desenvolvido para ser usado em atividades de manutenção e reabilitação e para tentar prolongar a vida de um pavimento. As primeiras observações das aplicações em campo mostraram que o asfalto-borracha retardava a formação de trincas por reflexão e por fadiga (MORRIS e McDONALD, 1976).



Outra aplicação foi como selante de trincas existentes (COETZEE e MONISMITH, 1979). Desde então, as aplicações de asfalto-borracha não têm ficado restritas às atividades de reabilitação (remendo, selante de trincas e juntas), mas também têm sido utilizados em tratamento superficial (SAM), transição entre pavimento existente e camada de reforço (SAMI) e revestimento de concreto asfáltico. Apresenta-se, a seguir, uma síntese das principais formas de aplicação do ligante asfalto-borracha:

a) Selante de trincas e juntas (*asphalt-rubber crack/joint sealant*)

Segundo ESTAKHRI *et al.* (1992), o ligante asfalto-borracha é um dos melhores selantes de trincas existentes, tanto de pavimentos asfálticos como de pavimentos de concreto de cimento Portland, sendo recomendado fazer a selagem com auxílio de um aplicador manual (Figura 3.7).

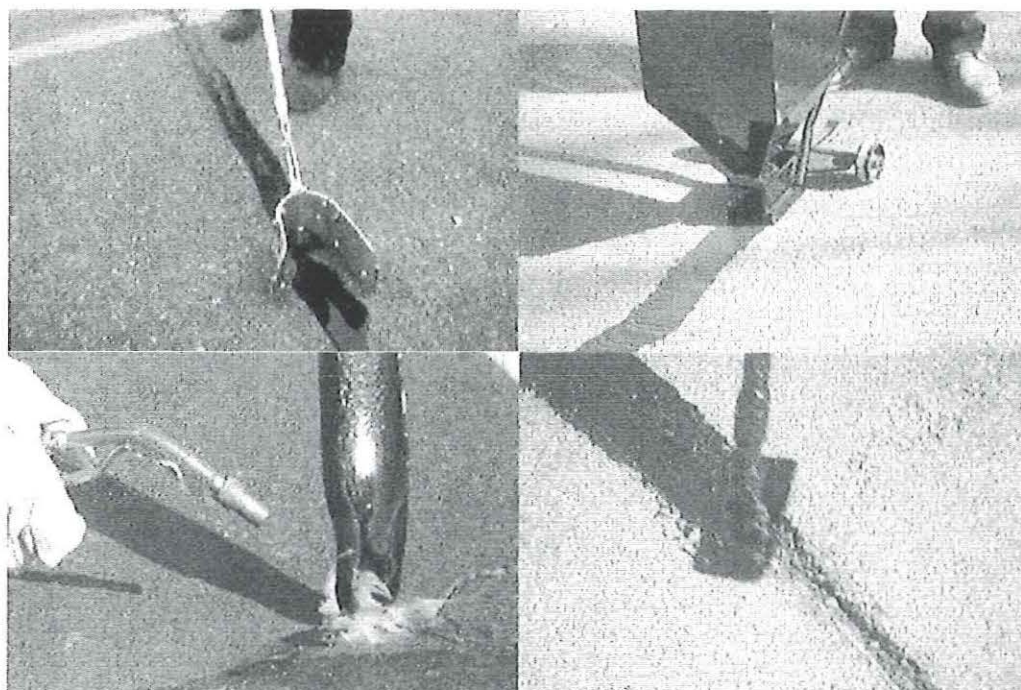


FIGURA 3.7 – Aplicador manual utilizado na selagem de trincas

(Fonte: CRAFCO, 1980)

Comparando-se a vida útil de selantes com e sem asfalto-borracha, verifica-se que o selante com asfalto-borracha dura cerca de 3 vezes mais que o sem asfalto-borracha. Serviços executados com asfalto-borracha apresentam um custo aproximadamente 50% maior do que os serviços executados com ligantes sem borracha. Apesar dessa diferença no custo, quando analisados em conjunto, custo e vida útil, pode-se verificar que serviços com asfalto-borracha são mais vantajosos.

A escolha do tipo de selante varia de acordo com as características da região em que será feita a aplicação (volume de tráfego, clima etc.). Nos Estados Unidos, cerca de 80% dos estados, em todas as regiões, utilizam esse tipo de selante, com destaque para Arizona (Figura 3.8), California, Georgia, Nebraska, New York, Pennsylvania, Texas e Wisconsin. O custo desse tipo de selante varia de 0,45 a 0,65 US\$/kg (HEIZTMAN, 1992a).



FIGURA 3.8 – Aplicação de selante de trincas no Estado do Arizona
(Fonte: CRAFCO, 1980)

b) SAM (*Stress Absorbing Membrane*)

Trata-se de um “tratamento superficial” com asfalto-borracha, geralmente usado para prevenir e/ou retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos asfálticos. Consiste em distribuir uma camada de ligante asfalto-borracha (com cerca de 20% de borracha) sobre a superfície do pavimento

existente, seguida de uma camada de agregados uniformes, espalhados sobre o ligante (Figura 3.9). A espessura de asfalto-borracha depende da granulometria do agregado, variando de 6 a 9 mm (HICKS *et al.*, 1995).

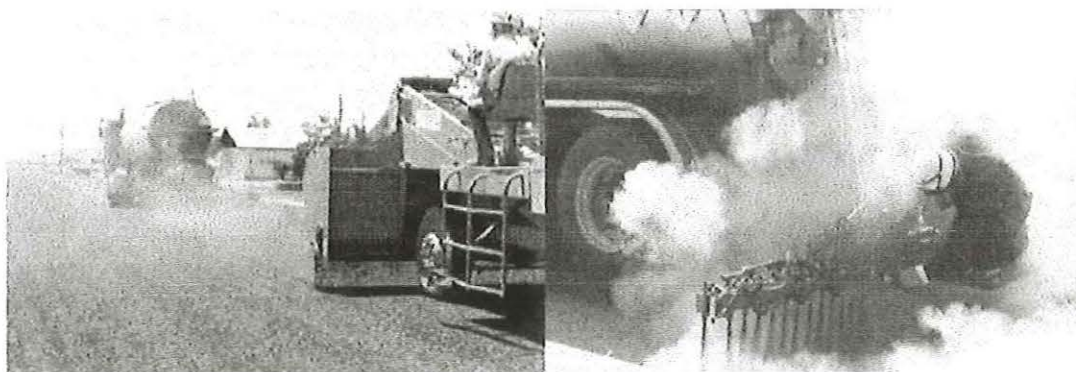


FIGURA 3.9 – Execução de um SAM (Fonte: ALL STATES ASPHALT Inc., 1999)

A distribuição dos materiais é feita de maneira similar à de qualquer tratamento superficial, sendo que normalmente aplica-se cerca de $2,7 \text{ l/m}^2$ de asfalto-borracha (diluído) e 19 kg/m^2 de agregados. As principais vantagens do uso de asfalto-borracha em tratamentos superficiais residem na maior susceptibilidade térmica e na maior elasticidade, que resultam em maior resistência as tensões provocadas pelo tráfego, particularmente as que resultariam em trincas por reflexão (daí o nome SAM) e por variações climáticas (HEIZTMAN, 1992a).

c) SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*)

É uma camada de asfalto-borracha aplicada entre camadas de CAUQ (existentes e de reforço) quando da execução de uma reabilitação (Figura 3.10), para retardar o desenvolvimento de trincas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes (HICKS *et al.*, 1995). Existem dois tipos de SAMI: um composto por duas camadas e outro composto por três camadas. O SAMI com duas camadas consiste no lançamento de um SAMI

entre o pavimento existente e cerca de 25 a 75 mm de uma camada de reforço de CAUQ. Um SAMI com três camadas consiste em primeiro lançar uma camada de nivelamento de CAUQ, seguida pelo SAMI, sobre o qual é colocada uma camada de reforço de CAUQ com cerca de 25 a 75 mm. Geralmente, o SAMI com três camadas é executado quando o pavimento apresenta problemas de trincas ou quando o recapeamento é sobre um pavimento rígido. Durante o processo de construção, deve-se tomar o cuidado para que o diluente adicionado ao asfalto-borracha evapore antes do lançamento da camada de reforço.

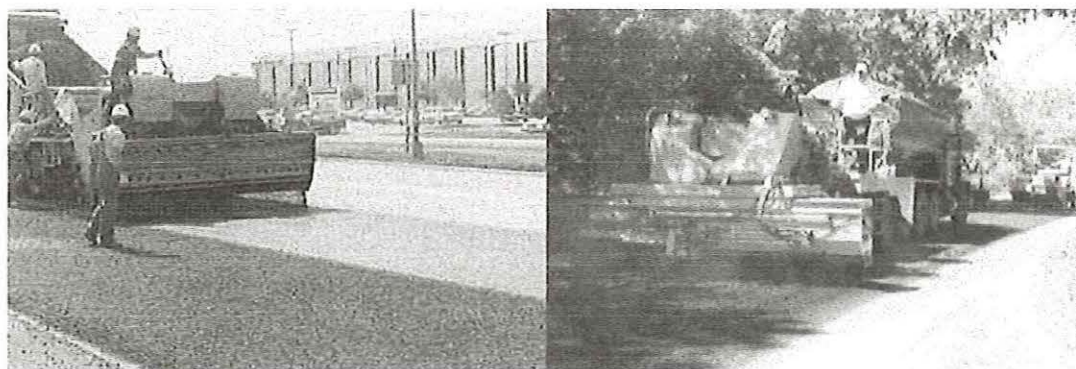


FIGURA 3.10 – Execução de um SAMI (Fonte: ALL STATES ASPHALT Inc., 1999)

d) Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)

O uso do ligante asfalto-borracha em misturas asfálticas de graduação densa, em substituição ao ligante asfáltico convencional, reduz o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as trincas por fadiga e as trincas por contração de origem térmica (TAKALLOU e SAINTON, 1992). O teor de borracha utilizado no asfalto-borracha varia de 5 a 25% do peso total de ligante asfáltico. Segundo a tecnologia inicialmente proposta por McDonald (BAKER RUBBER Inc., 1988), que não é a única (conforme será visto no capítulo 4), mas que permite o entendimento dos principais fatores intervenientes, o teor de borracha deve ser no mínimo de 15% do peso total de

ligante e a granulometria da borracha deve atender os valores recomendados na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Granulometria da borracha recomendada para misturas asfálticas de graduação densa

PENEIRA	% QUE PASSA
Nº 10	100
Nº 16	98 - 100
Nº 30	70 - 100
Nº 50	10 - 40
Nº 200	0 - 6

A principal diferença entre a produção de uma mistura asfáltica com ligante asfalto-borracha e uma mistura asfáltica convencional é a pré-mistura (reação da borracha com o ligante asfáltico) para produzir o ligante asfalto-borracha (Figuras 3.11 e 3.12). A reação é realizada em caminhões separados e/ou tanques. Quando a borracha é adicionada ao asfalto, a temperatura do ligante asfáltico deve estar entre 175 e 200°C. O ligante asfáltico e a borracha são colocados e misturados em um misturador e então bombeados para o tanque de armazenamento para reação. O tanque de reação tem um sistema mecânico que mantém agitação constante, mantendo a mistura dispersa. A temperatura deve ser mantida entre 160 e 190°C durante o tempo de reação, que deve ser no mínimo 30 minutos.

A construção de pavimentos contendo mistura asfáltica com ligante asfalto-borracha é bem parecida com a construção de pavimentos com mistura convencional. A temperatura do ligante asfalto-borracha deve estar entre 160 e 190°C. A temperatura de mistura varia entre 145 e 160°C, a temperatura de lançamento é geralmente mais alta e a compactação deve ser realizada enquanto o material está quente, pois a viscosidade do ligante asfalto-borracha aumenta rapidamente. Não devem ser utilizados rolos pneumáticos na compactação da camada.

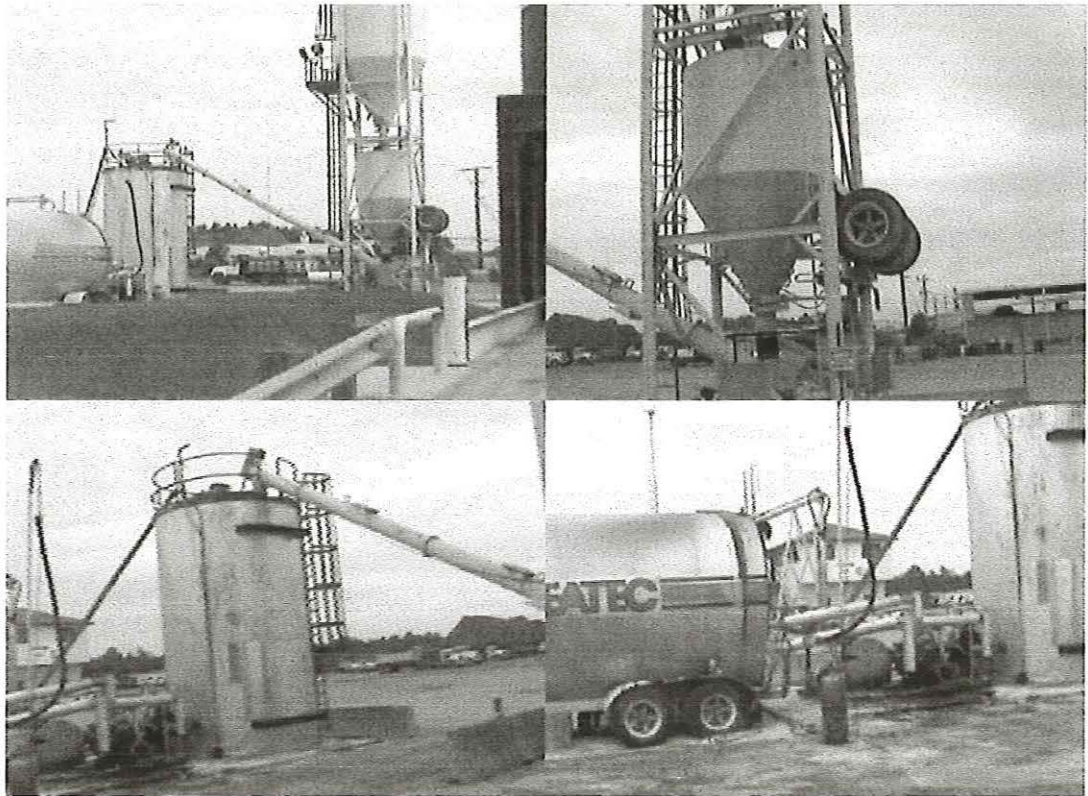


FIGURA 3.11 – Exemplo de usina de asfalto-borracha no Estado da Flórida

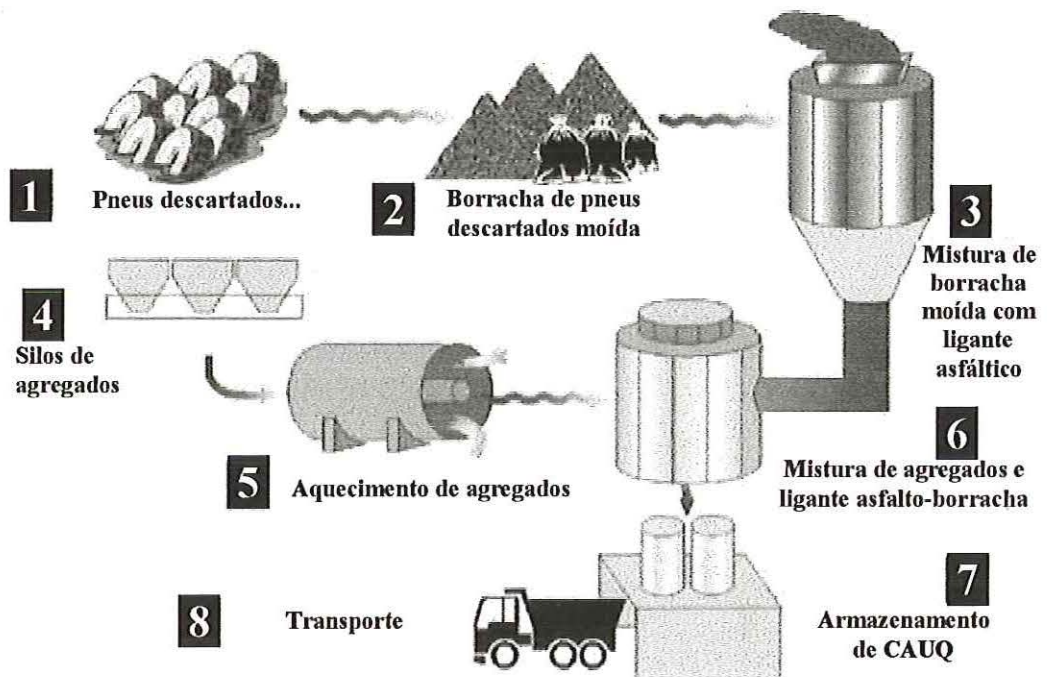


FIGURA 3.12 – Esquema de produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha

4 – PRODUÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA - FATORES INTERVENIENTES E ESPECIFICAÇÕES

4.1 - INTRODUÇÃO

O processo úmido consiste na incorporação da mistura da borracha de pneus moída com o ligante asfáltico antes da mistura do ligante com o agregado. O resultado é um ligante modificado que tem propriedades significativamente diferentes do ligante asfáltico original. Geralmente, tem-se a mistura de ligante asfáltico e borracha de pneus moída (5 a 25%), a uma temperatura elevada (150 a 200°C), durante um determinado período de tempo (20 a 120 minutos). Esta mistura reage e forma um composto chamado asfalto-borracha (*asphalt-rubber*), com propriedades reológicas diferentes do ligante original, podendo ser incorporados aditivos para ajustar a viscosidade da mistura. Um dos principais objetivos de se adicionar borracha de pneus moída em um ligante asfáltico é prover um ligante melhorado.

No processo úmido, a interação entre o ligante asfáltico e a borracha moída é classificada como uma reação. O grau de modificação do ligante depende de vários fatores, incluindo a granulometria (o tamanho) e a textura da borracha, a proporção de ligante asfáltico e borracha, o tempo e a temperatura de reação, a compatibilidade com a borracha, a energia mecânica durante a mistura e reação e o uso de aditivos (Figura 4.1).

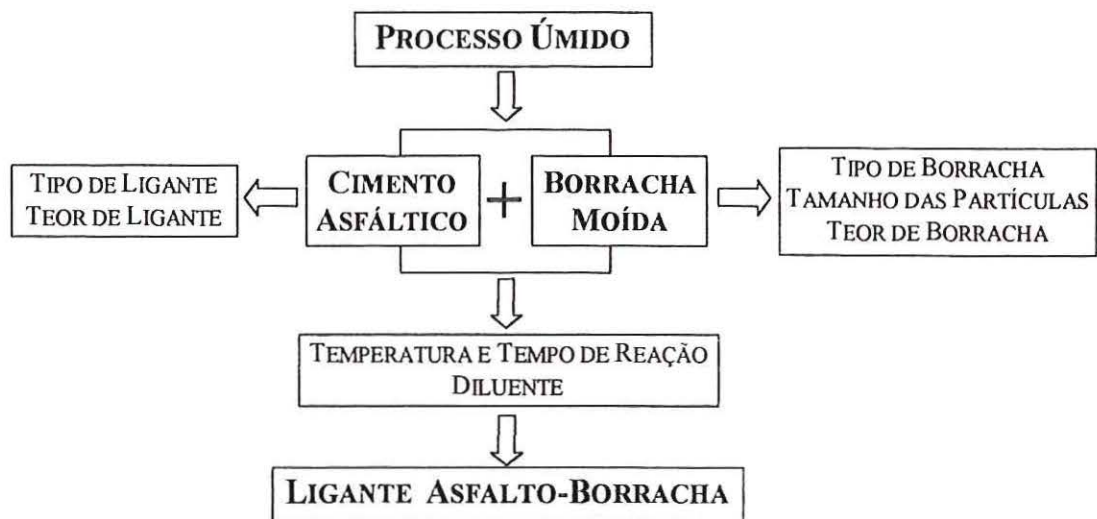


FIGURA 4.1 - Fatores que influenciam a produção do ligante asfalto-borracha

Sendo o asfalto um material de consistência semi-sólida à temperatura ambiente, é necessário torná-lo fluido para facilitar a mistura e incorporação da borracha moída. Para tanto, deve-se aquecer o asfalto até se atingir a viscosidade adequada. Além disso, a borracha, que também é aquecida previamente, deve ser misturada ao ligante durante um período de tempo suficiente para que resulte um produto uniforme, com consistência homogênea.

O tempo de reação pode ser reduzido quando se utiliza uma borracha muito fina, asfaltos menos viscosos e temperaturas altas durante a mistura. Entretanto, deve-se tomar cuidado com a temperatura, pois temperaturas elevadas podem reduzir a qualidade do ligante asfalto-borracha em razão da perda de voláteis e do envelhecimento acelerado (PAGE *et al.*, 1992).

Antes de preparar o ligante asfalto-borracha devem ser analisadas as características da borracha e do ligante asfáltico que será utilizado. Verifica-se, principalmente, a compatibilidade entre o asfalto e a borracha em termos de polaridade. Procura-se trabalhar com borrachas polares, pois no modelo

molecular dos asfaltos (ASPHALT INSTITUTE, 1995) as moléculas polares formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas e que é envolvida pelas moléculas apolares, que contribuem para as propriedades viscosas do asfalto.

Os componentes devem ser misturados com freqüente agitação para que a borracha seja incorporada ao ligante asfáltico, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação (ZAMAN *et al.*, 1995). Portanto, o equipamento misturador deve possuir um sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação de maneira constante e mais uniforme possível, além de um sistema de agitação que evite a segregação das partículas de borracha. Geralmente, o ligante asfalto-borracha deve ser utilizado em poucas horas, principalmente quando se trabalha com borracha mais grossa, pois pode ocorrer um aumento da viscosidade do ligante asfalto-borracha e, em alguns casos, a sedimentação da borracha.

A reação entre a borracha e o ligante asfáltico também é influenciada pelo tamanho das partículas de borracha, em função do efeito da superfície específica, que pode ser avaliado através dos resultados do ensaio de viscosidade do ligante asfalto-borracha com equipamento Brookfield (ASTM D2994). Por exemplo, resultados de estudo realizado por HEIZTMAN (1992a) com um ligante asfáltico modificado por 15% de borracha moída mostram que a adição de borracha de pneus descartados moída pode aumentar a viscosidade do ligante (a 135°C) em até 10 vezes.

Para definir os fatores mais importantes para o desempenho do ligante asfalto-borracha foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos desenvolvidos, basicamente em outros países, utilizando o processo úmido de mistura. Os trabalhos analisados apresentam uma variação de combinações de

fatores muito grande, sendo tais diferenças função, principalmente, de características de cada região e do tipo de aplicação.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos principais trabalhos analisados, que permitiram que se conhecesse, qualitativa e quantitativamente, a influência de muitos fatores sobre o desempenho do ligante asfalto-borracha.

Na Tabela 4.1 é dado destaque para os pesquisadores e a data de publicação do trabalho e, principalmente, para os fatores: tempo de reação, temperatura de mistura da borracha de pneus usados ao cimento asfáltico, granulometria da borracha, teor de borracha, tipo de ligante e finalidade de aplicação do asfalto-borracha (elemento da estrutura do pavimento).

Existem especificações técnicas para o ligante asfalto-borracha, com exigências de propriedades que devem ser atendidas visando sua utilização sob diferentes condições climáticas. Merecem destaque as especificações da BAKER RUBBER Inc. (Tabela 4.2) e da ASTM-D6114 (Tabela 4.3).

Pode-se observar que as duas especificações propostas são baseadas nas características climáticas. A ASTM (1997) apresenta uma especificação para três tipos de ligantes, que foram divididos de acordo com a média das temperaturas máxima e mínima. Considerando a temperatura média das máximas semanais, os limites estabelecidos foram: maior que 43°C, de 27 a 43°C e menor que 27°C. Enquanto que, segundo a temperatura média das mínimas mensais, os limites estabelecidos são: maior que -1°C, de -9 a -1°C e menor que -9°C.

Tabela 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha

PESQUISADOR (ano)	TEMPO (minutos)	TEMPERATURA (°C)	GRANULOMETRIA (mm)	TEOR DE BORRACHA (%)	TIPO DE LIGANTE	APLICAÇÃO
Arizona (HICKS et al., 1995)	30 a 60	175	< 2,00	20	AC-10	SAM; SAMI; selante
BAKER e CONNOLLY (1995)		175	0,42	10, 15 e 18	AC-20 e AC-10	CAUQ, reforço
BILLITER et al. (1996)	60	175, 190 e 200	2,0; 0,42 e 0,177	5, 10 e 20	AC-10 e AC-5	CAUQ, OGFC; DGFC
BROWN et al. (1997)	35	170	19,0 - 0,075	10	AC-20	CAUQ, SAMI
CHEHOVITS e MANNING (1984)		175		15 a 30		selante
COETZEE e MONISMITH (1979)		175 a 200		20		SAM; SAMI; selante, CAUQ, prevenir trincas, reforço
COOMARASAMY et al. (1996)		160 a 180	< 0,60	10	CAP 85/100, CAP150/200	CAUQ, camada de rolamento de graduação aberta e de graduação densa
DALY e NEGULESCU (1997)	20 a 40	170 a 220	0,075	15, 20	AC-5, AC-20 e AC-30	
EMERY (1995)	45	175	4,8; 2,0; 0,84 e 0,177	7		selante, CAUQ, impermeabilizante
Florida (HICKS et al., 1995)	10 10 a 15	150 a 170 150 a 175	0,177 a 0,42 0,177 a 0,42	5 (DGFC) 12 (OGFC)	AC-30 AC-30	Reabilitação; SAMI; OGFC; DGFC
HEIZTMAN (1992a)			0,177	20 a 30 (SAM); 15 a 20 (CAUQ); 8 a 9 (OGFC)		SAM; SAMI; selante, CAUQ
HUFF e VALERGA (1981)		175 a 204		20±2	AR-4000	SAM, SAMI, CAUQ, OGFC; DGFC
JIMENES (1982)	60	200	0,075 a 2,4	20	AR-4000	CAUQ
KHEDAYWI et al. (1993)	30	160 a 230	0,075 a 1,2	5, 10, 15 e 20	CAP 85/100	CAUQ
KRUTZ e STROUP-GARDINER (1992)	30	175	0,075 a 2,0	16 e 17	AC-5, AC-20, AC-40	CAUQ, prevenir trincas
LEITE (1999)	120	190		20	CAP 20	
LIANG e LEE (1996)	120	175	0,075 a 12,7	10, 15 e 20	AC-5, AC-10 e AC-20	CAUQ
MADAPATI et al. (1996)			0,177	15	AC-10 e AC-20	CAUQ, DGFC
MALPASS e KHOSLA (1995)	90	175	0,177 a 4,8	11	AC-20	reduzir trincas, CAUQ

Tabela 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha (continuação)

PESQUISADOR (ano)	TEMPO (minutos)	TEMPERATURA (°C)	GRANULOMETRIA (mm)	TEOR DE BORRACHA (%)	TIPO DE LIGANTE	APLICAÇÃO
MORRIS e MCDONALD (1976)	20	190	0,42 a 0,71	25	CAP 85/100	SAM, SAMI, selante, impermeabilizante, capa selante
OLIVER (1981)	60	200 a 220	0,3 a 0,6; 0,075 a 0,15	15	CAP 85-100	selante, CAUQ
OTOO (1999)	20	150	0,177	5, 10 e 15	AC-30	
Ravendale (REESE, 1994)	45	175		18	AR-4000	SAM, SAMI, selante, CAUQ
REESE (1994)	45	190		5, 10, 15, 20 e 25	AR-4000	CAUQ
REESE (1994)	5, 10, 15, 30 e 45	190		20	AR-4000	CAUQ
ROBERTS e LYTTON (1987)	30 a 120	165 a 215	0,075 a 2,0	15 a 28	AC-10	CAUQ
ROBERTS et al. (1989)	60 a 120	190 a 215	0,30 a 0,71	15 a 26		SAM, SAMI, selante, CAUQ
RUTH et al. (1997)	5,15 e 30	135, 150, 165, 180	0,177; 0,42; 0,84	0, 6, 12, 18 e 24	AC-5 e AC-30	
SHIH et al. (1996)		190	0,177	10 a 15	AC-20 e AC-30	CAUQ
SHULER (1982)		215 a 220	0,15 a 2,4	18 a 26	CAP 85/100	SAM, SAMI, selante, CAUQ
STROUP-GARDINER et al. (1993)		185	0,15; 0,30; 0,60 e 1,2	0, 10, 15 e 20	CAP 85/100; CAP 120/200	SAM, SAMI, selante, CAUQ
TAKALLOU e SAINTON (1992)	120	180 a 200		8, 9 e 10	CAP 80/100	
TAKALLOU et al. (1997)	45	200	0,15 a 2,4	15	AR-4000	prevenir trincas, reforço, CAUQ
TROY et al. (1996)		170 a 185	0,075 a 2,4	10 e 20	AC-5, AC-10 e AC-20	CAUQ
TULELAKE (REESE, 1994)	45	175		17	AR-4000	SAM, SAMI, selante, CAUQ
VALLERGA (1981)	45	190 a 215	0,075 a 2,4	20 e 25	AC5, AC40, AR-1000, AR-8000	CAUQ
WAY (1999)	60	175	0,075 a 2,0	20	AC10 e AC20	selante, CAUQ, prevenir trincas, reforço, OGPC
WEST et al. (1998)	60	165	< 0,42	20	AC30	CAUQ
ZAMAN et al. (1995)	30	175 a 200	0,177	2,5; 5; 7,5 e 10	AC30	reduzir trincas, CAUQ

TABELA 4.2 - Especificação para diferentes tipos de ligantes asfalto-borracha proposta por BAKER RUBBER Inc. (1988)

TIPO DE LIGANTE	ARB-1	ARB-2	ARB-3
Método de ensaio	ZONA CLIMÁTICA		
Média das máximas semanais de temperatura (°C)	> 38	26 a 38	< 26
Média das mínimas mensais de temperatura (°C)	> 0	-12 a 0	< -12
Viscosidade aparente (cP) 175°C ASTM D2994 haste 3, 12 rpm	1000 mín 4000 máx	1000 mín 4000 máx	1000 mín 4000 máx
Penetração (1/10 mm), 25°C AASHTO T49 100 g, 5 s	25 mín 75 máx	50 mín 100 máx	75 mín 150 máx
Penetração (1/10 mm), 4°C - AASHTO T49, 200g, 60s	15 mín	25 mín	40 mín
Ponto de amolecimento (°C) - ASTM D36	54 mín	49 mín	43 mín
Resiliência (%) 25°C - ASTM D3407	20 mín	10 mín	0 mín
Ductilidade (cm) 4°C - AASHTO T51 1 cm/min	5 mín	10 mín	20 mín
Ensaio com resíduo envelhecido em estufa de filme fino (AASHTO T179)			
Penetração 4°C (% original) - AASHTO T49 200g, 60s	75 mín	75 mín	75 mín
Ductilidade 4°C (% original) - AASHTO T51 1 cm/min	50 mín	50 mín	50 mín

TABELA 4.3 - Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997)

LIGANTE		TIPO I	TIPO II	TIPO III
MÉTODOS DE ENSAIO				
Viscosidade Aparente, 175°C: cP	mín	1500	1500	1500
Método Modificado ASTM D2196, Método A ^{A,B}	máx	5000	5000	5000
Penetração, 25°C, 100g, 5s: 1/10 mm (ASTM D5)	mín	25	25	50
	máx	75	75	100
Penetração, 4°C, 200g, 60s: 1/10 mm (ASTM D5)	mín	10	15	25
Ponto de Amolecimento: °C (ASTM D36)	mín	57,2	54,4	51,7
Resiliência, 25°C: % (ASTM D5329)	mín	25	20	10
Ponto de Fulgor: °C (ASTM D93)	mín	232,2	232,2	232,2
Ensaio com resíduo em estufa de filme fino (ASTM D1754) ^C				
Penetração, 4°C: % original (ASTM D5)	mín	75	75	75

^A Pode ser utilizado um Viscosímetro Brookfield com leitura digital.

Para modelos da série LV, usar spindle 3 a 12 rpm.

Para modelos das séries RV e HA, usar spindle 3 a 20 rpm.

^B Podem ser utilizados viscosímetros tipo Rion ou Haake (com Rotor No. 1) quando correlacionado com as medidas do Brookfield. De qualquer forma, o Brookfield será o "método" de referência.

^C O ensaio de Resíduo RTFO (ver Método de Ensaio D 2872) pode ser substituído pelo Ensaio de Resíduo TFOT.

No Estado de São Paulo, a média das temperaturas máximas nos últimos 5 anos é 33,1°C, enquanto que a média das temperaturas mínimas nesse período é 9,1°C. Nesse caso, se for considerado a média das mínimas de temperatura, o ligante asfalto-borracha deve atender o Tipo I da ASTM (ASTM, 1997) e o tipo ARB-1 proposto por BAKER RUBBER Inc. (1988). No entanto, se for considerado a média das máximas de temperatura, o ligante asfalto-borracha deve atender o Tipo II da ASTM e o tipo ARB-2 proposto por BAKER RUBBER Inc. (1988). Como no Brasil os principais defeitos ocorrem sob temperaturas elevadas ou temperaturas médias em serviço, considera-se o Tipo II da especificação ASTM e o ARB-2 da especificação proposta por BAKER RUBBER Inc. (1988).

A especificação Superpave de ligantes asfálticos (D4 - Proposal P248) define a classe (PG) em função da temperatura do pavimento (Tabela 2.4). Estabelece valores limites para os ligantes ensaiados antes do envelhecimento (ponto de fulgor maior que 230°C, viscosidade aparente máxima de 3000 cP e cisalhamento dinâmico maior que 1,0 kPa), para os ligantes asfálticos ensaiados após o envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (perda de massa máxima de 1,0% e cisalhamento dinâmico maior que 2,2 kPa) e para os resíduos envelhecidos em vaso de pressão (cisalhamento dinâmico menor que 5000 kPa, rigidez à fluência maior que 300 MPa e tração direta com deformação de ruptura mínima de 1,0%).

4.2 – MATERIAIS

Os materiais utilizados nas misturas são borracha de pneus descartados moída e cimento asfáltico de petróleo (CAP), podendo ser adicionado diluente para reduzir a viscosidade da mistura. Apresentam-se, a seguir, os principais fatores que condicionam o desempenho de ligantes asfalto-borracha.

4.2.1 – BORRACHA

a) Tipo de borracha

A borracha utilizada no ligante asfalto-borracha pode ser proveniente de pneus de automóveis ou caminhões, podendo ser utilizada uma mistura de borracha de pneus de automóveis e caminhões.

Os pneus de automóveis são compostos por uma quantidade maior de borracha sintética, enquanto os pneus de caminhões são compostos por uma quantidade maior de borracha natural. A borracha natural fornece as propriedades elásticas, enquanto a borracha sintética proporciona a estabilidade térmica (RUTH *et al.*, 1997).

A composição química da borracha depende do processo de produção e influencia a elasticidade do asfalto-borracha e a estabilidade do produto (ROBERTS e LYTTON, 1987). Segundo EPPS (1994), o tipo de borracha, função da porcentagem de borracha natural e sintética, pode influenciar a viscosidade a 60°C e a ductilidade do ligante asfalto-borracha.

Apesar de alguns trabalhos publicados mencionarem a necessidade de uma porcentagem mínima de borracha natural, da ordem de 30%, vários estudos foram desenvolvidos com uma quantidade inferior de borracha natural (Tabela 4.4).

Com base em pesquisas bibliográficas e em contato com a engenheira Leni Leite, do CENPES (Petrobrás), verificou-se a inexistência de produtores de borracha de pneus moída em escala comercial. Porém, há no Brasil uma empresa que produz borracha de pneus moída com excelentes características técnicas (LEITE, 1999) e que se dispôs a fornecer, gratuitamente, a quantidade de borracha de pneus moída necessária à pesquisa.

TABELA 4.4 – Composição dos pneus estudada por TAKALLOU *et al.* (1986)

COMPONENTES	%
Hidrocarbonetos (20% de borracha natural e 80% de borracha sintética)	45
Negro de fumo	30
Solúvel em acetona (plastificante)	15
Fibra (sílica?)	10

Durante a etapa inicial da pesquisa, foram feitos contatos com fornecedores dos Estados Unidos visando a aquisição de borracha de pneus moída com características adequadas à produção do ligante asfalto-borracha. A Empresa Rouse Rubber forneceu o orçamento de US\$ 500,00/ton (sem contar o transporte), exigindo a aquisição mínima de uma tonelada.

Dadas as características técnicas comprovadas (pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e por LEITE, 1999), optou-se por trabalhar exclusivamente com a borracha produzida no Brasil. Portanto, a borracha utilizada neste trabalho foi fornecida pela Relastomer Tecnologia e Participações S.A., que tem como característica básica recuperar borrachas vulcanizadas e semi-vulcanizadas utilizando baixas temperaturas (máximo de 80°C), o que permite executar este processamento na fase líquida (fazendo a separação da borracha e do aço por filtragem e magnetismo), usando um catalisador heterogêneo. Segundo o fabricante, o produto gerado (borracha em pó) apresenta uma alta homogeneidade, mantendo cerca de 75% das características físicas da composição original.

A borracha Relastomer é composta por moléculas polares, que no modelo molecular dos asfaltos (ASPHALT INSTITUTE, 1995) formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas e que são envolvidas pelas moléculas apolares, que contribuem para as propriedades viscosas. A caracterização

química da borracha Relastomer, realizada através de uma análise gravimétrica térmica (Tabela 4.5), confirma a inferência feita a partir da análise de polaridade molecular.

TABELA 4.5 - Propriedades químicas da borracha Relastomer (LEITE, 1999)

COMPONENTES	ANÁLISE GRAVIMÉTRICA TÉRMICA (%)
Plastificante	5,2
Elastômeros	58,8
Negro de fumo	28,8
Cargas inorgânicas	5,7

b) Tamanho das partículas de borracha

O tamanho das partículas de borracha pode variar com o seu processo de produção (tipo de equipamento, temperatura etc.). Existem dois processos para moer a borracha: trituração à temperatura ambiente (processo mecânico) e processo criogênico.

A trituração à temperatura ambiente consiste em uma série de trituradores, peneiras, correias transportadoras e tambores magnéticos para remoção do aço, se necessário, e é dividida em três tipos: *crackermill*, *granulator*, *micro-mill*. A diferença entre os métodos que utilizam o processo mecânico está no tamanho das partículas: *crackermill* produz partículas que variam de 4,8 até 0,42 mm (formado por partículas irregulares com maior área superficial); *granulator* produz partículas que variam de 2,0 até 9,5 mm (constituído de partículas de forma cúbica, uniformes e com pequena área superficial, denominado de borracha granulada); *micro-mill* produz partículas finas que variam de 0,42 a 0,075 mm.

O processo criogênico consiste na submersão da borracha de pneus em nitrogênio líquido (-90°C a -200°C), pois abaixo de -60°C a borracha é muito

frágil e pode ser facilmente triturada em um moinho de impacto (“moinho de martelo”) (RUTH *et al.*, 1997).

Segundo MORRIS e McDONALD (1976), partículas de borracha que passam na peneira #25 e ficam retidas na peneira #40, quando misturadas com o ligante asfáltico a uma temperatura de 190°C, durante 20 minutos, aumentam em aproximadamente duas vezes seu volume original. Na mistura, as partículas de borracha tornam-se mais macias e mais elásticas. Isso ocorre como resultado das reações químicas e físicas entre as resinas do asfalto e da borracha. O grau dessa reação pode ser modificado através da variação da composição do asfalto e também do tamanho e da quantidade de borracha moída. Uma vantagem do uso de borracha fina é que a mistura asfalto-borracha resultante é mais homogênea e apresenta melhores resultados em ensaios de viscosidade e outros ensaios de controle de qualidade (PAGE *et al.*, 1992).

Resultados obtidos por OLIVER (1981) ressaltam a importância da superfície específica da borracha moída nas propriedades elásticas do asfalto-borracha, mostrando que além da granulometria também tem muita importância a forma das partículas.

A borracha utilizada neste trabalho, fornecida pela empresa Relastomer, é composta de partículas que passam na peneira #40 e ficam retidas na peneira #200 (0,42 a 0,075 mm, Figura 4.2).

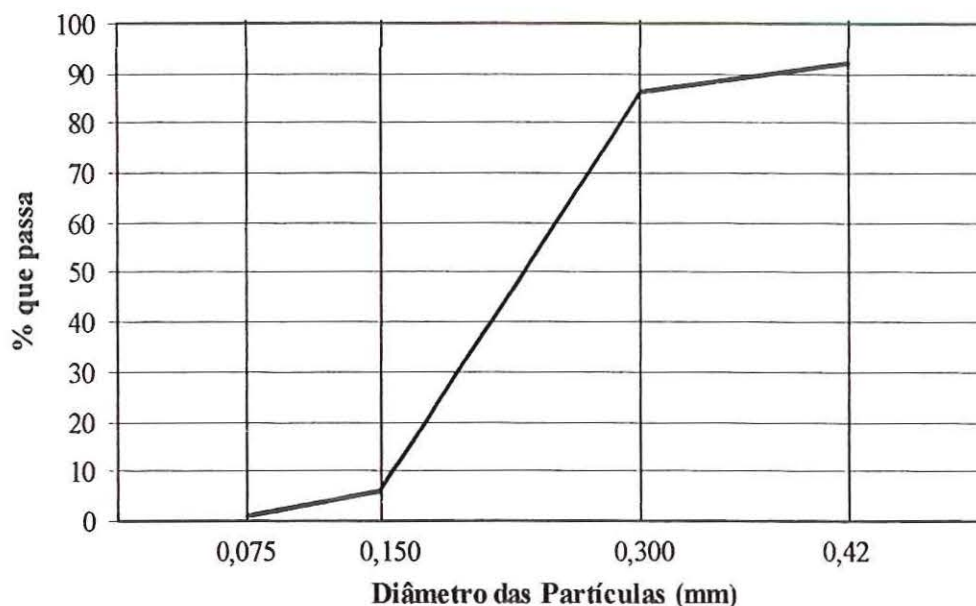


FIGURA 4.2 – Curva granulométrica da borracha fornecida pela Relastomer

c) Teor de borracha

O teor de borracha ótimo depende do tamanho das partículas e do tipo de aplicação em que será usado o ligante asfalto-borracha, podendo variar de 5 a 25%. O teor ótimo, em camadas de revestimento de CAUQ densas, é de cerca de 5% de borracha passada na peneira #50 (0,177 mm), enquanto que em camadas de revestimento com granulometria aberta o valor mais citado na literatura técnica é de 12% de borracha passada na peneira #40 (0,42 mm). Em aplicações de ligante asfalto-borracha entre o pavimento existente e a camada de reforço (SAMI), podem ser adotados teores mais elevados, de até 20% de borracha passada na peneira #10 (2,00 mm), a uma taxa de cerca de 2,7 l/m² (PAGE *et al.*, 1992). Em ligantes asfalto-borracha para selagem de trincas podem ser utilizados até 25% de borracha de pneus moída (McDONALD, 1976). HEIZTMAN (1992b) mostra como o teor de borracha influencia algumas das propriedades do ligante asfáltico de forma significativa (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Efeito do teor de borracha moída nas propriedades do ligante asfalto-borracha (HEIZTMAN, 1992b)

PROPRIEDADES DO LIGANTE	TEOR DE BORRACHA (%)						
	0	6	9	12	15	18	21
VISCOSIDADE A 175°C (cP)	60	550	800	900	1500	2500	6000
PENETRAÇÃO A 25°C (1/10 mm)	48	40	43	44	40	30	27
PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)	50	52	58	60	61	63	72

4.2.2 – LIGANTE ASFÁLTICO

Particularmente, no Estado de São Paulo, o CAP 20 é o mais utilizado. A especificação Superpave para ligantes seleciona o tipo de ligante em função do clima da região em que será utilizado o material. No Estado de São Paulo o ligante Superpave que deve ser utilizado, em função do clima, é um PG 64-10, mas dependendo do tráfego pode passar a requerer PG 70-10 ou PG 76-10. Neste trabalho será considerado apenas a influência do clima. Portanto, com o CAP selecionado serão produzidos ligantes asfalto-borracha que deverão atender aos requisitos da especificação Superpave para um PG 64-10.

4.2.3 - DILUENTE

Dependendo do tipo de ligante selecionado, do tamanho e do teor de borracha pode haver a necessidade da adição de um diluente para facilitar a mistura entre os componentes.

O diluente também reduz, temporariamente, a viscosidade do ligante asfalto-borracha, facilitando a aplicação. MORRIS e McDONALD (1976) observaram que após cerca de duas horas, a viscosidade do ligante volta a seu valor original, mas o asfalto-borracha obtido é menos susceptível à temperatura do que o ligante original.

O teor de ligante sofre redução em função do uso de diluente de 10 a 25%. TAKALLOU e SAINTON (1992), por outro lado, relatam que uma grande quantidade de diluente (maior que 6%) pode reduzir o ponto de amolecimento, aumentar a penetração, aumentar a ductilidade e reduzir a resistência.

4.3 - TEMPERATURA E TEMPO DE REAÇÃO

O aquecimento do ligante visa a obtenção da viscosidade adequada, de forma a facilitar a mistura e incorporação da borracha ao ligante asfáltico. O tempo de reação, por sua vez, é função do teor e granulometria da borracha, do tipo de cimento asfáltico e da temperatura de mistura. Entretanto, deve-se tomar cuidado com a temperatura da mistura, pois uma temperatura muito elevada irá reduzir a qualidade do ligante asfalto-borracha em razão da perda de voláteis e envelhecimento acelerado (PAGE *et al.*, 1992). Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, que ilustram os resultados obtidos por RUTH *et al.* (1997), pode-se verificar que o tempo de reação exerce menor influência que a temperatura de mistura na viscosidade do ligante asfalto-borracha.

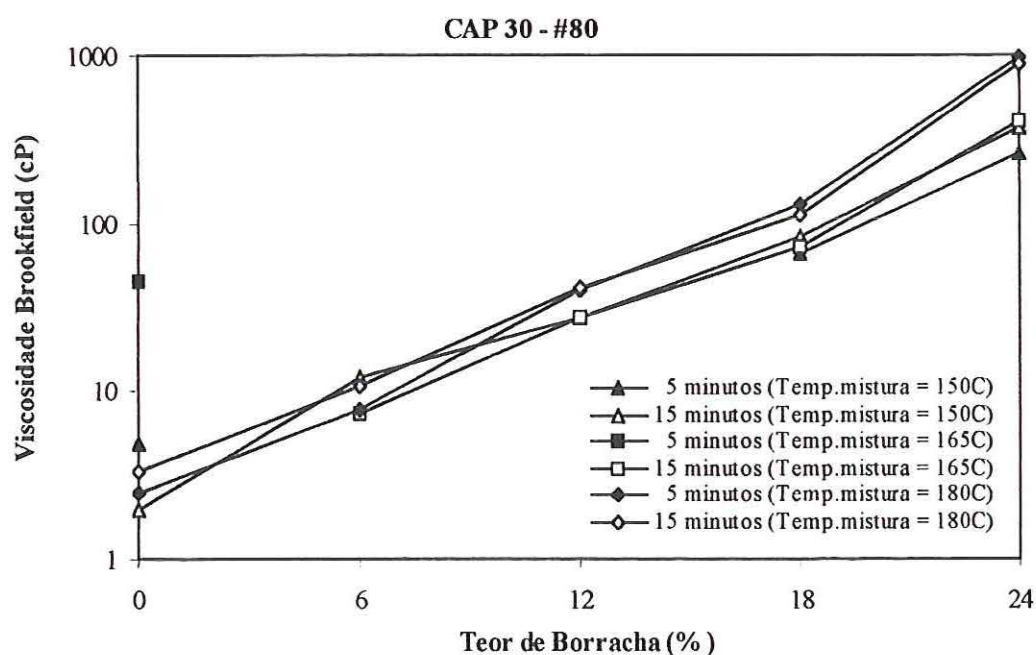


FIGURA 4.3 – Efeito do tempo de mistura na viscosidade do ligante asfalto-borracha

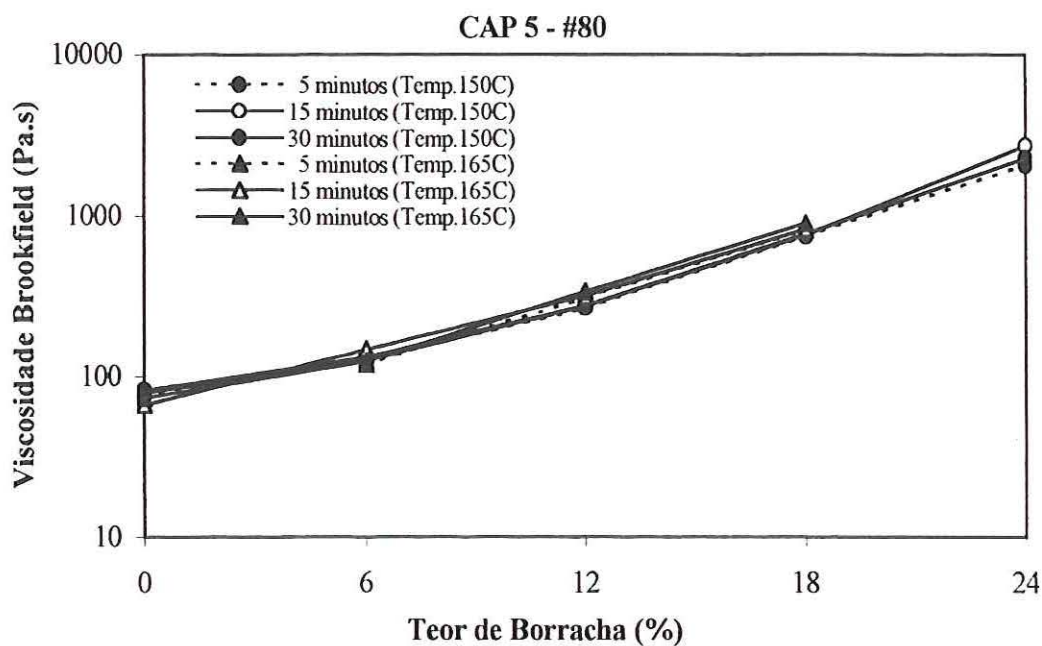


FIGURA 4.4 – Efeito do tempo de reação na viscosidade do ligante asfalto-borracha (RUTH *et al.*, 1997)

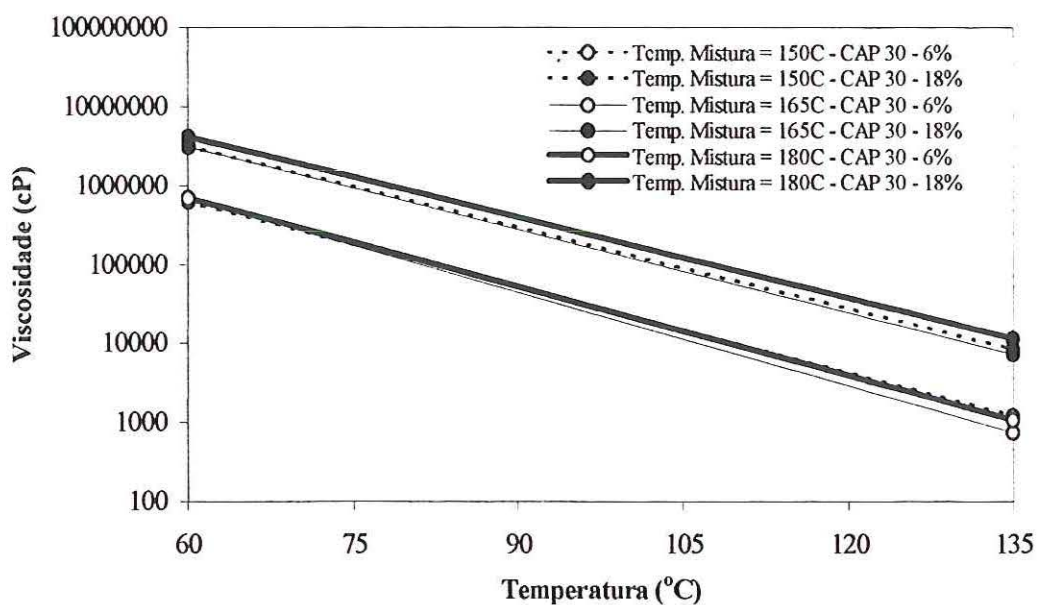


FIGURA 4.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha: efeito preponderante do teor de borracha em relação à temperatura da mistura (RUTH *et al.*, 1997)

4.4 – EQUIPAMENTO

O tipo de equipamento utilizado no preparo do ligante asfalto-borracha pode influenciar a sua homogeneidade. O equipamento deve conter um recipiente com controle de temperatura e um agitador mecânico. Os agitadores mais utilizados (RUTH et al., 1997) atingem rotação de até 4500 rpm e têm hélice cisalhante (Figura 4.6). O equipamento utilizado para preparação de amostras no Laboratório de Asfalto do CENPES (Petrobrás, RJ) é ilustrado na Figura 4.7. O agitador é de alto cisalhamento, sendo que na preparação de misturas asfalto-borracha atinge rotação de até 4000 rpm.

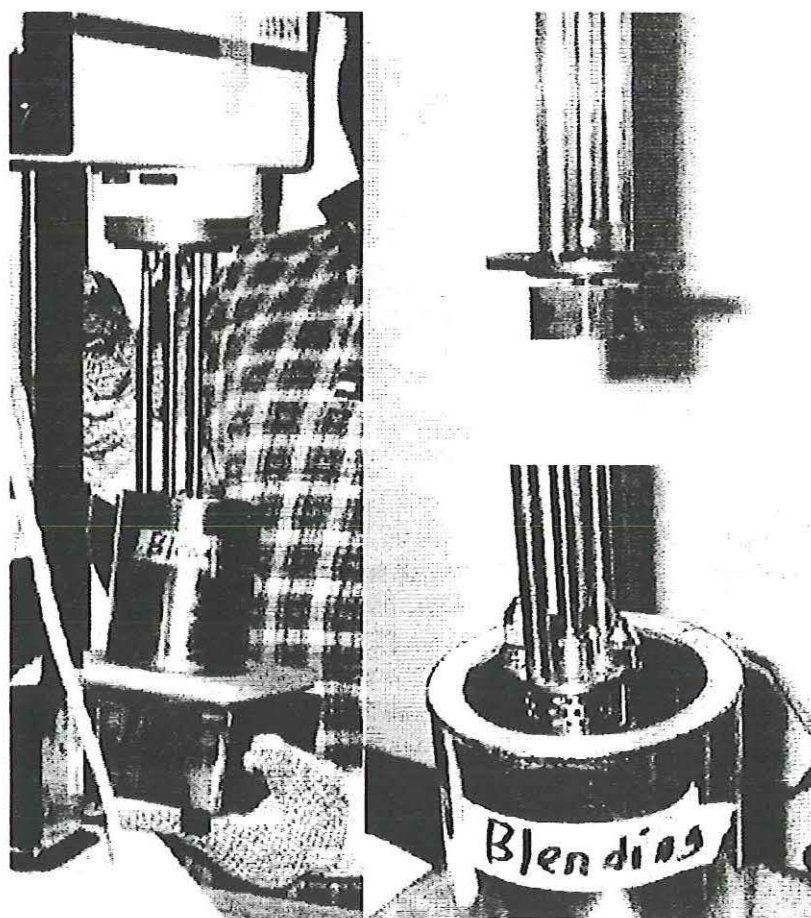


FIGURA 4.6 – Equipamento utilizado na preparação de ligante asfalto-borracha

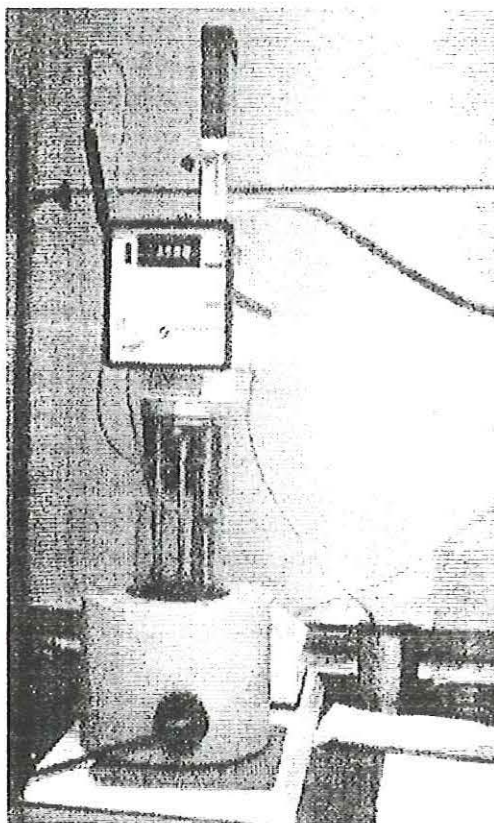


FIGURA 4.7 – Equipamento utilizado na preparação de misturas asfalto-borracha no Laboratório de Asfalto do Cenpes

4.5 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ASFALTO-BORRACHA

As amostras utilizadas para avaliação das propriedades do asfalto-borracha foram produzidas no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Descreve-se, a seguir, os procedimentos adotados e, principalmente, as adaptações que tiveram que ser realizadas para execução desse serviço não convencional.

Como o Laboratório não possuía um equipamento adequado para a produção do ligante asfalto-borracha, foi necessário comprar um recipiente com

aquecedor e controle de temperatura e um misturador. O recipiente para colocar a mistura foi encontrado em um catálogo de artigos importados e consiste de uma panela elétrica de cerâmica com controle de temperatura até 200°C.

O melhor misturador encontrado, produzido no Brasil e com preço acessível, consiste de um agitador mecânico indicado para produtos viscosos, marca FISATOM (modelo 722), com potência de 255 W, 230 V, 60 Hz, com controle de rotação variando de 530 a 2000 rpm, haste de 600 mm de comprimento e hélice tipo naval com 80 mm de diâmetro. A Figura 4.8 ilustra o conjunto (panela + agitador) utilizado na preparação dos ligantes asfalto-borracha.

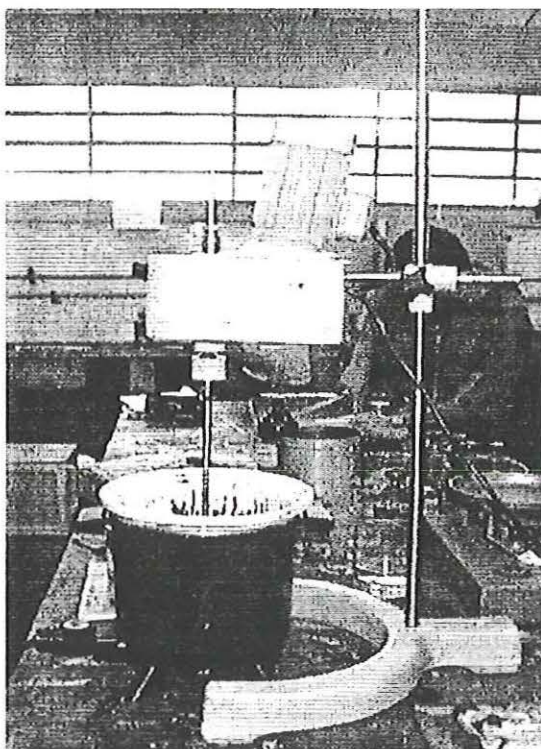


FIGURA 4.8 - Agitador mecânico e panela elétrica utilizados na preparação dos ligantes asfalto-borracha no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP

Antes de preparar as amostras de asfalto-borracha foi preciso peneirar a borracha, separando de acordo com os intervalos granulométricos selecionados (#40 a #50 e #50 a #100, ou seja, de 0,42 a 0,30 mm e de 0,30 a 0,15 mm). Para cada amostra foram usados 2000 g de CAP 20, que permaneceram em estufa, a uma temperatura de 150°C, durante cerca de 12 horas. A borracha moída na quantidade a ser incorporada também foi mantida em estufa, a uma temperatura máxima de 50°C, durante uma hora antes do início da mistura.

O CAP 20, a 150°C, era colocado em um recipiente de cerâmica, que era encaixado dentro da panela elétrica. Apesar do termostato indicar 200°C, verificou-se que a temperatura máxima atingida pela panela era de 185°C e que a máxima temperatura alcançada pelo CAP dentro da panela era de 170°C. Controlava-se a temperatura a cada 30 minutos, sendo que levava cerca de 6 horas, em média, para o CAP atingir a temperatura de 170°C.

Após o CAP atingir a temperatura máxima, adicionava-se a borracha aquecida e iniciava-se o processo de mistura. Inicialmente, o misturador era mantido a uma velocidade baixa (500 rpm) por 2 minutos, até que não mais ocorressem respingos da mistura. Em seguida, aumentava-se a velocidade até atingir a máxima rotação (cerca de 2000 rpm), mantendo-se esse valor até o final da mistura (30 minutos).

Pequenas alterações foram feitas ao longo do preparo das misturas de asfalto-borracha. Para diminuir o tempo gasto para o CAP atingir a temperatura desejada, optou-se por colocar o CAP direto no recipiente de cerâmica e aquecê-lo, em estufa, até a temperatura de mistura com a borracha. Após cerca de 2 horas, o recipiente de cerâmica era colocado dentro da panela e mantido à temperatura de mistura, pronto para receber a borracha aquecida (50°C). Após o preparo do ligante asfalto-borracha, o material era transferido imediatamente para o recipiente de armazenamento (Figura 4.9).

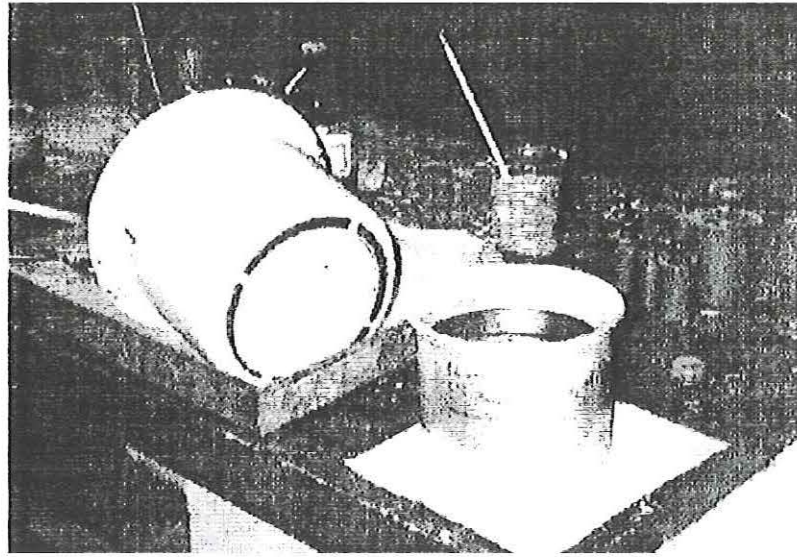


FIGURA 4.9 – Recipiente utilizado para armazenar o ligante asfalto-borracha

5 - PROGRAMAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

5.1 - INTRODUÇÃO

Para avaliação do ligante asfalto-borracha desenvolve-se uma programação de ensaios de laboratório, com o objetivo de determinar as principais propriedades de engenharia e quantificar os efeitos dos principais fatores intervenientes sobre o desempenho do asfalto-borracha.

Na etapa de planejamento optou-se por um experimento fatorial, em virtude da possibilidade de se avaliar não só os efeitos dos fatores, mas também suas interações.

Para avaliar as propriedades de engenharia do ligante asfalto-borracha foram considerados ensaios tradicionais e também ensaios desenvolvidos ou adaptados durante o Programa SHRP (método Superpave), que constituem as variáveis dependentes do experimento. Quando da escolha das variáveis independentes, ou seja, dos fatores e níveis julgados mais importantes com base na revisão bibliográfica, teve-se que considerar outros aspectos além dos técnicos, mas não menos significativos. Do fatorial previsto inicialmente alguns fatores e níveis tiveram que ser excluídos, em virtude das dificuldades enfrentadas no preparo das amostras, com quebra de equipamentos e, principalmente, pela dependência de um único laboratório brasileiro

(CENPES, Petrobrás, RJ) para a realização de alguns dos ensaios da Especificação Superpave.

Dada a dificuldade das pessoas diretamente envolvidas (no caso, orientada e orientador) para reduzir o fatorial inicialmente proposto, de grande ajuda foram as sugestões e críticas dos professores que participaram de algumas etapas acadêmicas (defesa do projeto de tese e exame de qualificação), pois eles anteciparam as dificuldades que surgiriam, como de fato surgiram, e ajudaram a trazer a programação do experimento mais próxima do exequível.

5.2 - PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O objetivo de um experimento é explorar as relações entre os fatores que afetam um processo ou confirmar alguma hipótese. O planejamento de experimentos auxilia, principalmente, na organização dos ensaios, podendo-se empregar técnicas diferentes de acordo com o tipo de análise esperada. Em outras palavras, o planejamento ou projeto de um experimento serve para assegurar que os dados coletados sejam relevantes e para fornecer o máximo de informações possíveis, com um número de ensaios suficiente e não superior ao necessário.

Dentre as técnicas disponíveis destacam-se os experimentos fatoriais, que são empregados para se estudar também os efeitos simultâneos (interações) de dois ou mais fatores. Em um experimento fatorial são investigadas todas as combinações possíveis entre os fatores e seus respectivos níveis. O efeito de um fator é definido como a mudança na resposta (variável dependente) produzida pela mudança no nível do fator, sendo também denominado de efeito principal porque se refere aos fatores primários do estudo. Mas podem ocorrer situações em que as interações entre os fatores são mais significativas que alguns dos fatores primários.

Segundo MONTGOMERY (1991), o planejamento de experimentos deve conter as seguintes etapas:

- a) **Reconhecimento e Definição do Problema:** identifica-se a existência de um problema que pode ser estudado (ou resolvido) através da experimentação. É a etapa de organização das idéias, em que se explicita o que se conhece e o que se pretende conhecer com o experimento;
- b) **Escolha dos Fatores e Níveis:** definem-se os fatores (variáveis independentes) a serem analisados no experimento, a faixa dentro da qual cada fator irá variar e os níveis desses fatores com que os ensaios serão realizados. No planejamento de experimento, os fatores e níveis a serem considerados precisam ser definidos *a priori*;
- c) **Definição da Técnica de Análise:** escolhe-se a técnica experimental, seleciona-se a variável de resposta (variável dependente) e define-se o número de repetições (réplicas) e a ordem dos testes (geralmente aleatórios), de forma que com o menor número de amostras e, conseqüentemente, de ensaios, seja possível obter o máximo de informações sobre os fatores individuais e também sobre as interações entre eles;
- d) **Condução do Experimento:** deve-se monitorar cuidadosamente o processo, para evitar erros que possam invalidar os resultados do experimento;
- e) **Análise dos Resultados:** são empregados métodos estatísticos que servem para adicionar objetividade ao processo de tomada de decisão;

- f) **Conclusões e Recomendações:** após a realização da análise estatística, elabora-se um relatório com as principais conclusões, que devem ser válidas e objetivas.

5.3 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES - FATORES E NÍVEIS

O termo fator (também denominado de “tratamento”) é utilizado para designar uma variável independente. Os diferentes “tratamentos” das variáveis independentes são chamados de níveis do fator. Considera-se um experimento fatorial quando existem duas ou mais variáveis independentes (MONTGOMERY, 1991).

5.3.1 - TIPO DE BORRACHA

A borracha utilizada neste trabalho foi fornecida pela Relastomer Tecnologia e Participações S.A., sendo uma mistura de borracha de pneus de automóveis e caminhões.

5.3.2 - TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA

A borracha Relastomer é composta de partículas que passam na peneira #40 e ficam retidas na peneira #200 (0,42 a 0,075 mm, Tabela 5.1). As frações foram obtidas por peneiramento do material recebido da Relastomer e tem como peneiras de controle as peneiras #40 (0,42 mm), #50 (0,30 mm) e #100 (0,15 mm) (ABNT, Anexo G).

TABELA 5.1 – Granulometria da borracha Relastomer

PENEIRA (D, mm)	% QUE PASSA
#40 (0,42)	92
#50 (0,30)	86
#100 (0,15)	6
#200 (0,075)	1

Para este fator qualitativo foram escolhidos dois níveis: uma fração grossa (passa na peneira #40 e fica retido na #50) e uma fração fina (passa na peneira #50 e fica retido na #100).

5.3.3 - TEOR DE BORRACHA

O teor de borracha ótimo depende do tamanho das partículas e do tipo de aplicação em que será usado o ligante asfalto-borracha. Neste trabalho, são considerados os teores de 6, 12, 18 e 24% de borracha.

5.3.4 - TIPO E TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO

De acordo com a especificação Superpave para materiais asfálticos, que seleciona o ligante em função do clima da região em que será utilizado o material, o Estado de São Paulo necessitaria, em condições normais, de um ligante PG 64-10, sem considerações adicionais sobre o tráfego e velocidade. Apesar de no Brasil ainda não haver a produção de ligantes de acordo com a Especificação Superpave, quando dos ensaios do ligante asfalto-borracha os resultados serão comparados como valores exigidos para um PG 64-10.

5.3.5 - TEMPERATURA E TEMPO DE REAÇÃO

Para auxiliar a escolha dos níveis dos fatores temperatura e tempo de reação foi feita análise estatística das temperaturas de misturas e dos tempos de reação apresentados na Tabela 4.1. Foram considerados, no entanto, apenas os valores de temperatura e de tempo de reação correspondentes àqueles utilizados com borracha de granulometria compatível com os tamanhos das partículas de borracha ensaiados neste trabalho (de #40 a #200, ou seja, de 0,42 a 0,075 mm). As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam histogramas dos fatores temperatura de mistura e tempo de reação com base nos valores apresentados na Tabela 4.1

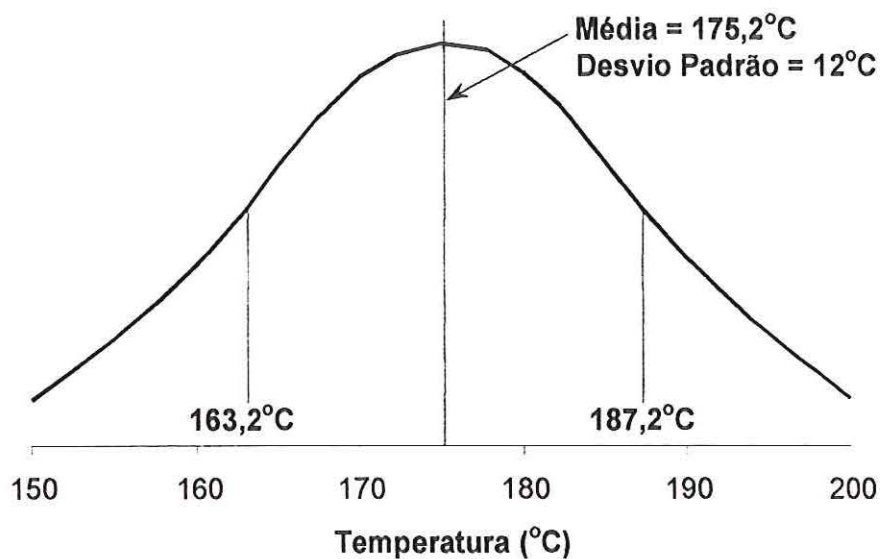


FIGURA 5.1 – Histograma dos valores de temperatura de mistura (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1)

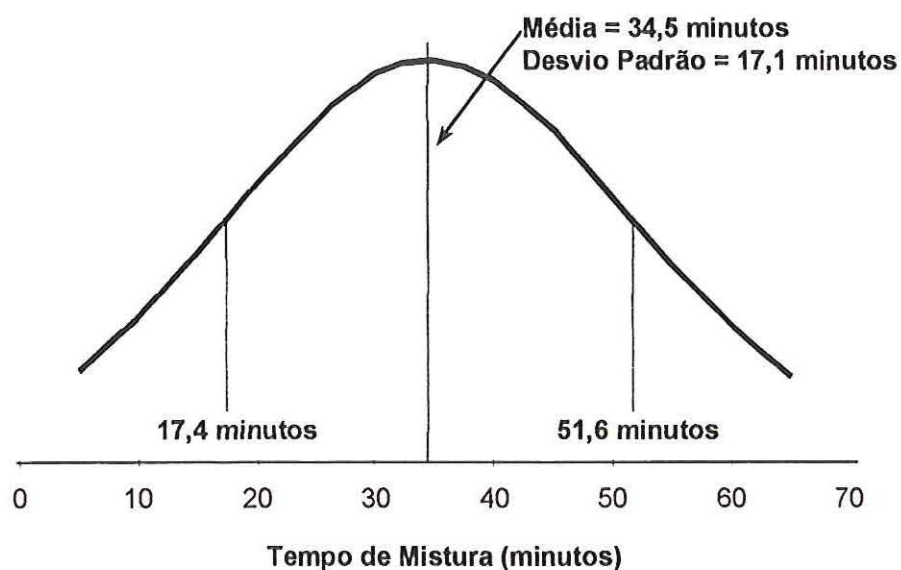


FIGURA 5.2 – Histograma dos valores de tempo de reação (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1)

O valor médio de temperatura de mistura é igual a 175°C, com desvio padrão igual a 14°C. O valor médio do tempo de reação é igual 35 minutos, com desvio padrão igual a 17 minutos. Optou-se portanto, por seleccionar os

seguintes níveis: 165, 175 e 185°C para a temperatura de mistura e 20, 35 e 50 minutos para o tempo de reação.

5.3.6 - DILUENTE

Sendo o objetivo principal deste trabalho a avaliação, em laboratório, do desempenho do ligante asfalto-borracha e sendo os efeitos principais do diluente as alterações de propriedades relacionadas apenas às etapas de produção e compactação de mistura asfáltica (ligante + agregados), optou-se por não incluir o diluente entre os fatores analisados neste trabalho.

5.4 – PROGRAMAÇÃO FATORIAL DO EXPERIMENTO

Conforme apresentado na Tabela 4.1, os principais fatores que condicionam o desempenho do ligante asfalto-borracha são a temperatura de mistura, o tempo de reação, a granulometria da borracha, o tipo de ligante e o teor de borracha.

5.4.1 – MATRIZ FATORIAL INICIAL

Foram escolhidos os fatores apresentados na Tabela 4.1 para compor a matriz fatorial inicialmente elaborada. Procurou-se trabalhar com pelo menos 3 níveis no caso de fatores quantitativos, para avaliação da existência de comportamento não linear, cobrindo o valor médio e os intervalos mais ou menos um desvio padrão. Dessa forma, foram selecionados os seguintes fatores e níveis:

- **Fator A:** teor de borracha
 - nível $a_1 = 6\%$
 - nível $a_2 = 12\%$
 - nível $a_3 = 18\%$
 - nível $a_4 = 24\%$

- **Fator B:** tamanho das partículas de borracha
 - nível $b_1 = \#100$ (partículas que passam na $\#100$ e ficam retidas na $\#200$, ou seja, partículas com diâmetro entre 0,15 e 0,075 mm)
 - nível $b_2 = \#50$ (partículas que passam na $\#50$ e ficam retidas na $\#100$, ou seja, partículas com diâmetro entre 0,30 e 0,15 mm)
 - nível $b_3 = \#40$ (partículas que passam na $\#40$ e ficam retidas na $\#50$, ou seja, partículas com diâmetro entre 0,42 e 0,30 mm)

- **Fator C:** temperatura de mistura
 - nível $c_1 = 165^\circ\text{C}$
 - nível $c_2 = 175^\circ\text{C}$
 - nível $c_3 = 185^\circ\text{C}$

- **Fator D:** tempo de reação
 - nível $d_1 = 20$ minutos
 - nível $d_2 = 35$ minutos
 - nível $d_3 = 50$ minutos

- **Fator E:** tipo de ligante
 - nível $e_1 = \text{CAP } 20$
 - nível $e_2 = \text{CAP } 40$

Com essa programação fatorial, o número total de combinações é igual a:

$$N = 4 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2 = 216 \quad (5.1)$$

Considerando-se a amostra de controle (sem borracha de pneus moída), as réplicas (indispensáveis para uma adequada análise estatística) e, principalmente, o elevado número de ensaios (variáveis dependentes), em

número de onze, necessários para caracterizar o desempenho do ligante asfalto-borracha, verificou-se que a programação fatorial inicialmente elaborada previa um número de ensaios além do que os recursos, os equipamentos e o tempo disponível permitiam realizar.

Em duas etapas acadêmicas, quando da defesa do projeto de tese e do exame de qualificação, os membros da banca avaliadora sugeriram uma redução no fatorial (no número de níveis e, eventualmente, no número de fatores), devido às dificuldades de elaboração das amostras e de realização de todos os ensaios, que atingiriam um total de 7.128 ensaios (considerando-se três réplicas e onze ensaios de controle). Não é demais lembrar as dificuldades para preparação das amostras, por não haver, de início, um equipamento apropriado no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP para manter a temperatura de mistura. Quanto à realização dos ensaios, o maior obstáculo foi a necessidade de deslocamento e estadia no Rio de Janeiro, pois o único laboratório composto com os equipamentos para realizar os ensaios Superpave no Brasil é o da Petrobrás, CENPES (Centro de Pesquisa Leopoldo A. Miguez de Mello).

Com o fator A (teor de borracha), sem dúvida o de maior interesse, optou-se por três níveis (6, 12 e 18%), que ainda permitem a análise de comportamento não-linear, ficando os teores de 0 e 24% para serem usados como valores de verificação das equações de regressão obtidas. Em outras palavras, os teores de 0 e 24% não entram no fatorial principal, que é a base da análise estatística, mas servem para avaliar os modelos estatísticos sem o risco de ocorrer “argumento circular”.

O fator B (tamanho das partículas) foi reduzido de três para dois níveis, excluindo-se a fração mais fina (passada na #100 e retida na #200) em virtude das características granulométricas da borracha Relastomer (menos que 6%

passando na #100). Os níveis remanescentes são, portanto, as partículas que passam na #50 e ficam retidas na #100 (ou seja, partículas de 0,30 a 0,15 mm) e partículas que passam na #40 e ficam retidas na #50 (ou seja, partículas de 0,42 a 0,30 mm).

Para o fator C (temperatura de mistura) houve a redução de um nível por razões técnicas, pois a panela elétrica adquirida, que tinha uma temperatura máxima nominal de 200°C, não conseguia manter a temperatura, durante a mistura, acima de 170°C. Dessa forma, optou-se pelas temperaturas de 160°C e 170°C.

O fator D (tempo de reação) foi excluído, tomando-se como base os trabalhos desenvolvidos na Universidade da Flórida por RUTH *et al.* (1997) e OTOO (1999). Considerando-se as granulometrias da borracha, optou-se por trabalhar apenas com o tempo de reação de 30 minutos.

O fator E (tipo de ligante) também foi excluído, por ser o CAP 20 de uso quase exclusivo no Estado de São Paulo.

5.4.2 – MATRIZ FATORIAL DEFINITIVA

Houve, portanto, necessidade de redução do número total de ensaios. Resumindo, neste trabalho são considerados os seguintes fatores e seus respectivos níveis (Tabelas 5.2 e 5.3)

- **Fator A:** teor de borracha
 - nível $a_1 = 6\%$
 - nível $a_2 = 12\%$
 - nível $a_3 = 18\%$

- **Fator B:** tamanho das partículas de borracha
 - nível $b_1 = \#50$ (partículas que passam na #50 e ficam retidas na #100)
 - nível $b_2 = \#40$ (partículas que passam na #40 e ficam retidas na #50)
- **Fator C:** temperatura de mistura
 - nível $c_1 = 160^\circ\text{C}$
 - nível $c_2 = 170^\circ\text{C}$

TABELA 5.2 - Matriz fatorial que representa a programação dos ensaios

Fator A (Teor de borracha)	Fator B (Tamanho das partículas de borracha)											
	b ₁						b ₂					
	Fator C (Temperatura de mistura)						Fator C (Temperatura de mistura)					
	c ₁			c ₂			c ₁			c ₂		
réplicas	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
a ₁												
a ₂												
a ₃												
a ₄												

TABELA 5.3 – Numeração das amostras que representam a combinação de todos os fatores e níveis (seqüência aleatória)

FATORES	TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA (mm)		--	#50 - #100				#40 - #50				
	TEOR DE BORRACHA (%)		0	6	12	18	24	6	12	18	24	
	TEOR DE LIGANTE (%)		100	94	88	82	76	94	88	82	76	
TEMPERATURA (°C)	170	TEMPO DE MISTURA (minutos)	30	17	13	9	2	10	16	12	4	11
	160				14	1	8	5	15	3	7	6

O número total de ensaios depende do número de réplicas, que foi definido da seguinte forma: para os ensaios tradicionais foram preparadas três réplicas, enquanto para os ensaios Superpave (maior reprodutibilidade) foram preparadas duas réplicas. Resulta, dessa forma, um número de ensaios igual a 408, assim distribuídos:

- Penetração: $17 \times 3 = 51$
- Ponto de amolecimento: $17 \times 3 = 51$
- Ponto de Fulgor: $17 \times 3 = 51$
- Viscosidade Brookfield: $17 \times 2 \times 3 = 102$
- RTFOT: 17
- PAV: 17
- DSR: $17 \times 3 \times 2 = 102$
- BBR: 17

5.5 – VARIÁVEIS DEPENDENTES

As variáveis dependentes são representadas pelos ensaios utilizados para caracterização e avaliação do ligante asfalto-borracha. Os ensaios são divididos em dois grupos: tradicionais (viscosidade Saybolt-Furol; ponto de fulgor; penetração; ponto de amolecimento e ductilidade) e Superpave (viscosidade aparente; cisalhamento dinâmico antes e após envelhecimento de curto prazo e rigidez à fluência na flexão após envelhecimento de curto e longo prazo, antes e após envelhecimento de curto prazo, RTFOT e envelhecimento de longo prazo, PAV).

5.5.1 - ENSAIOS TRADICIONAIS

Para controle de qualidade dos diferentes tipos de asfaltos, foram desenvolvidos, desde o início do século XX, vários ensaios que hoje são tradicionais para a avaliação laboratorial e certificação de ligante asfálticos.

Apesar de tradicionais, não fornecem propriedades fundamentais de engenharia, permitindo apenas a inferência das propriedades reológicas. Em virtude da enorme importância que tiveram e ainda continuam tendo em muitos lugares, foram considerados neste trabalho os seguintes ensaios:

a) Penetração

A penetração dos ligantes asfálticos pode ser determinada segundo o método descrito na ABNT/NBR 6576 (ABNT, 1998). Esse método serve para avaliar a consistência dos materiais betuminosos através da “penetração”, distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra do material betuminoso sob condições específicas de temperatura (25°C), carga (100 gramas) e tempo (5 segundos). A Figura 5.3 ilustra o equipamento utilizado na determinação da penetração de ligantes asfálticos.

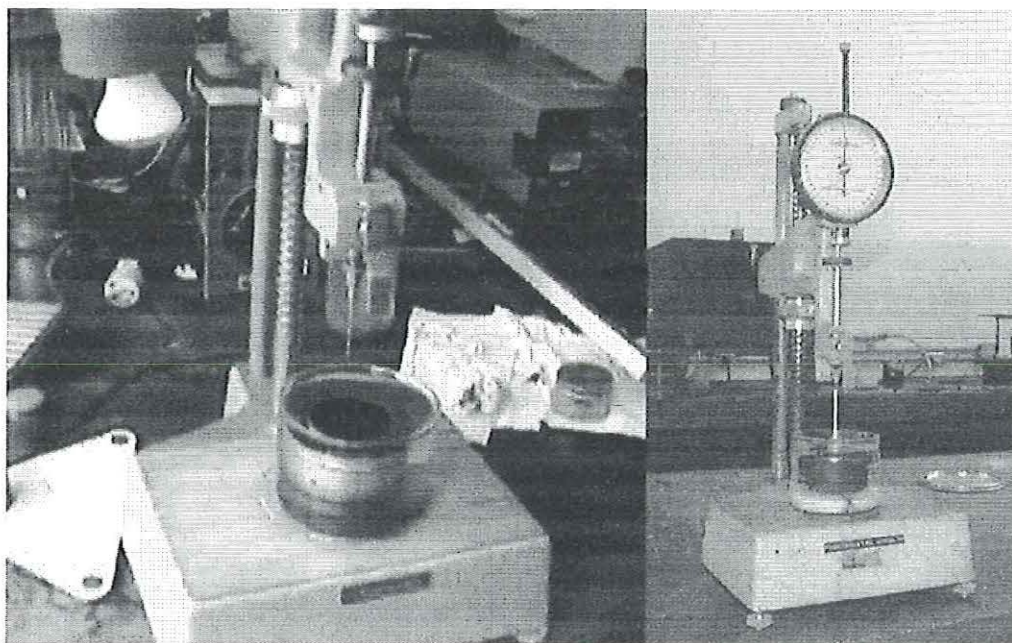


FIGURA 5.3 - Equipamento utilizado na determinação da penetração de ligantes asfálticos

b) Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos pode ser determinado segundo o método descrito na ABNT/MB-164/NBR 6560 (ABNT, 1972), conhecido como Método do Anel e Bola. Esse método descreve o procedimento para a determinação do ponto de amolecimento de cimentos asfálticos na faixa de 30 a 175°C. O ponto de amolecimento de um material é considerado como o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. No ensaio anel e bola, é a temperatura lida no momento em que a esfera metálica padronizada atravessa o anel (também padronizado) cheio com o material betuminoso, toca uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm sob condições especificadas. A Figura 5.4 ilustra o equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos - Método Anel e Bola.

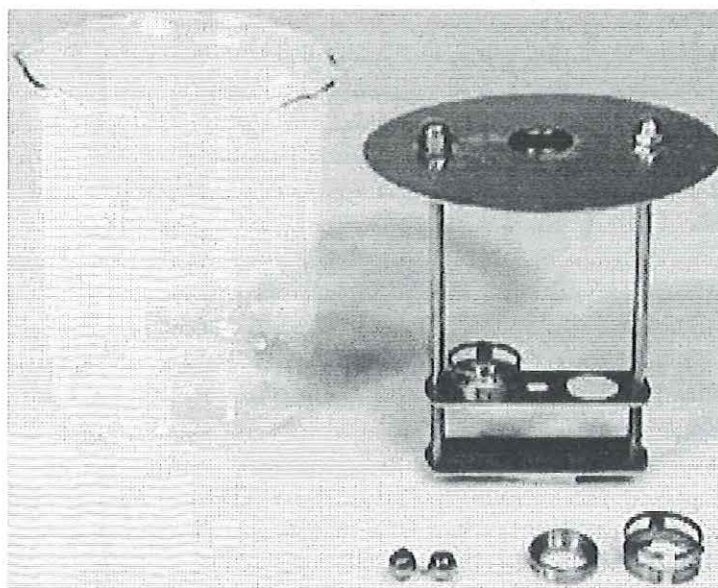


FIGURA 5.4 - Equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos - Método Anel e Bola

c) Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor de um ligante asfáltico é a temperatura na qual existe uma liberação de vapores suficiente para, em mistura com ar e na presença de uma chama, provocar uma centelha. Portanto, indica a temperatura acima da qual o asfalto deve ser manuseado como produto inflamável, desde que haja uma fonte de ignição (faísca, chama, raios, tempestade magnética). É um ensaio muito prático que permite, também, verificar contaminações do asfalto por solventes, cujos pontos de fulgor são mais baixos. O ponto de fulgor dos ligantes asfálticos pode ser determinado segundo o método descrito na ABNT/NBR11341 (ABNT, 1990). A Figura 5.5 ilustra o equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor de ligantes asfálticos.

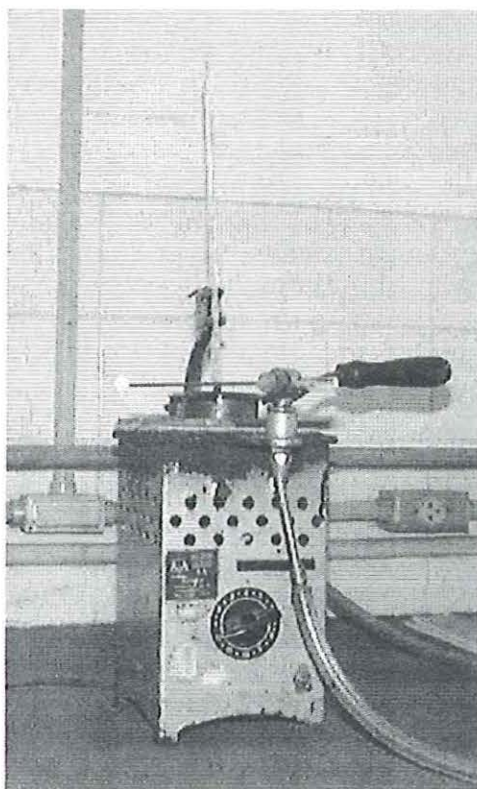


FIGURA 5.5 - Equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor de ligantes asfálticos

d) Viscosidade Saybolt-Furol

A Viscosidade Saybolt de ligantes asfálticos pode ser determinada segundo o método descrito na ABNT/IBP/P-MB-517 (ABNT, 1971b). Este método fixa o processo de determinação da viscosidade Saybolt de materiais betuminosos. Viscosidade Saybolt (expressa em segundos) é o tempo necessário para o escoamento de 60 ml de material, no viscosímetro de Saybolt, sob determinadas condições de temperatura. Geralmente, essa temperatura varia com o tipo de asfalto, sendo que para os cimentos asfálticos são utilizadas temperaturas de 135 e 177°C. A Figura 5.6 ilustra o equipamento utilizado na determinação da viscosidade Saybolt-Furol de materiais asfálticos.

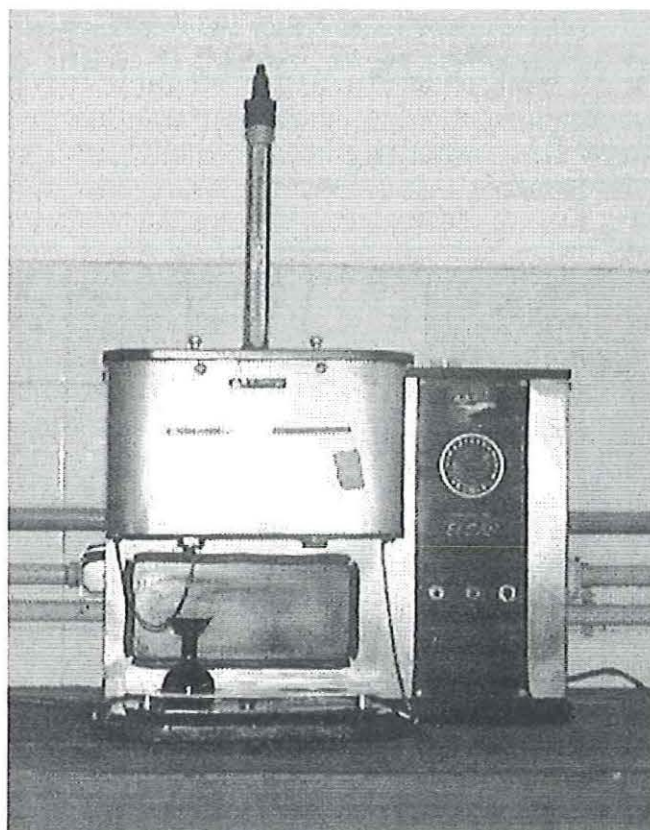


FIGURA 5.6 - Equipamento utilizado na determinação da viscosidade Saybolt-Furol

e) Ductilidade

Define-se ductilidade como a capacidade de um asfalto sofrer deformações de sua massa sem se romper. O ensaio mede a distância em que um corpo de prova padrão de asfalto é alongado até seu rompimento. Asfaltos empregados na construção rodoviária devem apresentar ductilidade elevada, maiores que 1,0 m. Para determinar a ductilidade de ligantes asfálticos pode ser utilizado o método descrito na ABNT/MB67/NBR6293 (ABNT, 1971a). A Figura 5.7 ilustra o equipamento utilizado na determinação da ductilidade de materiais asfálticos.

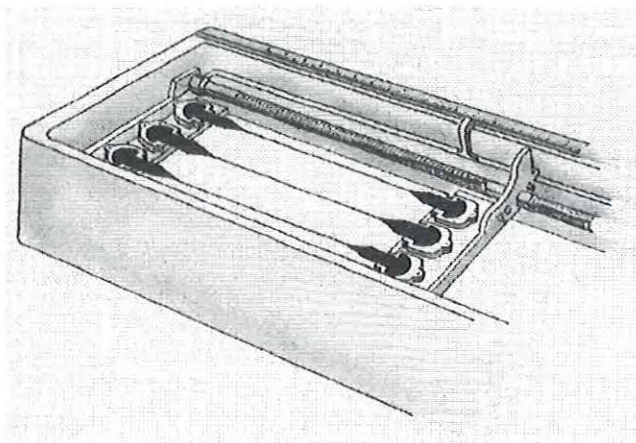


FIGURA 5.7 - Equipamento Utilizado na Determinação da Ductilidade (Fonte: ROBERTS *et al.*, 1998)

5.5.2 - ENSAIOS SUPERPAVE

A especificação Superpave classifica as misturas asfálticas com base no critério de desempenho e este leva em consideração as variações de temperatura e umidade, assim como o volume e a carga de tráfego. Além disso, para identificar as propriedades dos materiais relacionadas a vários defeitos, a especificação Superpave apresenta uma série de ensaios laboratoriais. A especificação é baseada em propriedades fundamentais da engenharia, incluindo o comportamento tensão-deformação dos materiais selecionados (Figura 5.8).

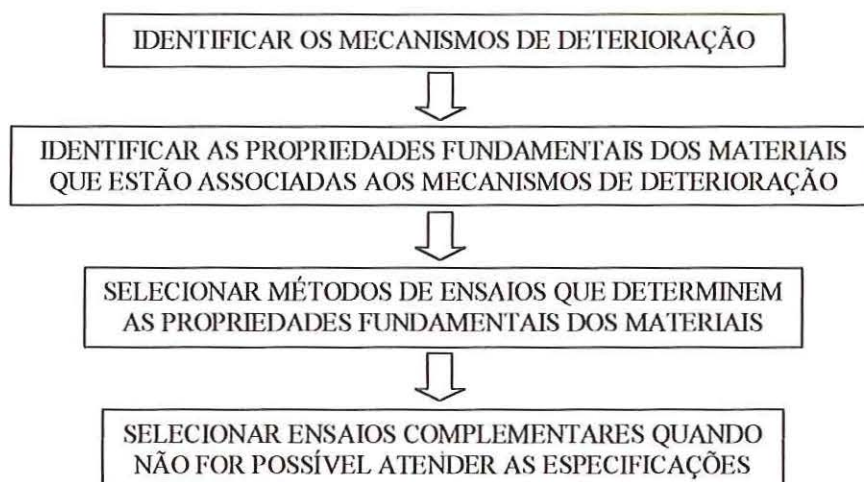


FIGURA 5.8 - Fluxograma da estratégia utilizada no desenvolvimento da especificação de ligante asfáltico Superpave (adaptada de ANDERSON *et al.*, 1991)

Os ensaios adotados pelo Programa SHRP permitem a simulação do comportamento dos ligantes através da realização de ensaios a temperaturas similares à dos pavimentos em serviço. Esses ensaios simulam três estágios críticos da vida do ligante. O primeiro estágio simula o comportamento dos asfaltos virgens durante o transporte, armazenagem e manuseio. O segundo estágio representa o asfalto durante a produção e aplicação da mistura e é simulado pelo envelhecimento em ensaio de rotação de filme fino em estufa (RTFOT). O terceiro estágio é simulado pelo envelhecimento em vaso de pressão (PAV), onde amostras de ligante são expostas ao calor e à pressão para simular o envelhecimento durante a vida em serviço de um pavimento.

Um dos objetivos do Programa SHRP foi desenvolver especificações de ligantes asfálticos com base no desempenho. Este objetivo foi baseado na premissa de que os métodos e especificações existentes e atualmente em uso não garantem um bom desempenho a longo prazo e que muito desses ensaios precisam ser revistos, substituídos ou eliminados.

Estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos, com uma dotação de 150 milhões de dólares, o Programa SHRP procurou desenvolver métodos de análise de materiais betuminosos e de misturas asfálticas com base em propriedades fundamentais (módulo de rigidez, resistência à ruptura por fadiga e resistência à deformação permanente), ou seja, métodos baseados em propriedades diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos em serviço. Os produtos obtidos enquadram-se em quatro categorias gerais: novos materiais, novos ensaios, novos equipamentos e novas especificações.

Os resultados dos estudos de materiais asfálticos do Programa SHRP foram agrupados e patenteados sob a denominação SUPERPAVE[®], que consiste de novas especificações para cimentos asfálticos e misturas betuminosas, baseadas em modelos de desempenho empírico-mecanísticos, um elenco de novos ensaios e procedimentos, um novo método de dimensionamento de misturas asfálticas, propostas de procedimentos para avaliação e desenvolvimento de modificadores, um sistema para controle da construção nas pistas e programas computacionais.

Os principais ensaios do método Superpave para avaliar o comportamento do ligante asfalto-borracha usados neste trabalho são descritos a seguir.

a) Viscosidade Aparente (Brookfield)

O ensaio para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos utiliza um viscosímetro rotacional cilíndrico (Figuras 5.9 e 5.10), que mede a viscosidade através do torque necessário para rodar uma haste de prova (*spindle*, Figura 5.11) imersa na amostra de asfalto quente, a velocidade constante (Figura 5.12). Para avaliar os vários tipos de ligantes asfálticos utiliza-se o método descrito na ASTM D4402 (ASTM, 1995).

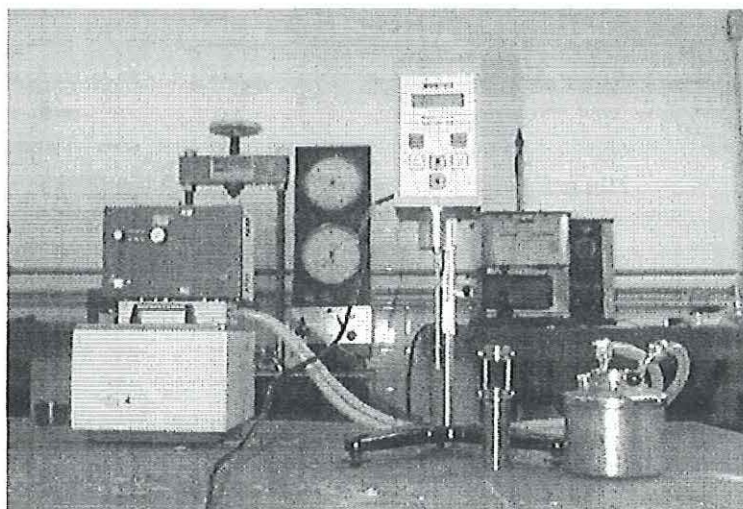


FIGURA 5.9 - Viscosímetro Brookfield utilizado para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos

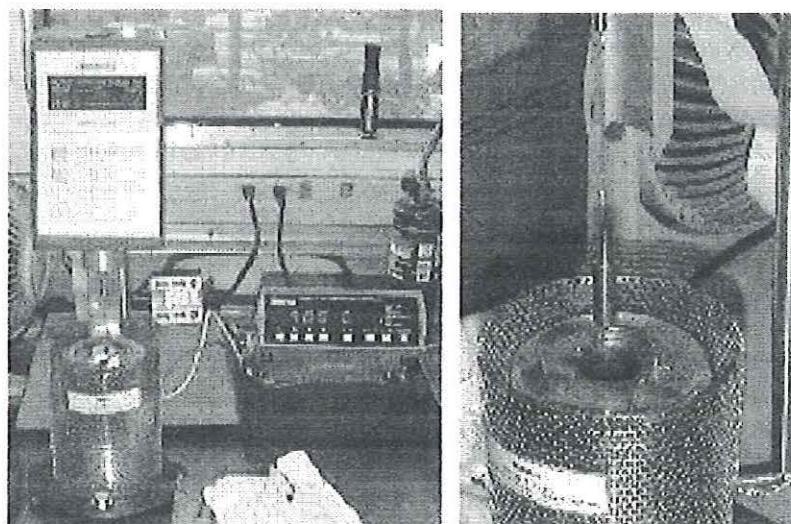


FIGURA 5.10 – Detalhe do sistema de controle de temperatura e da câmara onde é colocada a amostra de ligante asfáltico

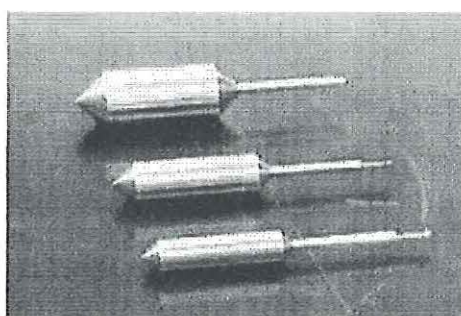


FIGURA 5.11 – Hastes (*spindles*) utilizadas no viscosímetro Brookfield

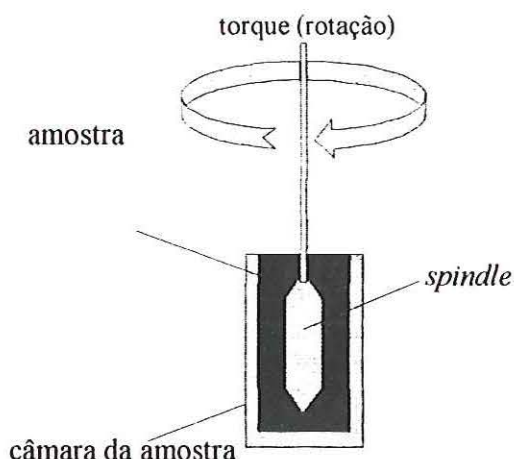


FIGURA 5.12 - Operação do viscosímetro rotacional (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

Para preparar a amostra a ser ensaiada deve-se aquecer o ligante asfáltico em uma estufa (a uma temperatura de até 150°C) para que ele fique fluido. O ligante deve ser misturado durante o aquecimento para remover o ar e deve ser pesado dentro de uma câmara pré-aquecida. A quantidade de ligante asfáltico varia de 8 a 11 gramas, dependendo do tamanho da haste de prova (*spindle*).

O viscosímetro rotacional, geralmente, caracteriza a rigidez do asfalto a 135°C, temperatura em que o material se comporta quase que inteiramente como um fluido viscoso. Para o ensaio de asfalto-borracha tem-se utilizado, também, temperaturas mais elevadas (175°C, por exemplo, adotado pela ASTM D6114-97). A viscosidade do ligante é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado, transportado e misturado com o agregado.

b) Cisalhamento Dinâmico

O ensaio de cisalhamento dinâmico, realizado com o equipamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer*, Figuras 5.13 e 5.14), é usado para caracterizar tanto o comportamento viscoso como o

elástico, através da medida do módulo de cisalhamento complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ) dos ligantes asfálticos. O G^* é a medida da resistência total do material à deformação quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento e consiste de um componente elástico (recuperável) e outro viscoso (não-recuperável). O δ é um indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não-recuperável.

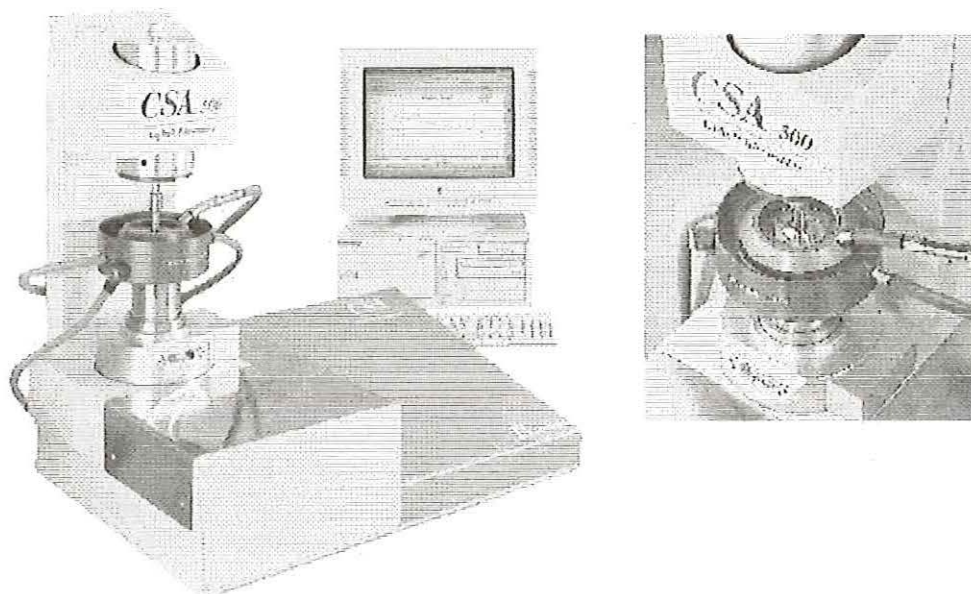


FIGURA 5.13 - Reômetro de cisalhamento dinâmico (Fonte: TA INSTRUMENTS, 1999)

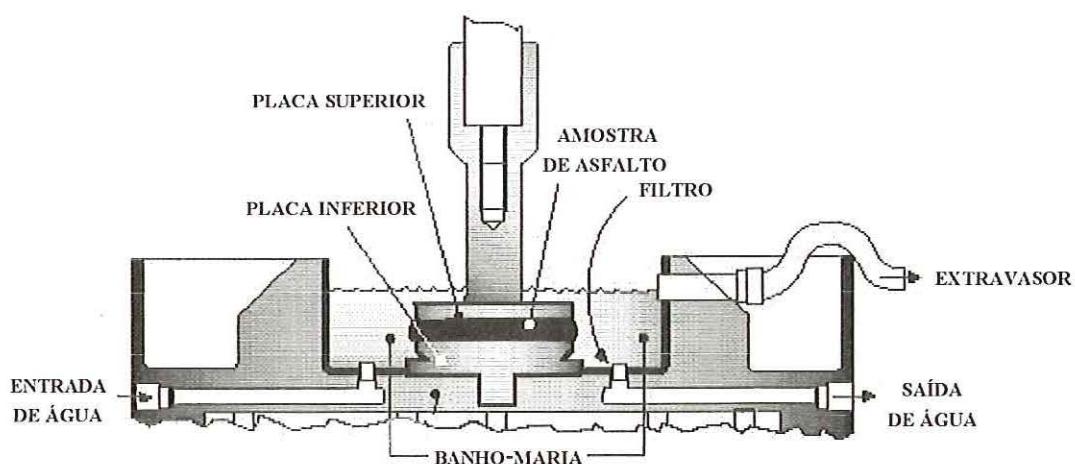


FIGURA 5.14 – Esquema de um Reômetro de cisalhamento dinâmico (adaptada de TA INSTRUMENTS, 1999)

O DSR avalia a rigidez do ligante asfáltico, função do módulo complexo e do ângulo de fase, sob condições de temperaturas máximas em serviço e a taxas de carregamento compatíveis com o tráfego ($t = 0,1$ s; $v = 80$ km/h). São ensaiadas amostras virgens ou envelhecidas em estufa de filme fino rotativo (RTFOT, envelhecimento de curto prazo), sendo estabelecidos valores mínimos capazes de garantir adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente ($G^*/\sin\delta$ maiores que 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para amostras virgens e envelhecidas no RTFOT).

O ensaio de cisalhamento dinâmico também é realizado com amostras envelhecidas em vaso de pressão (PAV, envelhecimento de longo prazo), a temperaturas médias do pavimento em serviço, sendo fixados valores máximos de rigidez para garantir elasticidade suficiente para prevenir o aparecimento de trincas por fadiga ($G^*\sin\delta$ menores que 5000 kPa).

A deformação de cisalhamento ("amplitude da deformação"), que varia de 1 a 20%, depende do estado de envelhecimento do ligante a ser ensaiado. Ligantes não envelhecidos (originais) e os envelhecidos apenas no RTFOT são ensaiados com valores de deformação que variam de 10 a 20%. Os ligantes envelhecidos no PAV são ensaiados com um valor de deformação de 1%. Em todos os casos, os valores de deformação devem ser pequenos o suficiente para que a resposta do ligante (G^*) esteja dentro do intervalo viscoelástico-linear, ou seja, onde o G^* não é afetado por mudanças no nível de deformação.

A operação do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) é simples, o asfalto é colocado entre duas placas paralelas, uma fixa e outra oscilante (Figura 5.15), e o eixo geométrico da placa move-se do ponto A para o ponto B e do ponto B volta para o A e depois move-se para o ponto C, voltando em seguida para o ponto A. Essa oscilação representa um ciclo e é constantemente

repetida durante a operação do DSR. A velocidade de oscilação é a frequência. Os ensaios de ligantes usando um reômetro DSR Superpave são realizados a uma frequência de 10 radianos por segundo, que equivale a aproximadamente 1,59 Hz (ciclos por segundo).

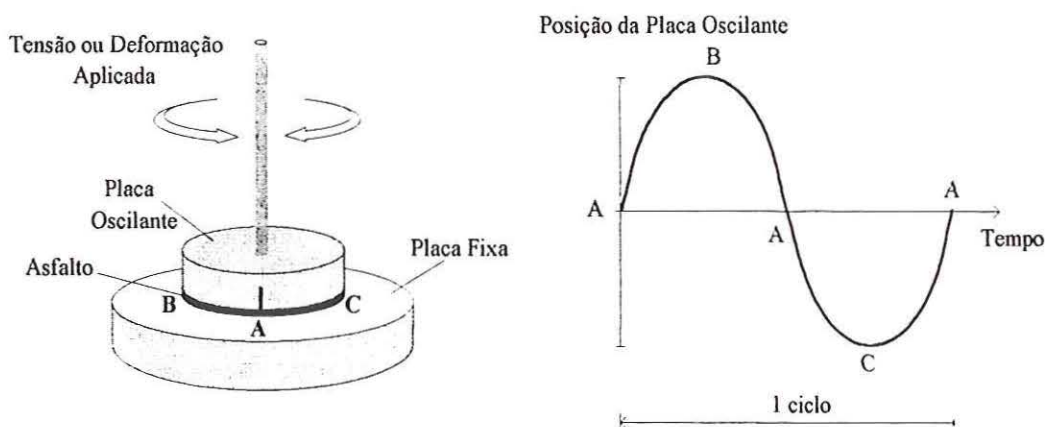


FIGURA 5.15 - Funcionamento de um reômetro de cisalhamento dinâmico (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

c) Envelhecimento de Curto Prazo

O ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test* – ASTM D 2872), que simula o envelhecimento que ocorre na usina, tem duas finalidades: fornecer ligante asfáltico envelhecido para a realização de ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente e determinar a quantidade de voláteis perdida pelo asfalto durante o processo de envelhecimento. A perda de voláteis é um indicador do envelhecimento que pode ocorrer no asfalto durante a mistura em usina e a construção do pavimento.

A perda de massa é definida como a média percentual de perda de duas amostras após envelhecimento na RTFOT e é calculada através da seguinte equação:

$$\text{Perda de massa, \%} = \frac{\text{massa original} - \text{massa envelhecida}}{\text{massa original}} \times 100 \quad (5.2)$$

O envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) é realizado em uma estufa pré-aquecida à temperatura de 163°C que sustenta oito frascos com as amostras (Figura 5.16). Ao girar há um revolvimento contínuo das amostras, sendo que no ponto baixo há, também, a injeção de ar no jato.

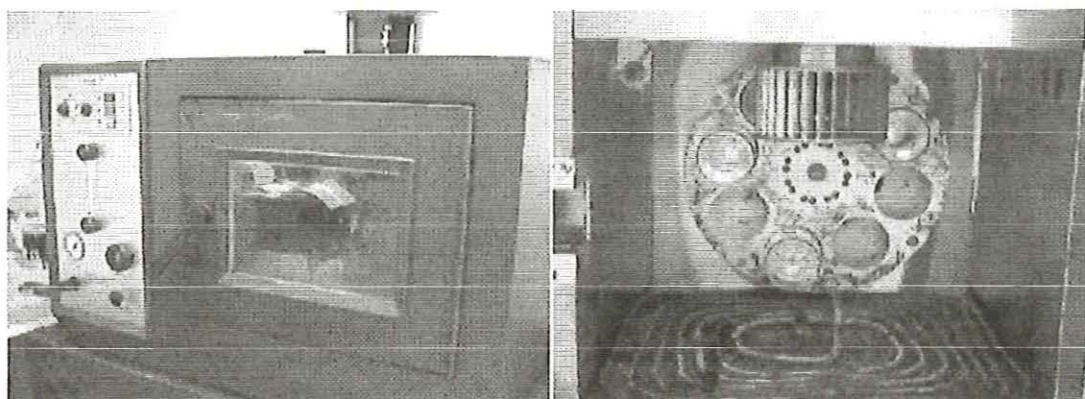


FIGURA 5.16 - Estufa de Filme Fino Rotativo (Ensaio RTFOT)

Para realizar o ensaio de envelhecimento no RTFOT, a amostra de ligante deve ser aquecida até que fique fluida, não excedendo 150°C. Os frascos do RTFOT são “preenchidos” com $35 \pm 0,5$ gramas de ligante virgem (Figura 5.17). Duas amostras são utilizadas para determinar a perda de massa e os outros seis frascos são usados para produzir materiais para ensaios adicionais.

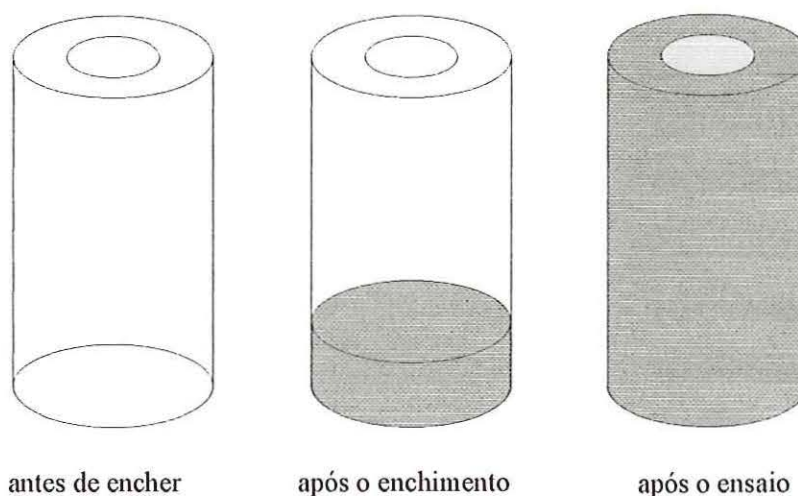


FIGURA 5.17- Frascos utilizados no ensaio RTFOT (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

Os frascos com as amostras são colocados no suporte e submetidos a uma rotação de 15 revoluções por minuto. O fluxo de ar é introduzido a uma taxa de 4000 ml/min e as amostras são expostas a essas condições durante 80 ± 5 minutos. Após o envelhecimento, os dois frascos contendo a perda de massa da amostras são resfriados, pesados e as amostras são descartadas. O resíduo do RTFOT dos outros frascos é despejado em um único recipiente e misturado até ficar homogêneo. Geralmente, uma pequena parte do ligante envelhecido é submetida ao ensaio com o DSR, cerca de 50 gramas são submetidos ao envelhecimento acelerado em vaso de pressão (PAV) e o restante é armazenado para uso futuro.

d) Envelhecimento de Longo Prazo

O ensaio de envelhecimento acelerado (oxidação) de ligantes asfálticos, por meio de ar sob pressão e temperatura elevada, em um vaso de pressão (PAV, Figuras 5.18 e 5.19), utiliza o resíduo de material previamente submetido ao ensaio de rotação de filme fino em estufa para simular as propriedades físicas e químicas (envelhecimento) dos ligantes asfálticos após 5 a 10 anos de vida em serviço.

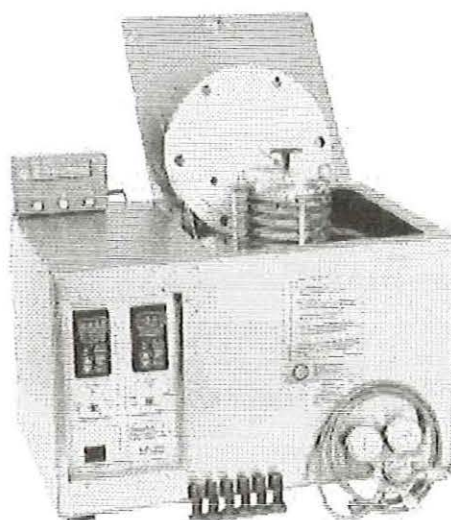


FIGURA 5.18 - Vaso de pressão (PAV) utilizado para envelhecimento acelerado de ligantes asfálticos

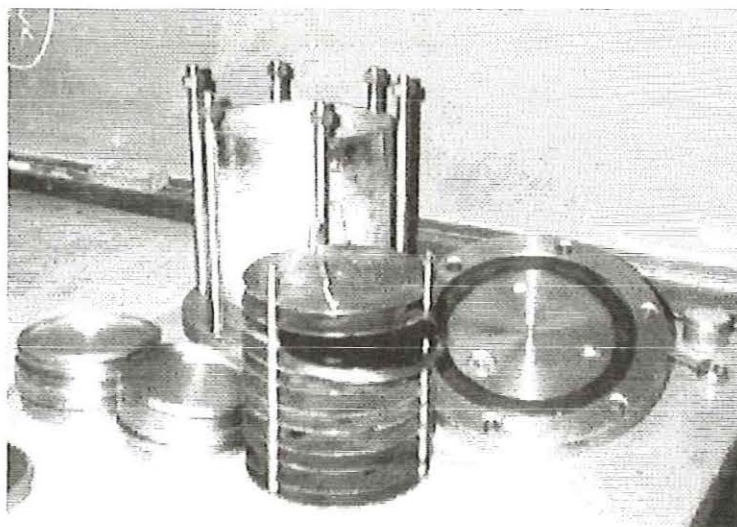


FIGURA 5.19 - Detalhe do vaso de pressão para ensaio de envelhecimento de longo prazo - foto de equipamento da Universidade do Texas em Austin

Deve-se destacar que o envelhecimento dos ligantes durante a vida em serviço também é afetado por variáveis associadas à mistura, tais como a dosagem, a permeabilidade e propriedade dos agregados, dentre outras. O ensaio de envelhecimento acelerado em vaso pressurizado permite uma avaliação da resistência relativa de diferentes ligantes à oxidação, sob temperaturas selecionadas, não levando em conta, porém, os fatores associados à mistura.

e) Rigidez à Fluência na Flexão

Para avaliar as propriedades dos ligantes a baixas temperaturas é utilizado o reômetro de viga à flexão (BBR, *Bending Beam Rheometer*, Figura 5.20), que mede a deflexão no ponto médio de uma viga prismática de ligante betuminoso (envelhecido no PAV), simplesmente apoiada, submetida a carregamento constante, também aplicado no meio do vão, por 240 s.

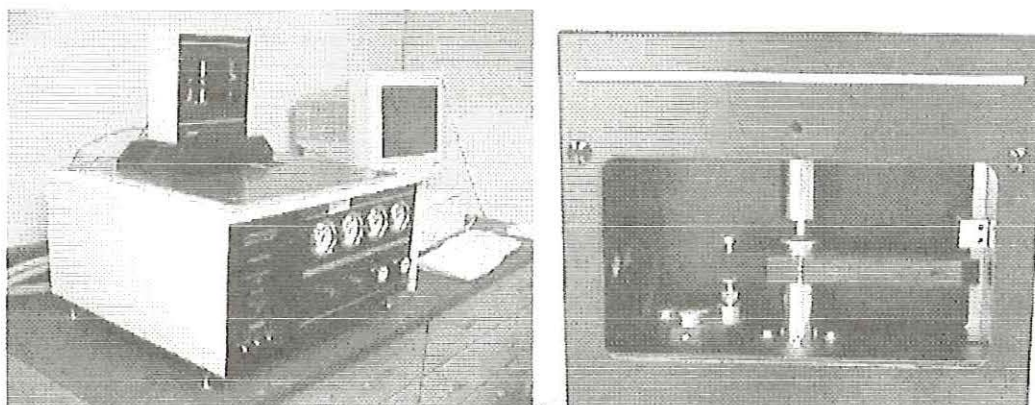


FIGURA 5.20 - Reômetro de viga à flexão

A temperatura de ensaio é controlada (Figura 5.21) e depende das temperaturas mínimas na região onde será construído o pavimento. Os gráficos de carga e de deflexão *versus* tempo de carregamento são usados para a determinação da rigidez S e do módulo de relaxação m (“creep rate”), que representa a taxa de variação da rigidez em função do tempo de carregamento, $S(t)$. Um exemplo de cálculo de S e m é apresentado no Anexo C.

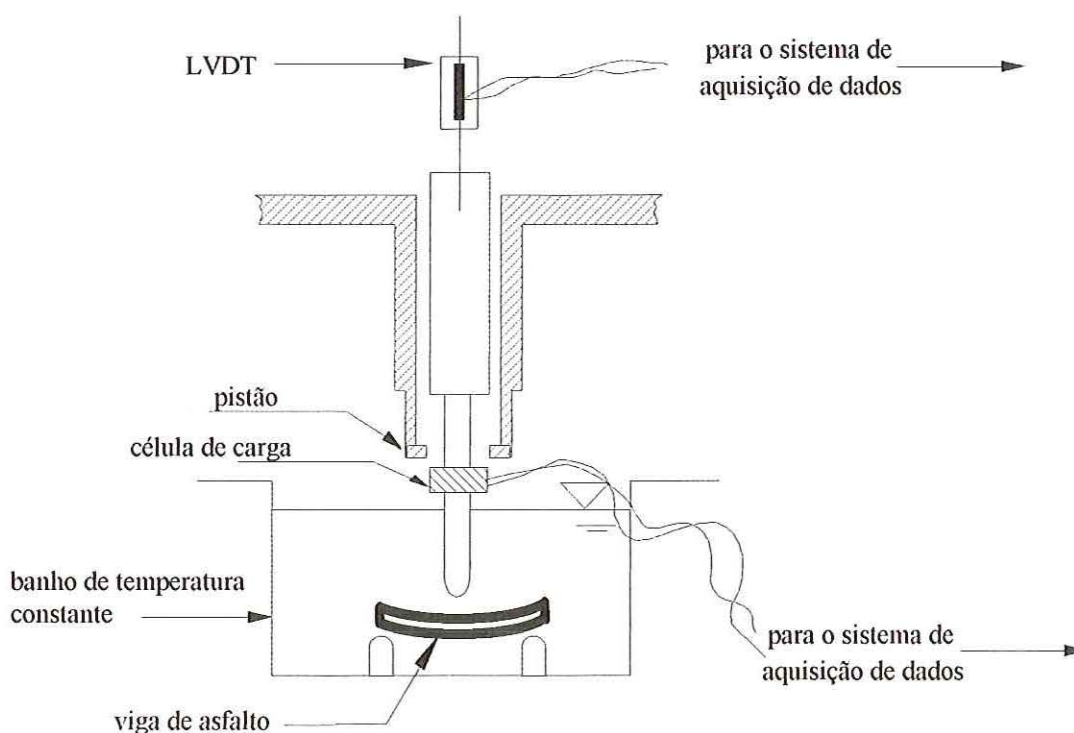


FIGURA 5.21 - Esquema do reômetro de viga à flexão - adaptado de HARRIGAN, LEAHY e YOUTCHEFF (1994)

O desempenho de misturas asfálticas é previsto a partir da resposta tensão-deformação do ligante, uma vez que a resistência ao aparecimento de trincas por contração de origem térmica depende da rigidez à fluência. A especificação Superpave recomenda que o valor da rigidez no ensaio BBR seja menor que 300 MPa a 60 segundos. Analogamente, ligantes com altos valores de m são mais eficientes na dissipação das tensões formadas durante a contração do ligante, quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, minimizando a formação de trincas e fissuras. Segundo a especificação Superpave, o m , calculado para $t = 60$ s, deve ser maior ou igual a 0,300.

Alguns ligantes, particularmente os modificados com polímeros, podem exibir uma rigidez estática a baixa temperatura maior do que o desejado e, assim mesmo, não trincar a baixas temperaturas devido a capacidade de deformar sem romper. Se, no entanto, esses ligantes apresentarem m superior ao limite estabelecido pelo método Superpave poderão ser aceitos desde que apresentem um resultado satisfatório no ensaio de tração direta (*Direct Tension Test*, DTT).

6 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresenta-se neste capítulo, os resultados dos ensaios tradicionais utilizados para caracterização das amostras de asfalto-borracha (penetração, ponto de fulgor e ponto de amolecimento), assim como dos ensaios Superpave (viscosidade aparente Brookfield, cisalhamento dinâmico e rigidez à fluência na flexão). É importante mencionar que para os ensaios convencionais (penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor) foram ensaiadas três réplicas, enquanto que para os ensaios Superpave (DSR e viscosidade Brookfield) foram ensaiadas duas réplicas. Apresenta-se, também, uma análise estatística dos resultados, onde foram desenvolvidos modelos estatísticos que representam o comportamento do ligante asfalto-borracha em função dos fatores considerados.

6.1 - ENSAIOS CONVENCIONAIS

Os resultados dos ensaios tradicionais são apresentados em forma de tabelas e gráficos.

6.1.1 - PENETRAÇÃO

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência dos materiais asfálticos. O comportamento previsto é que a adição de borracha torne o ligante mais consistente, resultando em valores mais baixos de penetração em

função do aumento do teor de borracha nas misturas. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 6.1 e na Figura 6.1, no entanto, mostram que a penetração aumenta até um teor de 12 %, estabilizando ou diminuindo para os teores de 18 e 24 % de borracha.

TABELA 6.1 – Resultados de penetração (1/10 mm) das misturas asfalto-borracha (temperatura de ensaio: 25° C)

Penetração (1/10 mm)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
6	39	40	42	41	39	39	36	36	38	35	36	37
12	59	60	60	48	46	47	51	52	51	46	47	46
18	43	44	42	46	47	46	40	41	39	49	49	49
24	48	47	49	47	46	46	47	48	46	48	49	50

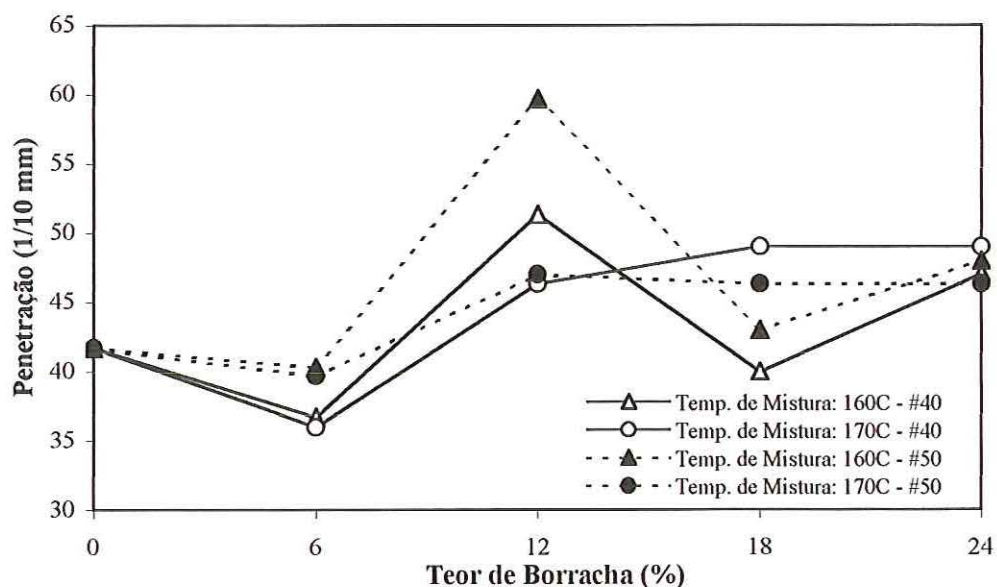


FIGURA 6.1 - Efeito do teor de borracha na penetração do ligante asfalto-borracha

Comparando-se os resultados da Tabela 6.1 com os limites estabelecidos pelas especificações apresentadas no capítulo 4, para as condições climáticas no

Estado de São Paulo, todas as amostras de ligante asfalto-borracha atendem aos limites mínimo (25) e máximo (75) da especificação ASTM D6114 (ASTM, 1997) e que apenas as amostras contendo 12% atendem aos limites estabelecidos por BAKER RUBBER Inc. (limites mínimo de 50 e máximo de 100) (HEIZTMAN, 1992b).

6.1.2 - PONTO DE AMOLECIMENTO

O ponto de amolecimento consiste no valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. A Tabela 6.2 apresenta os resultados de ponto de amolecimento (Método do Anel e Bola). A Figura 6.2 ilustra o efeito do teor de borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.

TABELA 6.2 – Resultados de ponto de amolecimento (°C)

Ponto de Amolecimento (°C)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
6	54	55	53	52	54	50	55	56	54	53	55	54
12	57	59	58	61	60	61	59	59	58	57	56	58
18	64	63	61	60	62	61	64	64	64	60	59	61
24	65	64	66	68	67	66	65,5	66	65	64	66	65

Pode-se observar na Figura 6.2 que o ponto de amolecimento é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha. Comparando-se o ponto de amolecimento das amostras com e sem borracha, ocorre uma melhoria nas características do ligante asfáltico com a adição da borracha. De acordo com as especificações, verifica-se que todas as amostras atendem ao limite mínimo (de 49°C) estabelecido por BAKER RUBBER Inc. (HEIZTMAN, 1992b) e

que apenas algumas réplicas dos ensaios executados com 6% de borracha apresentam valores abaixo do limite mínimo de 54,4°C exigido pela ASTM D6114 (1997).

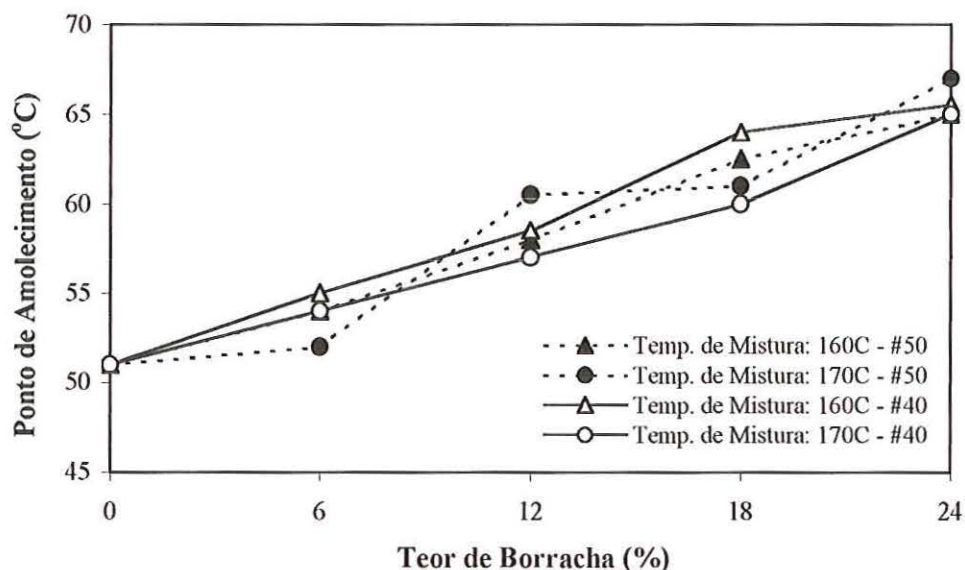


FIGURA 6.2 - Efeito do teor de borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

6.1.3 - PONTO DE FULGOR

O ensaio de ponto de fulgor tem como objetivo garantir a segurança durante o transporte e manuseio dos materiais asfálticos. A Tabela 6.3 e a Figura 6.3 apresentam os resultados de ponto de fulgor das misturas asfalto-borracha.

TABELA 6.3 - Resultados de ponto de fulgor (°C) das misturas asfalto-borracha

Ponto de Fulgor (°C)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289
6	266	264	265	278	279	277	284	283	282	281	280	282
12	315	319	317	304	305	303	290	291	292	295	297	296
18	294	296	292	297	293	292	308	306	310	300	299	298
24	294	295	290	296	295	291	298	297	299	295	298	301

Durante a realização dos ensaios pôde-se verificar que, após um determinado tempo de aquecimento da mistura, formava-se uma película na superfície e só ocorriam centelhas quando a amostra era agitada com uma espátula. Mesmo com essa alteração no procedimento de ensaio, visando eliminar o efeito da película que bloqueava a liberação dos vapores, os resultados mostram que a adição de borracha, independentemente da temperatura de mistura, do tamanho das partículas e do teor de borracha, aumenta o ponto de fulgor (de 289°C, para o ligante sem borracha, a até 317°C).

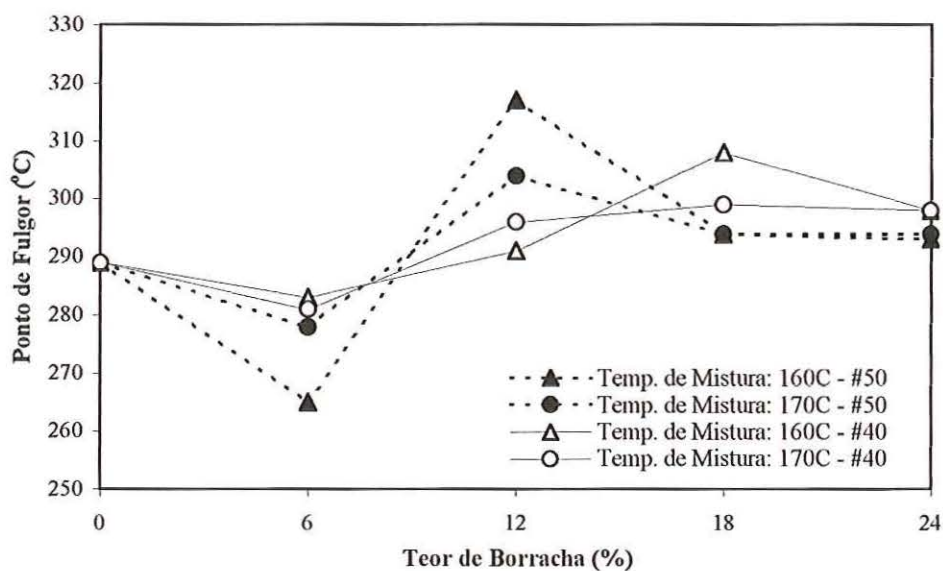


FIGURA 6.3 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha

Todas as amostras apresentaram valores superiores aos limites estabelecidos pela especificação ASTM D6114 (de 232,2°C) e pela especificação Superpave (de 230°C), que também considera o ensaio do Ponto de Fulgor. Constata-se, portanto, que a adição de borracha não é um fator que compromete a segurança, tendo inclusive, um efeito benéfico.

6.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SUPERPAVE

6.2.1 – VISCOSIDADE APARENTE (BROOKFIELD)

A viscosidade dos ligantes asfálticos é, geralmente, especificada a 60 e a 135°C. A viscosidade a 60°C é utilizada para classificar o asfalto, por ser próxima à máxima temperatura que o pavimento suportará quando em serviço. A viscosidade a 135°C serve para prover informação sobre a melhor temperatura de mistura em usina e de lançamento e compactação no campo.

As especificações propostas pela ASTM D6114 (ASTM, 1997) e por BAKER RUBBER Inc. (HEIZTMAN, 1992b) estabelecem que a viscosidade aparente do ligante asfalto-borracha deve ser determinada a uma temperatura de 175°C, pois esta é a temperatura mais utilizada para o preparo do ligante asfalto-borracha em usina.

As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os resultados de viscosidade das amostras asfalto-borracha com equipamento Brookfield para temperaturas de 175 e 135°C, respectivamente.

TABELA 6.4 – Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 175°C)

Viscosidade (cP)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
6	129	129	128	125	127	125	128	128	128	126	126	126
12	243	243	242	243	241	243	495	490	485	251	251	251
18	980	955	933	719	711	703	782	775	764	235	233	230
24	2078	2123	2073	1892	1857	1907	2351	2184	2287	1902	1811	2225

TABELA 6.5 – Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 135°C)

Viscosidade (cP)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	403	400	400	403	400	400	403	400	400	403	400	400
6	911	911	911	936	934	931	976	973	976	918	917	919
12	1485	1485	1485	1960	1893	1863	2574	2572	2554	1493	1490	1493
18	5012	4966	5023	3354	3349	3337	5531	5235	5676	2349	2342	2336
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

*impossibilidade de realização de ensaio.

Comparando-se os valores da Tabela 6.4 com os valores estabelecidos pelas especificações propostas pela ASTM D6114 e por BAKER RUBBER Inc., pode-se verificar que apenas as amostras contendo 24% de borracha moída apresentam valores acima do valor mínimo exigido pelas duas especificações (respectivamente, 1500 e 1000 cP).

Entretanto, considerando-se a especificação Superpave, que determina que a temperatura de ensaio é de 135°C, pode-se verificar que apenas as amostras contendo 6 e 12% de borracha apresentam valores abaixo do limite máximo estabelecido de 3000 cP (Tabela 6.5). Não foi possível determinar a viscosidade dos ligantes asfalto-borracha com 24% de borracha.

As Figuras 6.4 e 6.5 mostram o efeito dos fatores (granulometria e teor de borracha, temperatura de mistura) na viscosidade do ligante asfalto-borracha. As linhas tracejadas representam extrapolações.

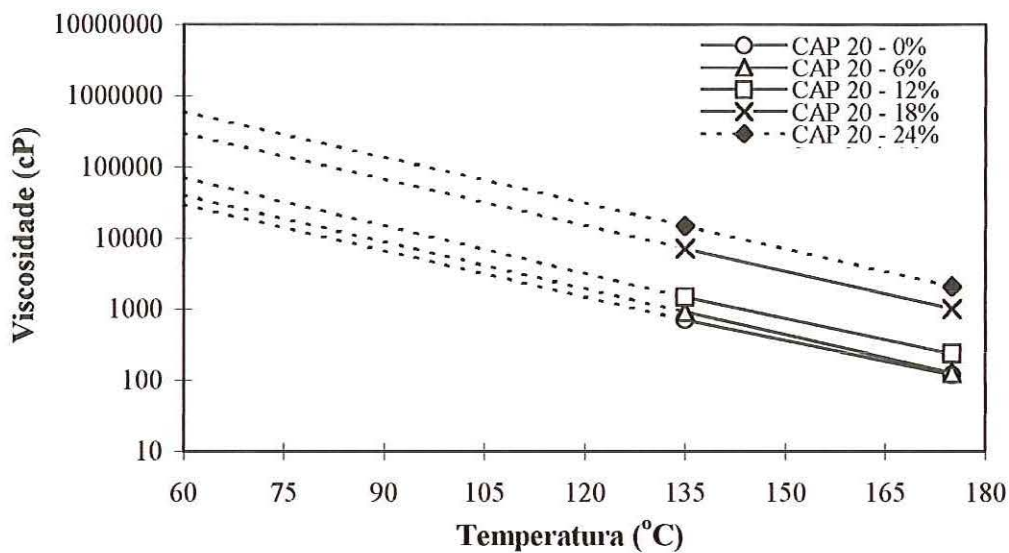


FIGURA 6.4 - Variação da viscosidade em função do teor de borracha

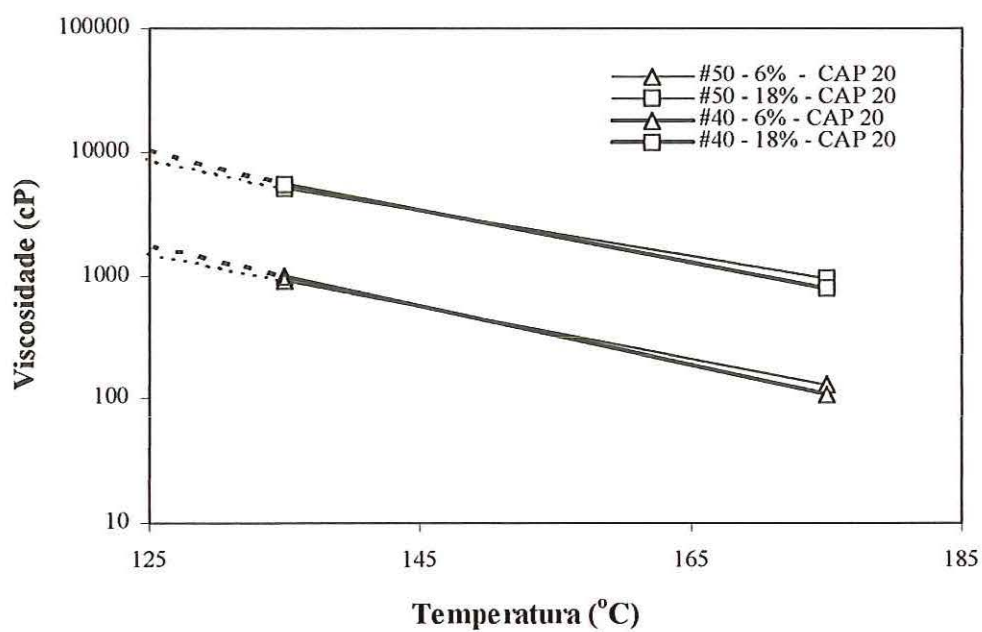


FIGURA 6.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha em função do teor e da granulometria da borracha

6.2.2 – MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE VIRGEM

O módulo complexo (G^*) é a medida da resistência total do ligante asfáltico à deformação permanente, quando o material é exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento. O ângulo de fase (δ) indica a quantidade de deformação recuperável e não recuperável, apresentando valores menores quando o material é mais elástico, ou seja, mais resistente à formação de trincas por fadiga. Os resultados do ensaio DSR são apresentados nas Tabelas 6.6 a 6.8.

TABELA 6.6 – Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - G^* (Pa)
(temperatura de ensaio: 64°C)

G^* (Pa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	1678	1678	1678	1678	1678	1678	1678	1678
6	2548	2574	2776	2290	2958	2919	2867	2855
12	3750	3944	5544	5266	5734	5358	5223	3191
18	8914	8901	7419	7573	9213	8974	6733	6709
24	13770	13550	15210	15050	10580	11320	15240	14570

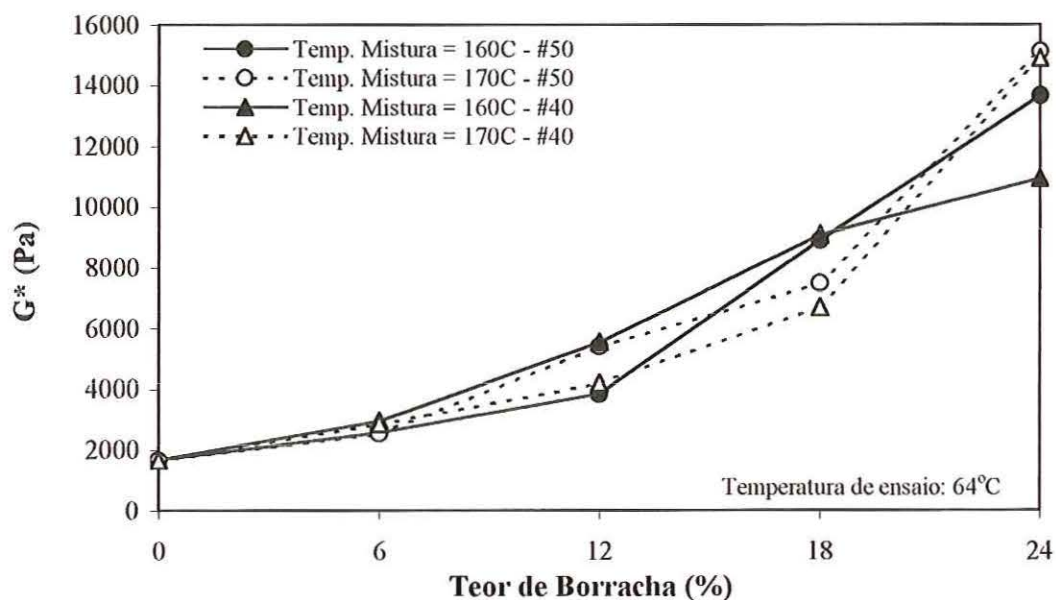
TABELA 6.7 – Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - δ (graus)

δ (graus)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6
6	85,6	85,7	85,3	85,7	85,1	85,1	84,8	84,8
12	78,0	77,8	75,2	75,4	73,3	73,5	74,8	74,6
18	66,9	66,2	70,6	70,5	67,5	67,5	70,8	70,4
24	58,8	59,6	57,7	57,5	65,6	65,2	61,2	60,4

TABELA 6.8 – Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)

$G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura ($^{\circ}\text{C}$)							
	160		170		160		170	
0	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
6	2,6	2,6	2,8	2,3	3,0	2,9	2,9	2,9
12	3,8	4,0	5,7	5,4	6,0	5,6	5,4	3,3
18	9,7	9,7	7,9	8,0	10,0	9,7	7,1	7,1
24	16,1	15,7	18,0	17,8	11,6	12,5	17,4	16,8

As Figuras 6.6 e 6.7 apresentam a variação do G^* e do δ em função do teor de borracha, observando-se um aumento na resistência ao acúmulo de deformação permanente com o aumento do teor de borracha (Figura 6.8).

**FIGURA 6.6** - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento complexo

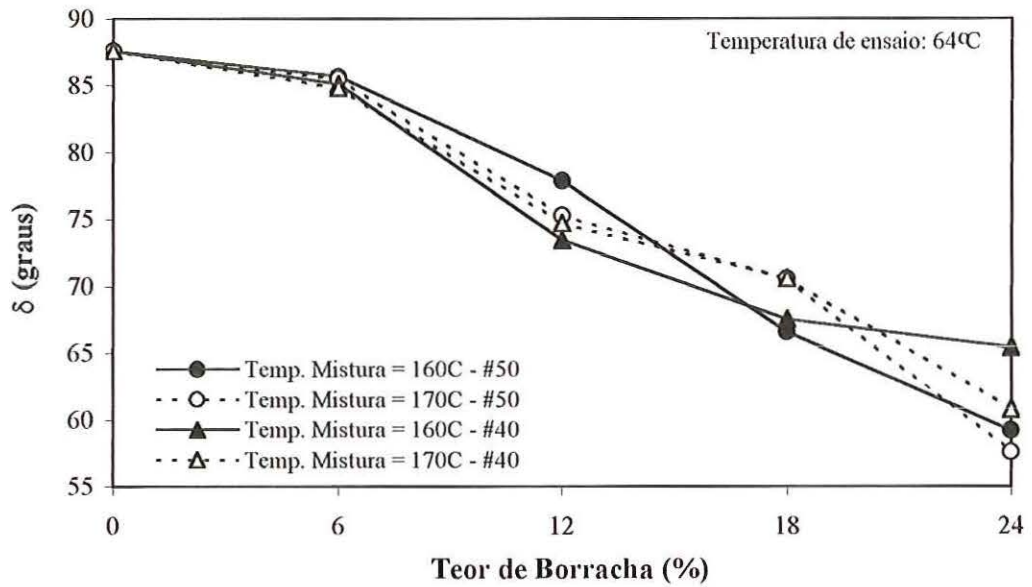


FIGURA 6.7 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ

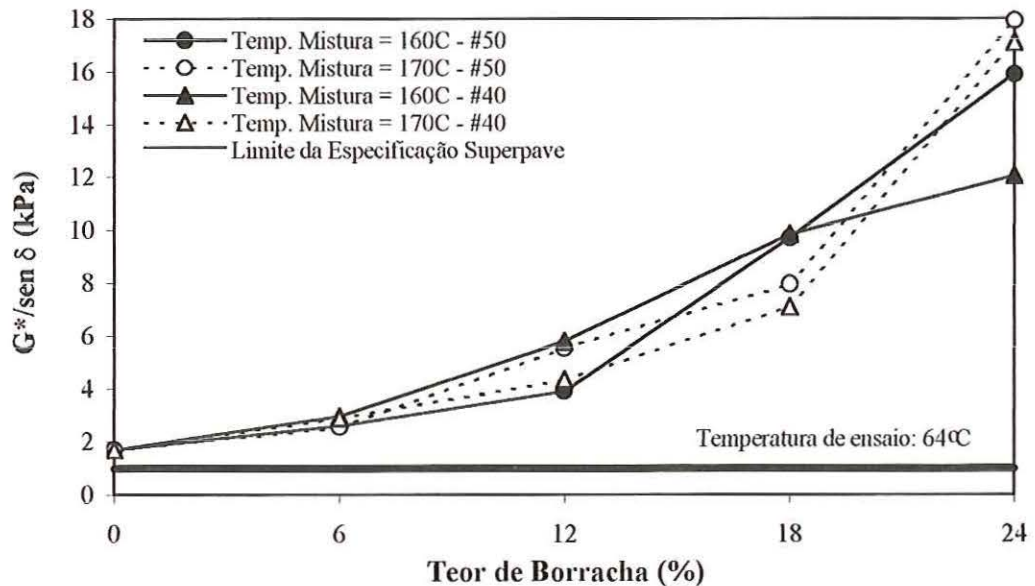


FIGURA 6.8 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente, representada pelo parâmetro $(G^*/\text{sen } \delta)$

6.2.3 – MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE APÓS ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO

O ensaio com o DSR para determinar o módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após o envelhecimento de curto prazo também é realizado para avaliar a resistência ao acúmulo de deformação permanente. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.9 a 6.11.

TABELA 6.9 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - G^* (Pa) (temperatura de ensaio: 64°C)

G^* (Pa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720
6	4168	4121	5142	4976	1168	1217	5875	7283
12	6649	5508	7849	9101	6088	6190	7284	8094
18	10520	10200	10370	9843	10860	11350	10643	10852
24	26480	27100	23840	20040	12500	11130	16100	-

TABELA 6.10 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - δ (graus)

δ (graus)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2
6	83,3	83,3	81,2	81,7	84,1	83,8	78,9	79,5
12	75,4	77,4	70,5	71,2	75,3	74,4	73,3	70,3
18	63,9	63,9	68,3	66,9	63,8	62,8	64,6	64,6
24	48,9	48,7	47,4	51,8	60,3	60,1	58,2	-

TABELA 6.11 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - $G^*/\text{sen}\delta$ (kPa)

$G^*/\text{sen}\delta$ (kPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura ($^{\circ}\text{C}$)							
	160		170		160		170	
0	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
6	4,2	4,2	5,2	5,0	1,2	1,2	6,0	7,4
12	6,9	5,6	8,4	9,9	6,3	6,4	7,6	8,6
18	11,7	11,4	11,0	10,4	12,1	12,8	11,9	12,1
24	35,1	36,1	32,4	25,5	14,4	12,8	19,0	-

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam a variação do G^* e do δ em função do teor de borracha e a Figura 6.11 mostra o aumento na resistência ao acúmulo de deformação permanente com o aumento do teor de borracha.

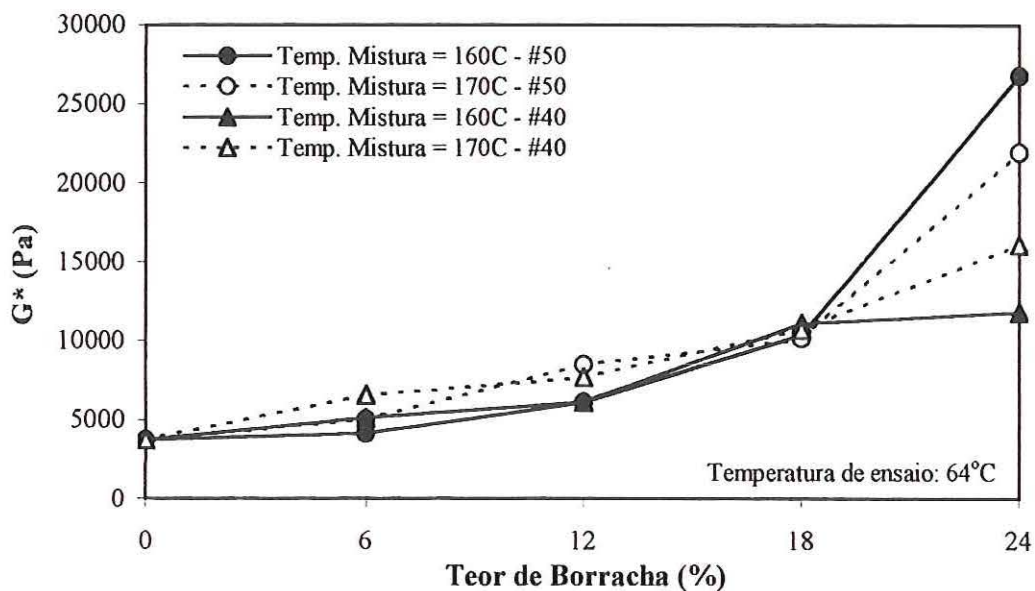


FIGURA 6.9 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico

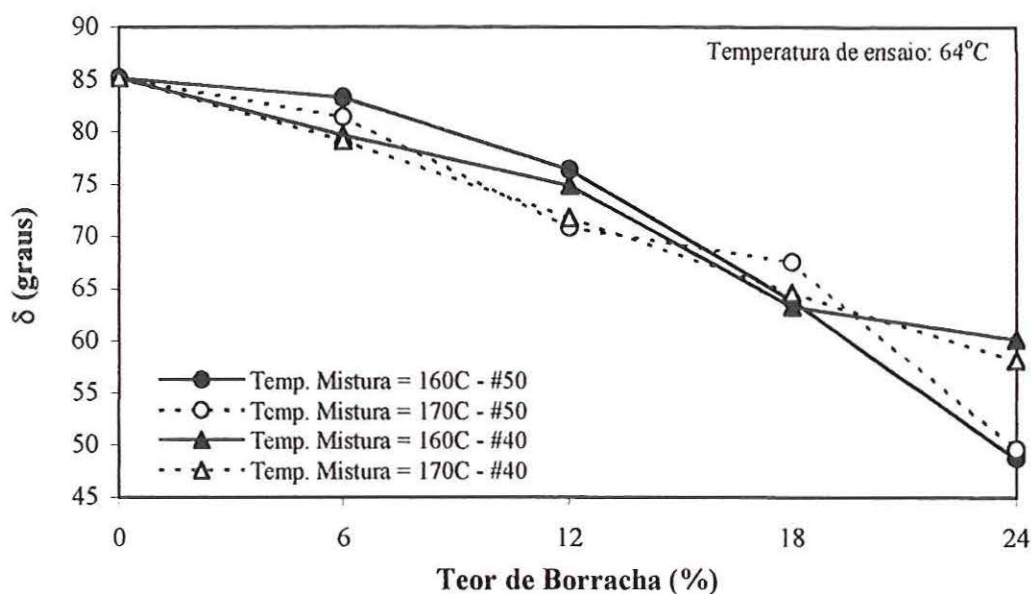


FIGURA 6.10 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ

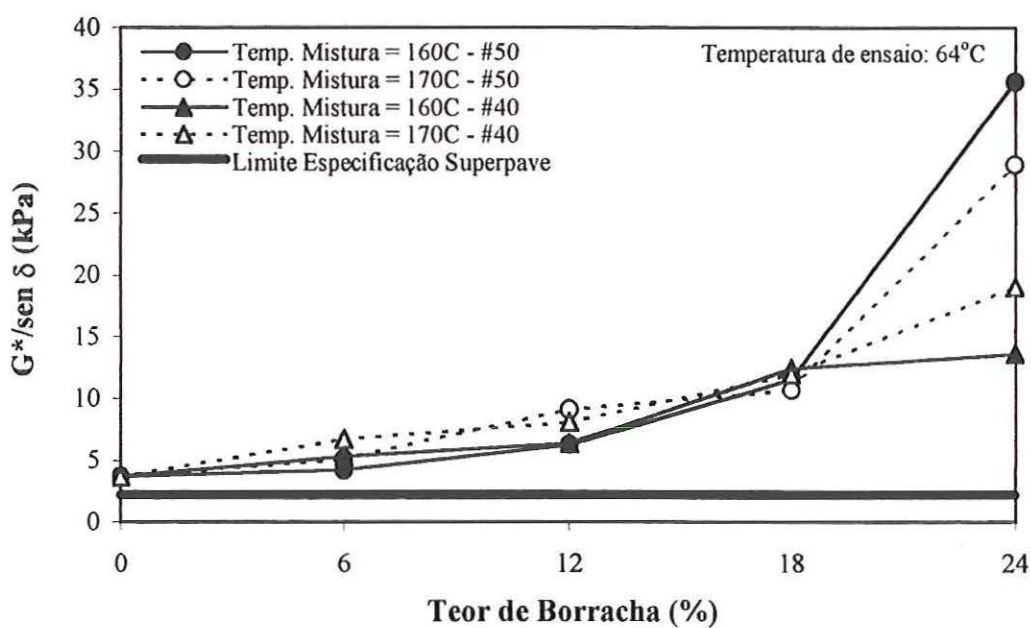


FIGURA 6.11 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente

Pode-se observar que as amostras com maior teor de borracha apresentam maiores valores de rigidez ($G^*/\text{sen } \delta$, Tabela 6.11), ou seja, são mais

resistentes ao acúmulo de deformação permanente. Deve-se destacar que todas as amostras apresentaram valores maiores que o limite mínimo da Especificação Superpave.

6.2.4 – MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE APÓS ENVELHECIMENTO DE LONGO PRAZO

O ensaio com o DSR para determinar o módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após o envelhecimento de longo prazo é realizado para avaliar a resistência à formação de trincas por fadiga. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.12 a 6.14.

TABELA 6.12 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - G^* (Pa) (temperatura de ensaio: 31°C)

G^* (Pa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	4174000	3361000	4174000	3361000	4174000	3361000	4174000	3361000
6	4312000	4555000	2944000	3147000	3816000	2843000	2856000	2029000
12	1891000	1640000	2706000	2138000	1683000	1557000	2024000	1962000
18	863500	952500	1179000	1097000	995100	942600	1520000	1576000
24	746400	-	1295000	-	1004000	-	938500	857700

TABELA 6.13 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - δ (graus)

δ (graus)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	52,7	53,4	52,7	53,4	52,7	53,4	52,7	53,4
6	52,4	52,5	51,7	51,7	53,0	50,6	52,9	52,2
12	51,1	51,0	48,9	48,8	49,4	49,0	49,5	49,3
18	46,6	45,8	46,2	46,0	46,3	46,6	48,3	48,3
24	44,3	-	42,3	-	43,4	-	44,0	43,6

TABELA 6.14 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - $G^* \cdot \text{sen } \delta$ (kPa)

$G^* \cdot \text{sen } \delta$ (kPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura ($^{\circ}\text{C}$)							
	160		170		160		170	
0	2674	3353	2674	3353	2674	3353	2674	3353
6	3416	3613	2310	2469	3049	2198	2278	1603
12	1550	1274	2038	1609	1277	1174	1539	1487
18	627	682	850	789	720	685	1134	1176
24	521	-	871	-	689	-	652	592

As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam a variação do G^* e do δ em função do teor de borracha. A Figura 6.14 mostra o aumento na resistência à formação de trincas por fadiga com o aumento do teor de borracha, destacando-se que todas as amostras de ligante asfalto-borracha apresentaram rigidez inferior ao limite máximo da Especificação Superpave (5000 kPa).

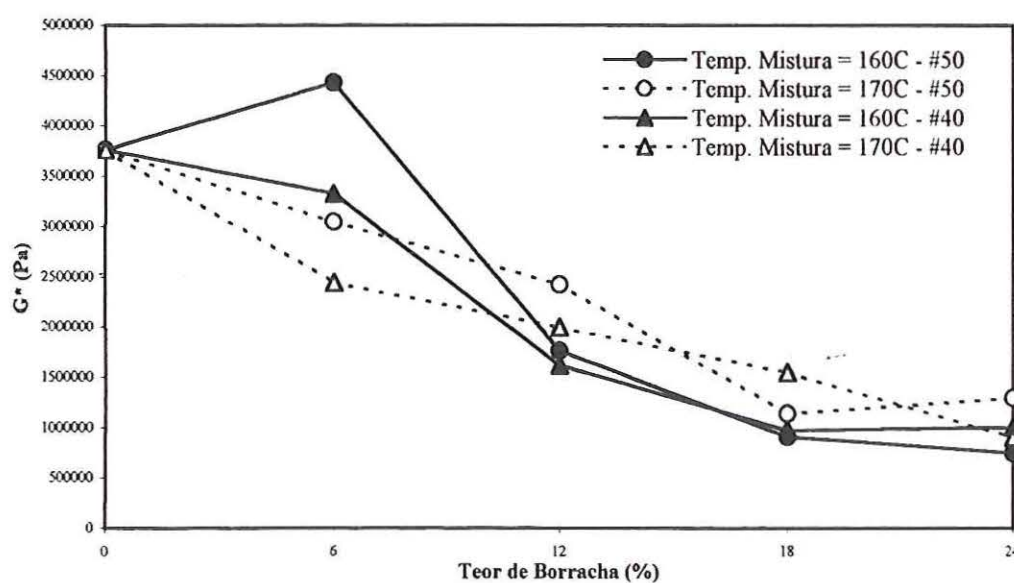


FIGURA 6.12 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico

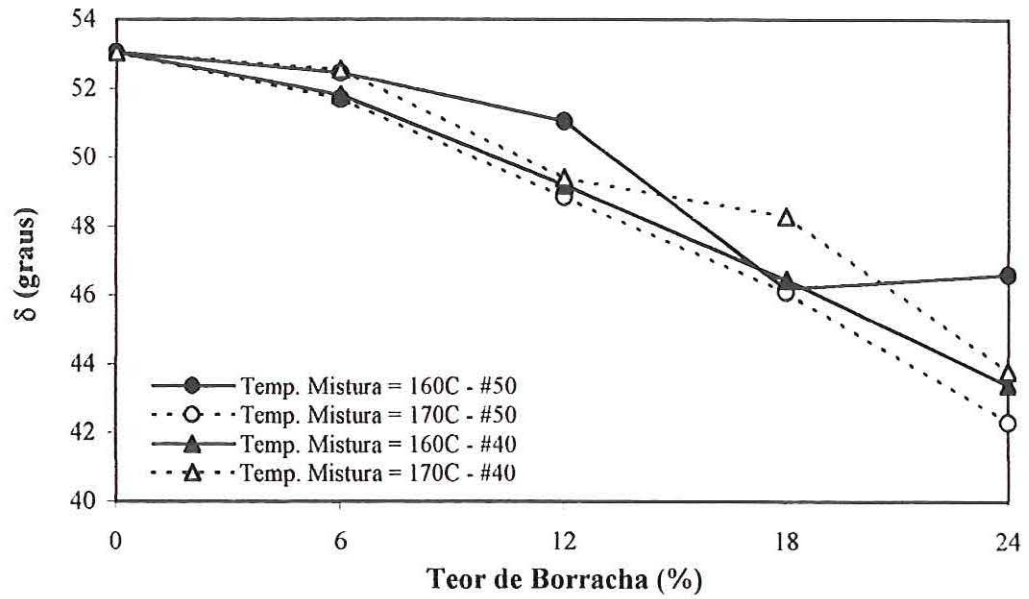


FIGURA 6.13 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ

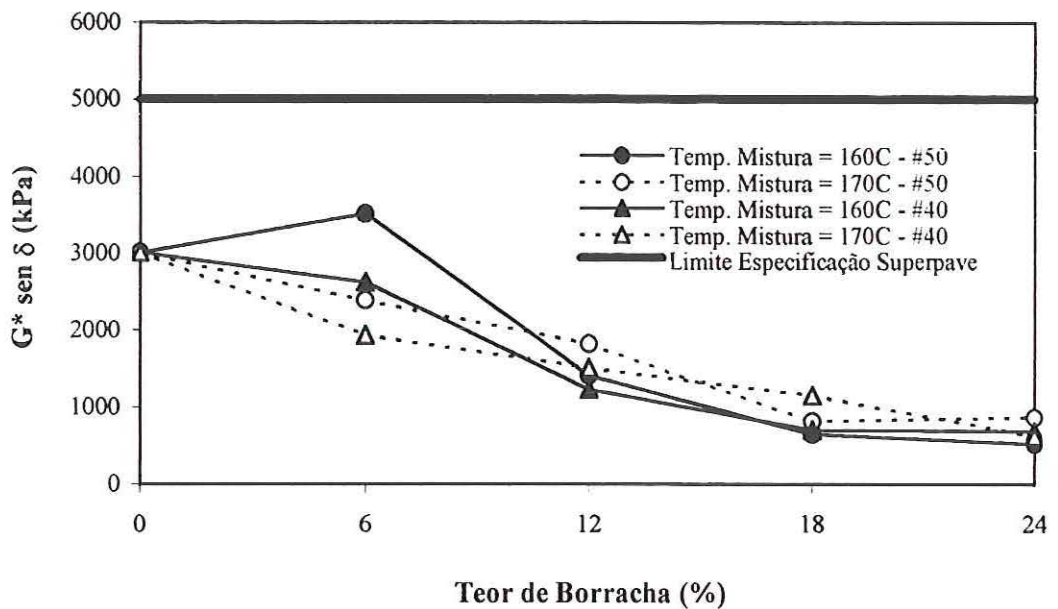


FIGURA 6.14 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga

6.2.5 - RIGIDEZ À FLUÊNCIA NA FLEXÃO

O ensaio realizado com o reômetro de fluência na flexão (BBR) avalia a resistência à formação de trincas por contração de origem térmica. Essa avaliação é feita a partir da rigidez (S) e do módulo de relaxação (m). De acordo com a especificação Superpave, a rigidez de ligantes asfálticos deve ser menor do que 300 MPa e o módulo de relaxação deve apresentar valores superiores a 0,300.

A Tabela 6.15 apresenta um resumo com os resultados de rigidez e a Tabela 6.16 apresenta um resumo com os resultados de módulo de relaxação. As Figuras 6.15 e 6.16 ilustram o efeito do teor de borracha na resistência de ligantes asfalto-borracha à formação de trincas por contração de origem térmica.

TABELA 6.15 – Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de S (temperatura de ensaio: 0°C)

S (MPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
6			46,6	46,6	54,7	54,5	57,6	57,6
12	30,3	30,3	33,8	33,9	19,6	19,7	40,5	40,5
18	16,6	16,5	16,3	16,4	15,6	15,6	18,6	18,5

TABELA 6.16 – Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de m

m	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460
6			0,425	0,425	0,430	0,430	0,416	0,416
12	0,496	0,496	0,488	0,488	0,441	0,441	0,509	0,509
18	0,359	0,359	0,372	0,372	0,371	0,371	0,275	0,275

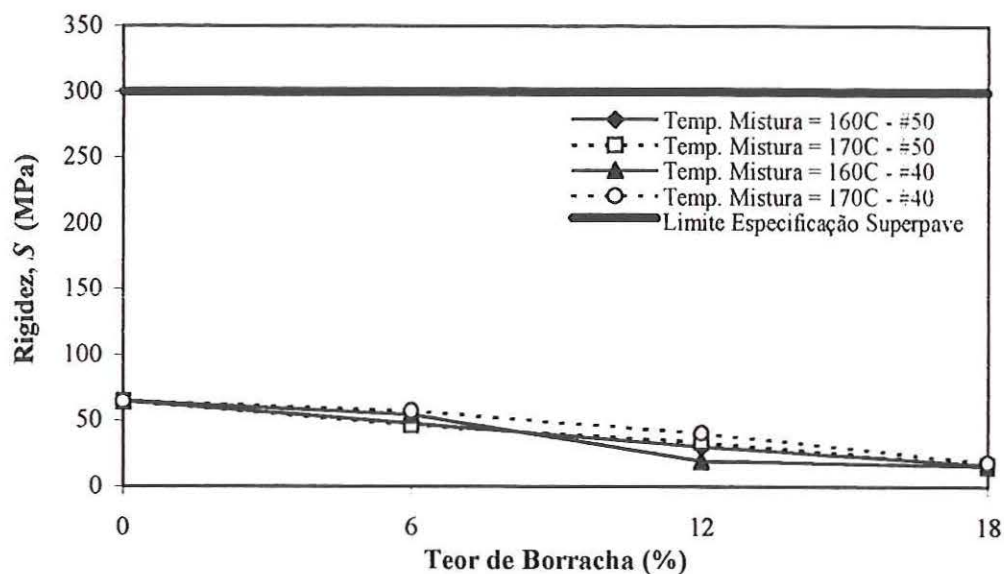


FIGURA 6.15 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica

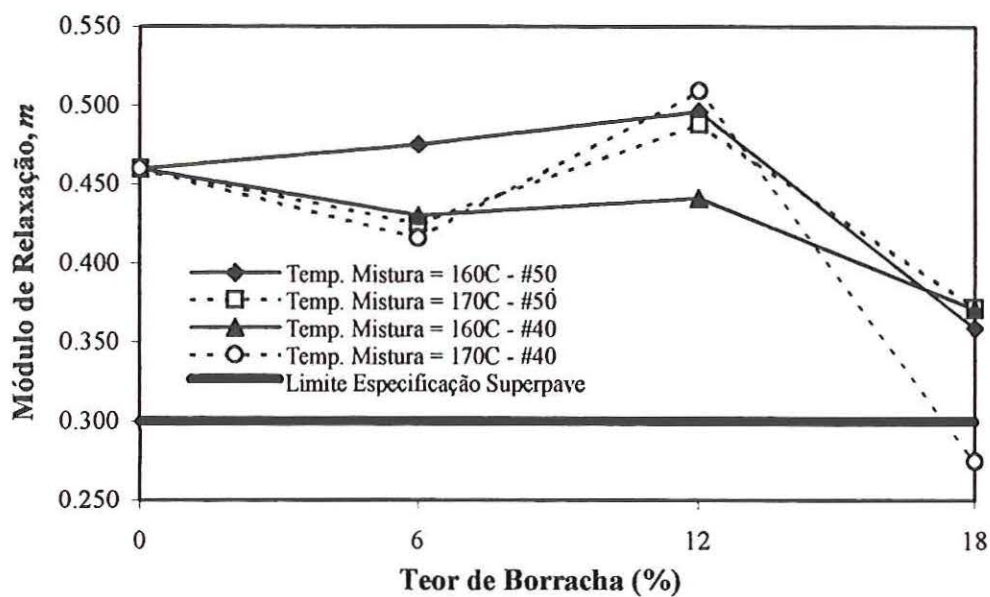


FIGURA 6.16 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica

Pode-se observar pelas Figuras 6.15 e 6.16 que todas as amostras ensaiadas apresentaram valores bem abaixo do limite máximo de rigidez (300 MPa) e que apenas uma amostra com 18% de borracha apresentou valor abaixo do limite mínimo do módulo de relaxação (0,300).

6.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA - MODELOS ESTATÍSTICOS

Apresenta-se a análise dos efeitos dos fatores (teor de borracha, tamanho das partículas e temperatura de mistura) sobre as propriedades do ligante asfalto-borracha, visando identificar os fatores e interações mais significativos e obter modelos de desempenho para o processo em estudo.

Para determinar os modelos estatísticos foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) com os resultados de todos os ensaios. Através do teste *F de Snedecor* verificou-se a significância (99%) dos efeitos dos fatores e as interações dos fatores nas variáveis dependentes.

6.3.1 – TESTES DE SIGNIFICÂNCIA

Geralmente, sabe-se quais os fatores são importantes. O que dificulta as análises de um experimento é a presença de efeitos de fatores não controlados, que podem alterar em muito os resultados. Para evitar que isso ocorra, é necessário verificar se os resultados observados foram produzidos pelos fatores ou por uma mera variação aleatória.

Para aceitar um determinado fator como responsável pelas variações nas respostas de um experimento utilizam-se testes de significância. O nível de significância pode ser interpretado como a probabilidade de que seja nulo o efeito de uma dada variável sobre o modelo. Por exemplo, um nível de significância de 1% indica que a probabilidade de se obter a variação observada, por puro acaso, é de 1%.

Utiliza-se neste trabalho o teste *F de Snedecor*, que compara os valores de quadrados médios ou variâncias (*QM*) segundo a expressão:

$$F = \frac{QM_{\text{tratamento}}}{QM_{\text{resíduo}}} \quad (6.1)$$

Os quadrados médios dos fatores e das interações são obtidos a partir das somas de quadrados (SQ) e dos graus de liberdade (GL), segundo a expressão:

$$QM = \frac{SQ}{GL} \quad (6.2)$$

A determinação do nível de significância de um dado fator ou interação pode ser feita através da comparação do valor do quociente F daquele fator ou interação com um valor limite de F (F_{lim}). Os valores limites de F são apresentados na forma de tabelas e correspondem aos níveis de significância de 25, 10, 5, 1 e 0,1% (BOX *et al.*, 1978).

6.3.2 - CÁLCULO DAS VARIÂNCIAS

O roteiro para o cálculo das variâncias de cada fator e interação é apresentado em seguida e um exemplo de cálculo é apresentado no Anexo D.

a) Soma de Quadrados Total

A soma de quadrados total é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{total} = \sum x^2 - C \quad (6.3)$$

onde:

x = observação

$$C = \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (6.4)$$

n = número de observações

b) Fatores A, B e C

A soma de quadrados da componente linear do Fator A é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{A,l} = \frac{(a_3 - a_1)^2}{r \cdot a'' \cdot b' \cdot c'} \quad (6.5)$$

onde:

a_1 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível inferior

a_3 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível superior

r \equiv número de réplicas

$a'' = \sum c_j = (-1)^2 + (+1)^2 = 2$

b', c' \equiv número de níveis dos fatores b, c

A soma de quadrados da componente quadrática do Fator A é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{A,q} = \frac{(a_1 - 2a_2 + a_3)^2}{r \cdot c'' \cdot a' \cdot b'} \quad (6.6)$$

onde:

a_1 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível inferior

a_2 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível intermediário

a_3 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível superior

$c'' = \sum c_j = (-1)^2 + (-2)^2 + (+1)^2 = 6$

a', b' \equiv número de níveis dos fatores a, b

c) Interação entre os Fatores A, B e C

As somas de quadrados da componente linear das interações podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$SQ_{AB,l} = \frac{(a_3b_2 - a_1b_2 - a_3b_1 + a_1b_1)^2}{r \cdot (ab_1)'' \cdot c'} \quad (6.7)$$

onde:

a_3b_2 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível superior

a_1b_2 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível inferior

a_3b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível superior

a_1b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível inferior

$$(ab)_j'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$SQ_{AB,q} = \frac{(a_3b_2 - 2a_2b_2 + a_1b_2 - a_3b_1 + 2a_2b_1 + a_1b_1)^2}{r.(ab_q)'' . c'} \quad (6.8)$$

onde:

$$(ab_q)'' = \sum c_j = (-1.+1)^2 + (-1.-2)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.+1)^2 + (+1.-2)^2 + (+1.+1)^2 = 12$$

$$SQ_{AC,l} = \frac{(a_3c_2 - a_1c_2 - a_3c_1 + a_1c_1)^2}{r.(ac_1)'' . b'} \quad (6.9)$$

onde:

$a_3c_2 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível superior

$a_1c_2 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível inferior

$a_3c_1 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível superior

$a_1c_1 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível inferior

$$(ac_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$SQ_{AC,q} = \frac{(a_3c_2 - 2a_2c_2 + a_1c_2 - a_3c_1 + 2a_2c_1 + a_1c_1)^2}{r.(ac_q)'' . b'} \quad (6.10)$$

onde:

$$(ac_q)'' = \sum c_j = (-1.+1)^2 + (-1.-2)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.+1)^2 + (+1.-2)^2 + (+1.+1)^2 = 12$$

$$SQ_{BC} = \frac{(b_2c_2 - b_1c_2 - b_2c_1 + b_1c_1)^2}{r.(bc_1)'' . a'} \quad (6.11)$$

onde:

$b_2c_2 \equiv$ somatório das observações em que os fatores B e C estão presentes

$b_1c_2 \equiv$ somatório das observações em que o fator B está presente e o fator C não

$b_2c_1 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator B não

$b_1c_1 \equiv$ somatório das observações em que nem o fator B nem o fator C estão presentes

$$(bc_1)^{**} = \sum c_j = (-1, -1)^2 + (-1, +1)^2 + (+1, -1)^2 + (+1, +1)^2 = 4$$

d) Réplica

$$SQ = \frac{((\sum r_1) - (\sum r_2))^2}{r \cdot a' \cdot b' \cdot c'} \quad (6.12)$$

onde:

$\sum r_1$ \equiv somatório das observações da réplica 1

$\sum r_2$ \equiv somatório das observações da réplica 2

r \equiv número de réplicas

a', b', c' \equiv número de níveis dos fatores a, b, c

Os resultados da análise de variância são apresentados em forma de tabelas (Tabelas 6.17 a 6.32), gráficos e equações.

TABELA 6.17 – Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaios de penetração

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	247	1	247	130,79*
SQ(A _{quadrática})	754	1	754	399,18*
SQ(B)	69	1	69	36,76*
SQ(C)	11	1	11	5,88
SQ(A B)	18	1	18	9,73*
SQ(AqB)	13	1	13	7,07
SQ(A C)	70	1	70	37,08*
SQ(AqC)	268	1	268	142,07*
SQ(BC)	44	1	44	23,53*
Réplica(l)	0	1	0	0,13
Réplica(q)	1	1	1	
Resíduo	43	23	2	
SQtotal	1541	35		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.18 – Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaios de ponto de amolecimento

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	396	1	396,09	316,88*
SQ(A _{quadrática})	4	1	3,78	3,03
SQ(B)	0	1	0,06	0,05
SQ(C)	14	1	14,06	11,25*
SQ(A B)	2	1	2,34	1,88
SQ(AqB)	11	1	11,28	9,03*
SQ(A C)	2	1	2,34	1,88
SQ(AqC)	14	1	13,78	11,03*
SQ(BC)	8	1	7,56	6,05
Réplica(l)	0	1	0,06	
Réplica(q)	8	1	7,56	
Resíduo	29	23	1,25	
SQtotal	488	35		

^aTeste F de Snedecor.

*Significância de 1%.

TABELA 6.19 – Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaios de ponto de fulgor

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	2904	1	2904	129,57*
SQ(A _{quadrática})	1625	1	1625	72,48*
SQ(B)	9	1	9	0,40
SQ(C)	9	1	9	0,40
SQ(A B)	2	1	2	0,07
SQ(AqB)	1458	1	1458	65,05*
SQ(A C)	150	1	150	6,69
SQ(AqC)	41	1	41	1,81
SQ(BC)	9	1	9	0,40
Réplica (l)	1	1	1	
Réplica (q)	1	1	1	
Resíduo	516	23	22	
SQtotal	6723	35		

^aTeste F de Snedecor.

*Significância de 1%.

TABELA 6.20 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: G^* (Pa)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	113683575	1	113683575	363,98*
SQ(A _{quadrática})	2168775	1	2168775	6,94
SQ(B)	63551	1	63551	0,20
SQ(C)	2245428	1	2245428	7,19
SQ(A B)	418933	1	418933	1,34
SQ(AqB)	65343	1	65343	0,21
SQ(A C)	3382841	1	3382841	10,83*
SQ(AqC)	1560605	1	1560605	5,00
SQ(BC)	2544759	1	2544759	8,15
Réplica	406901	1	406901	
Resíduo	4060349	13	312335	
SQtotal	130601060	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.21 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: δ (graus)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	1086	1	1086	2003,78*
SQ(A _{quadrática})	16	1	16	28,66*
SQ(B)	5	1	5	8,66
SQ(C)	5	1	5	8,99
SQ(A B)	1	1	1	2,21
SQ(AqB)	8	1	8	14,95*
SQ(A C)	14	1	14	26,30*
SQ(AqC)	7	1	7	13,19*
SQ(BC)	1	1	1	2,70
Réplica	0	1	0	
Resíduo	7	13	1	
SQtotal	1150	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.22 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	140	1	140	403,26*
SQ(A _{quadrática})	3	1	3	9,22*
SQ(B)	0	1	0	0,20
SQ(C)	3	1	3	9,06
SQ(A B)	0	1	0	1,41
SQ(AqB)	0	1	0	0,35
SQ(A C)	5	1	5	13,74*
SQ(AqC)	2	1	2	6,10
SQ(BC)	3	1	3	8,03
Réplica	0	1	0	
Resíduo	5	13	0	
SQtotal	162	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.23 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: G^* (Pa)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	160579584	1	160579584	186,11*
SQ(A _{quadrática})	533830	1	533830	0,62
SQ(B)	99202	1	99202	0,11
SQ(C)	15477022	1	15477022	17,94*
SQ(A B)	1985281	1	1985281	2,30
SQ(AqB)	164502	1	164502	0,19
SQ(A C)	11943936	1	11943936	13,84*
SQ(AqC)	404434	1	404434	0,47
SQ(BC)	2066827	1	2066827	2,40
Réplica	187090	1	187090	
Resíduo	11216379	13	862798	
SQtotal	204658087	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.24 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: δ (graus)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	1172	1	1172	849,01*
SQ(A _{quadrática})	0	1	0	0,02
SQ(B)	6	1	6	4,23
SQ(C)	17	1	17	12,61*
SQ(A B)	1	1	1	0,71
SQ(AqB)	1	1	1	0,97
SQ(A C)	33	1	33	24,16*
SQ(AqC)	20	1	20	14,82*
SQ(BC)	1	1	1	0,86
Réplica	0	1	0	
Resíduo	18	13	1	
SQtotal	1271	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.25 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: G*/sen δ

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	217	1	217	228,02*
SQ(A _{quadrática})	1	1	1	1,43
SQ(B)	0	1	0	0,01
SQ(C)	16	1	16	16,78*
SQ(A B)	3	1	3	3,33
SQ(AqB)	1	1	1	0,64
SQ(A C)	15	1	15	15,81*
SQ(AqC)	1	1	1	1,53
SQ(BC)	2	1	2	2,44
Réplica	0	1	0	
Resíduo	12	13	1	
SQtotal	269	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.26 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: G*

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	14120685062500	1	14120685062500	245,59*
SQ(A _{quadrática})	1508397520833	1	1508397520833	26,23*
SQ(B)	393728166667	1	393728166667	6,85
SQ(C)	277350000000	1	277350000000	4,82
SQ(AIB)	450576562500	1	450576562500	7,84
SQ(AqB)	238520833	1	238520833	0,00
SQ(AIC)	2788065062500	1	2788065062500	48,49*
SQ(AqC)	1427265187500	1	1427265187500	24,82*
SQ(BC)	143221500000	1	143221500000	2,49
Réplica	112666667	1	112666667	
Resíduo	747469083333	13	57497621795	
SQtotal	21857109333333	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.27 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: δ (graus)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	79	1	79	108,66*
SQ(A _{quadrática})	0	1	0	0,01
SQ(B)	0	1	0	0,21
SQ(C)	8	1	8	11,67*
SQ(AIB)	1	1	1	0,79
SQ(AqB)	1	1	1	0,75
SQ(AIC)	6	1	6	7,69
SQ(AqC)	0	1	0	0,23
SQ(BC)	10	1	10	14,08*
Réplica	2	1	2	
Resíduo	9	13	1	
SQtotal	116	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.28 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: $G^* \text{sen } \delta$

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	12886305	1	12886305	259,37*
SQ(A _{quadrática})	88838	1	88838	1,79
SQ(B)	60200	1	60200	1,21
SQ(C)	877838	1	877838	17,67*
SQ(A B)	264453	1	264453	5,32
SQ(AqB)	171244	1	171244	3,45
SQ(A C)	1176683	1	1176683	23,68*
SQ(AqC)	356558	1	356558	7,18
SQ(BC)	190104	1	190104	3,83
Réplica	122	1	122	
Resíduo	645888	13	49684	
SQtotal	16718231	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.29 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios de viscosidade aparente (Brookfield) – 175°C

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	1759604	1	1759604	1045,40*
SQ(A _{quadrática})	66533	1	66533	39,53*
SQ(B)	40993	1	40993	24,35*
SQ(C)	265740	1	265740	157,88*
SQ(A B)	163565	1	163565	97,18*
SQ(AqB)	171766	1	171766	102,05*
SQ(A C)	229028	1	229028	136,07*
SQ(AqC)	12020	1	12020	7,14
SQ(BC)	71164	1	71164	42,28*
Réplica(l)	265	1	265	
Réplica(q)	0	1	0	
Resíduo	38713	23	1683	
SQtotal	2819393	35		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.30 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios de viscosidade aparente (Brookfield) – 135°C

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	57958916	1	57958916	1233,59*
SQ(A _{quadrática})	3136803	1	3136803	66,76*
SQ(B)	9203	1	9203	0,20
SQ(C)	7511619	1	7511619	159,88*
SQ(A B)	122651	1	122651	2,61
SQ(AqB)	410977	1	410977	8,75*
SQ(A C)	8489105	1	8489105	180,68*
SQ(AqC)	1547891	1	1547891	32,95*
SQ(BC)	2340390	1	2340390	49,81*
Réplica(l)	0	1	0	
Réplica(q)	20986	1	20986	
Resíduo	1080632	23	46984	
SQtotal	82629173	35		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.31 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios do BBR – valores de S

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	4858	1	4858	1005,49*
SQ(A _{quadrática})	52	1	52	10,69*
SQ(B)	39	1	39	7,97
SQ(C)	141	1	141	29,21*
SQ(A B)	70	1	70	14,43*
SQ(AqB)	62	1	62	12,76*
SQ(A C)	0	1	0	0,03
SQ(AqC)	162	1	162	33,54*
SQ(BC)	100	1	100	20,71*
Réplica	0	1	0	
Resíduo	63	13	5	
SQtotal	5546	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.32 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios do BBR – valores de m

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	0,03	1	0,03	46,93*
SQ(A _{quadrática})	0,05	1	0,05	62,24*
SQ(B)	0,01	1	0,01	7,00
SQ(C)	0,00	1	0,00	1,83
SQ(A B)	0,00	1	0,00	0,27
SQ(AqB)	0,00	1	0,00	0,62
SQ(A C)	0,00	1	0,00	0,09
SQ(AqC)	0,01	1	0,01	8,24
SQ(BC)	0,00	1	0,00	0,01
Réplica	0,00	1	0,00	
Resíduo	0,01	13	0,00	
SQtotal	0,10	23	0,00	

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

6.3.3 – ANÁLISE DE REGRESSÃO

A análise de variância de um experimento fatorial permite não só a identificação de fatores significativos, mas também o desenvolvimento de modelos de regressão, que relacionam quantitativamente os fatores significativos (variáveis independentes x_i) com a resposta do sistema (variável dependente Y).

Com base na soma de quadrados (SQ) de cada fator ou interação, pode-se quantificar a contribuição de cada termo e também obter seus efeitos de ordem $n-1$, onde n é o número de níveis do fator em questão. Por exemplo, fatores com três níveis podem contribuir com até dois termos para a equação de regressão, um linear e outro quadrático. Um modelo de regressão múltipla é apresentado em seguida:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_{B,l}.P_1(B) + \alpha_{B,q}.P_q(B) + \alpha_P.P_1(P) + \alpha_T.P_1(T) + \alpha_{BP,l}.P_1(B).P_1(P) + \alpha_{BP,q}.P_q(B).P_1(P) + \alpha_{BT,l}.P_1(B).P_1(T) + \alpha_{BT,q}.P_q(B).P_1(T) + \alpha_{BT}.P_1(P).P_1(T) \quad (6.13)$$

onde:

Y = variável dependente

B, P, T = fatores considerados, respectivamente, Teor de Borracha, Tamanho das Partículas e Temperatura da Mistura;

$$\alpha_0 = \Sigma x / n$$

Σx = somatório de todas as observações

n = número de observações

$\alpha_{B,l}$ = coeficiente correspondente ao fator B, termo linear

$\alpha_{B,q}$ = coeficiente correspondente ao fator B, termo quadrático

α_P = coeficiente correspondente ao fator P

α_T = coeficiente correspondente ao fator T

$\alpha_{BP,l}$ = coeficiente correspondente à interação BP_l

$\alpha_{BP,q}$ = coeficiente correspondente à interação BP_q

$\alpha_{BT,l}$ = coeficiente correspondente à interação BT_l

$\alpha_{BT,q}$ = coeficiente correspondente à interação BT_q

α_{BT} = coeficiente correspondente à interação BT

$P_1(B)$ = equação polinomial linear do fator teor de borracha, B (em %):

$$P_1(B) = \frac{B - 12}{6}$$

$P_q(B)$ = equação polinomial quadrática do fator teor de borracha, B (em %):

$$P_q(B) = 3x \left[\frac{(B - 12)^2}{6} - \frac{2}{3} \right]$$

$P(P)$ = equação polinomial do fator tamanho das partículas, P (-1 for # 50, +1 for # 40);

$$P(P) = \pm 1$$

$P(T)$ = equação polinomial do fator temperatura de mistura, T (°C)

$$P(T) = \frac{T - 165}{5}$$

A constante α_0 é o valor médio, ou seja, a somatória dos resultados de todos os ensaios realizados divididos pelo número de resultados de ensaios (igual ao número de combinações de cada fator vezes o número de réplicas).

Considerando-se:

$$P_1(B) = B_1$$

$$P_q(B) = B_q$$

$$P(P) = P$$

$$P(T) = T$$

e substituindo na equação geral (6.13), tem-se:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_{B_1} B_1 + \alpha_{B_q} B_q + \alpha_P P + \alpha_T T + \alpha_{BP_1} B_1 P + \alpha_{BP_q} B_q P + \alpha_{BT_1} B_1 T + \alpha_{BT_q} B_q T + \alpha_{TC} P T \quad (6.14)$$

A partir das somas de quadrados dos fatores e interações significativos é possível também, calcular o coeficiente de determinação (R^2) do modelo utilizando-se a seguinte expressão:

$$R^2 = \frac{SQ_{\text{modelo}}}{SQ_{\text{total}}} = \frac{\sum SQ_i}{SQ_{\text{total}}} \quad (6.15)$$

onde: SQ_i = soma de quadrados dos fatores presentes na equação de regressão

Os modelos estatísticos obtidos, que representam os efeitos dos fatores (teor e tamanho das partículas de borracha e temperatura de mistura) sobre o comportamento das misturas asfalto-borracha com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), são apresentados a seguir:

a) Penetração (1/10 mm)

$$Y = 44,6 + 3,2B_1 - 3,2B_q - 1,4P - 0,6B_1P + 1,7B_1T + 1,9B_qT + 1,1PT$$

$$R^2 = 0,96$$

b) Ponto de Amolecimento ($^{\circ}\text{C}$)

$$Y = 58,0 + 4,1B_1 - 0,6T + 0,4B_qP - 0,4B_qT$$

$$R^2 = 0,89$$

c) Ponto de Fulgor ($^{\circ}\text{C}$)

$$Y = 292,5 + 11,0B_1 - 4,8B_q + 4,5B_qP$$

$$R^2 = 0,89$$

d) Módulo de Cisalhamento Complexo, G^* (Pa), antes do envelhecimento

$$Y = 5176,4 + 2665,6B_1 - 459,8B_1T$$

$$R^2 = 0,90$$

e) Ângulo de Fase, δ (graus), antes do envelhecimento

$$Y = 76,5 - 8,2B_1 + 0,6B_q + 0,4B_qP + 0,9B_1T + 0,4B_qT$$

$$R^2 = 0,98$$

f) $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa), antes do envelhecimento

$$Y = 5,4 + 3,0B_1 + 0,3B_q - 0,6B_1T$$

$$R^2 = 0,92$$

g) Módulo de Cisalhamento Complexo, G^* (Pa), após envelhecimento de curto prazo

$$Y = 7306,3 + 3168,0B_1 + 803,0T - 864,0B_1T$$

$$R^2 = 0,92$$

h) Ângulo de Fase, δ (graus), após envelhecimento de curto prazo

$$Y = 73,4 - 8,6B_1 - 0,9T + 1,4B_1T + 0,7B_qT$$

$$R^2 = 0,98$$

i) $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa), após envelhecimento de curto prazo

$$Y = 7,8 + 3,7B_1 + 0,8T - 1,0B_1T$$

$$R^2 = 0,92$$

j) Módulo de Cisalhamento Complexo, G^* (Pa), após envelhecimento de longo prazo

$$Y = 2175070,8 - 1153831,3B_1 + 112472,9B_q + 204418,8B_1P + 446331,2B_1T + \\ - 169472,9B_qT$$

$$R^2 = 0,96$$

k) Ângulo de Fase, δ (graus), após envelhecimento de longo prazo

$$Y = 49,5 - 2,7B_1 + 0,5PT$$

$$R^2 = 0,90$$

l) $G^* \cdot \sin \delta$ (kPa), após envelhecimento de longo prazo

$$Y = 1680,0 - 940,4B_1 + 93,3B_q + 167,1B_1P + 315,5B_1T - 124,0B_qT$$

$$R^2 = 0,96$$

m) Viscosidade Brookfield (cP) – 175°C

$$Y = 367,2 + 270,8B_1 + 30,4B_q - 33,7P - 85,9T - 82,6B_1P - 48,8B_qP + \\ - 97,7B_1T - 44,5PT$$

$$R^2 = 0,98$$

n) Viscosidade Brookfield (cP) – 135°C

$$Y = 2279,7 + 1554,0B_1 + 208,7B_q - 456,8T - 75,6B_qP - 594,7B_1T + \\ - 146,6 B_qT - 255,0PT$$

$$R^2 = 0,99$$

o) Rigidez à Fluência na Flexão – S

$$Y = 33,2 - 17,4B_1 + 1,0B_q - 2,4T - 2,1B_1P + 1,1B_qP - 1,8B_qT + 2,0PT$$

$$R^2 = 0,98$$

p) Rigidez à Fluência na Flexão – valor de m

$$Y = 0,4 - 0,05B_1 - 0,03B_q$$

$$R^2 = 0,78$$

6.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.4.1 - EFEITOS DOS PARÂMETROS NAS PROPRIEDADES DOS ASFALTO-BORRACHA

a) Ponto de Amolecimento

As Figuras 6.17 a 6.20, obtidas dos modelos estatísticos desenvolvidos no item 6.3, apresentam os efeitos do teor de borracha, da temperatura de mistura e da granulometria da borracha sobre o ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.

Os gráficos procuram ilustrar os efeitos dos fatores significativos na análise estatística. As linhas tracejadas representam o prolongamento das funções estatísticas, desenvolvidas com os teores de 6, 12 e 18%, até os pontos utilizados para controle, correspondentes a resultados efetivamente obtidos nos ensaios (teores de borracha de 0 e 24%).

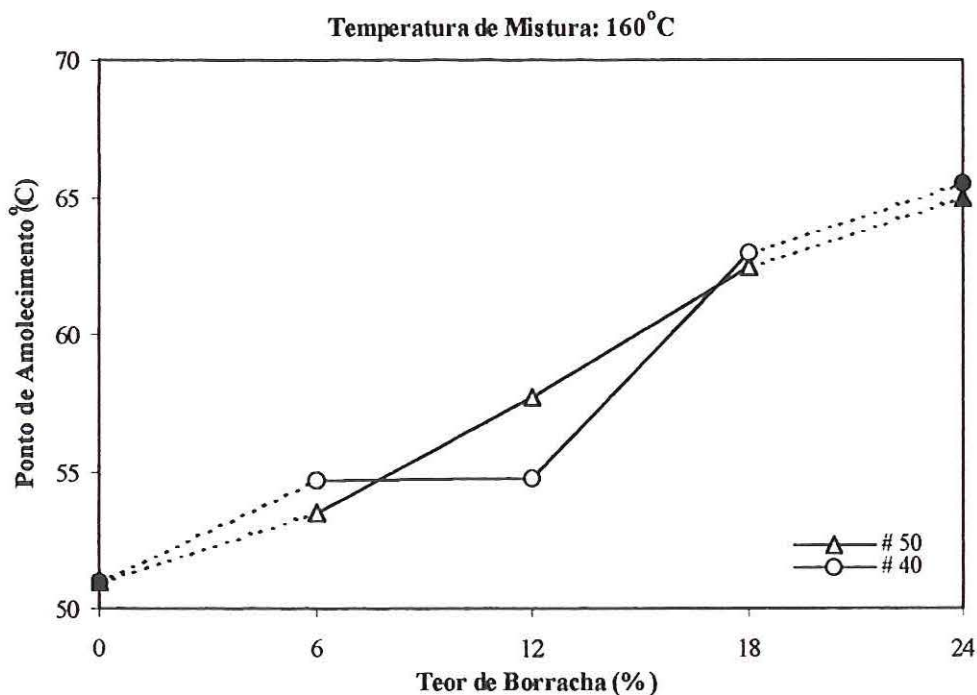


FIGURA 6.17 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

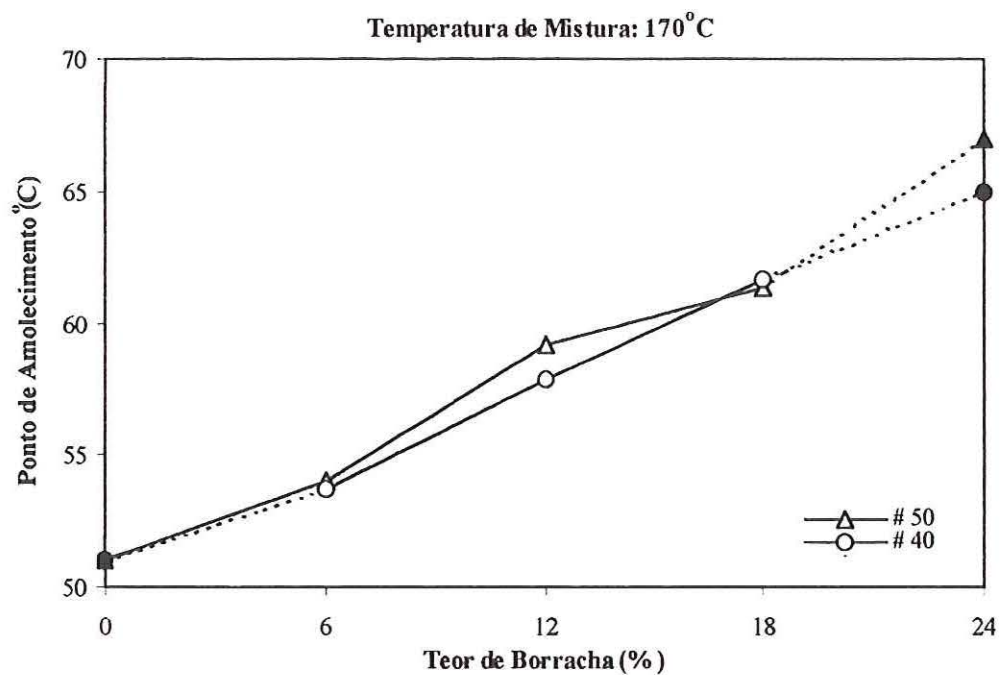


FIGURA 6.18 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

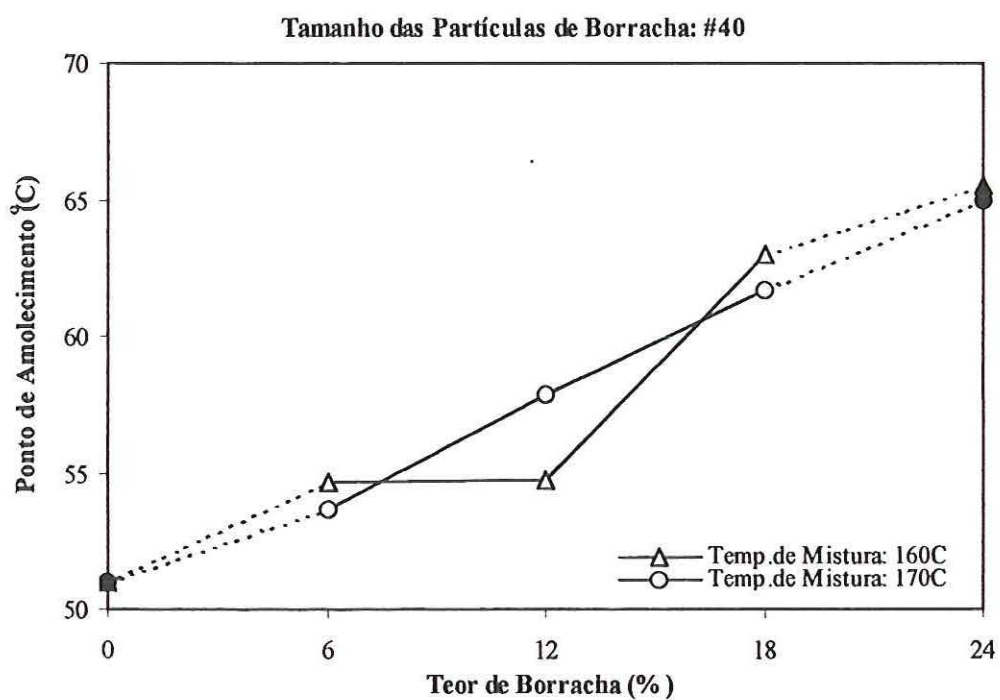


FIGURA 6.19 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

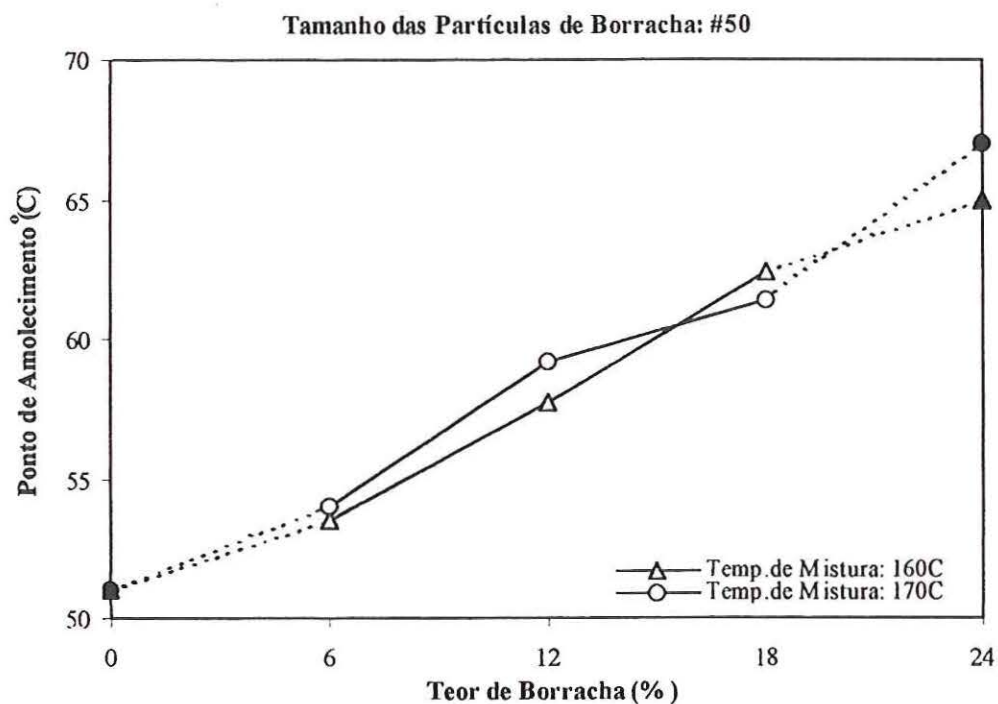


FIGURA 6.20 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

O ponto de amolecimento é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha.

Não há uma tendência definida sobre os efeitos da temperatura de mistura e do tamanho das partículas. Ou seja, o entrecruzamento das curvas mostra que os efeitos do aumento da temperatura de mistura ou da diminuição do tamanho das partículas não são os mesmos para todos os teores de borracha.

b) Ponto de Fulgor

A Figura 6.21 apresenta os efeitos do teor de borracha, da temperatura de mistura e da granulometria da borracha sobre o ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha.

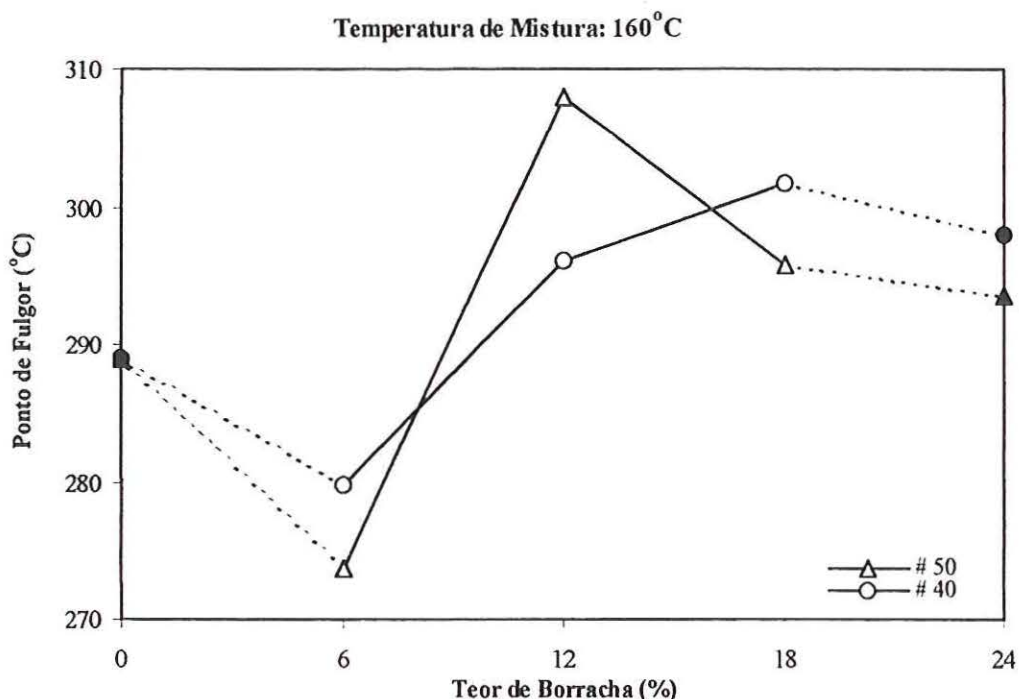


FIGURA 6.21 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha

Observa-se um comportamento oscilante sem um efeito característico dos fatores, podendo-se no máximo admitir que há um aumento do ponto de fulgor em função do teor de borracha. A razão mais provável para a enorme dispersão nos resultados é a película que se formava na superfície do asfalto-borracha durante a realização do ensaio.

c) Penetração

O comportamento previsto é que a adição de borracha torna o ligante mais viscoso, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento do teor de borracha nas misturas. Os resultados obtidos, no entanto, mostram que a penetração aumenta até um teor de 12%, estabilizando ou diminuindo para os teores de 18 e 24 % de borracha. Resultados semelhantes já haviam sido obtidos por outros pesquisadores, como HEIZTMAN (1992b). As Figuras 6.22 a 6.25 apresentam os efeitos dos fatores sobre a penetração do ligante asfalto-borracha.

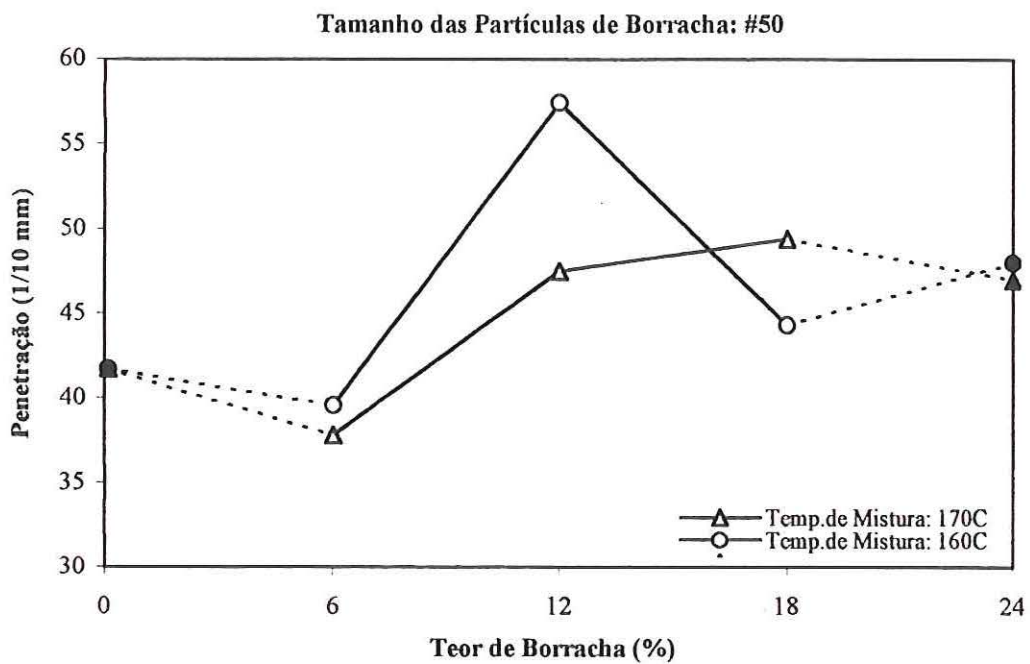


FIGURA 6.22 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha

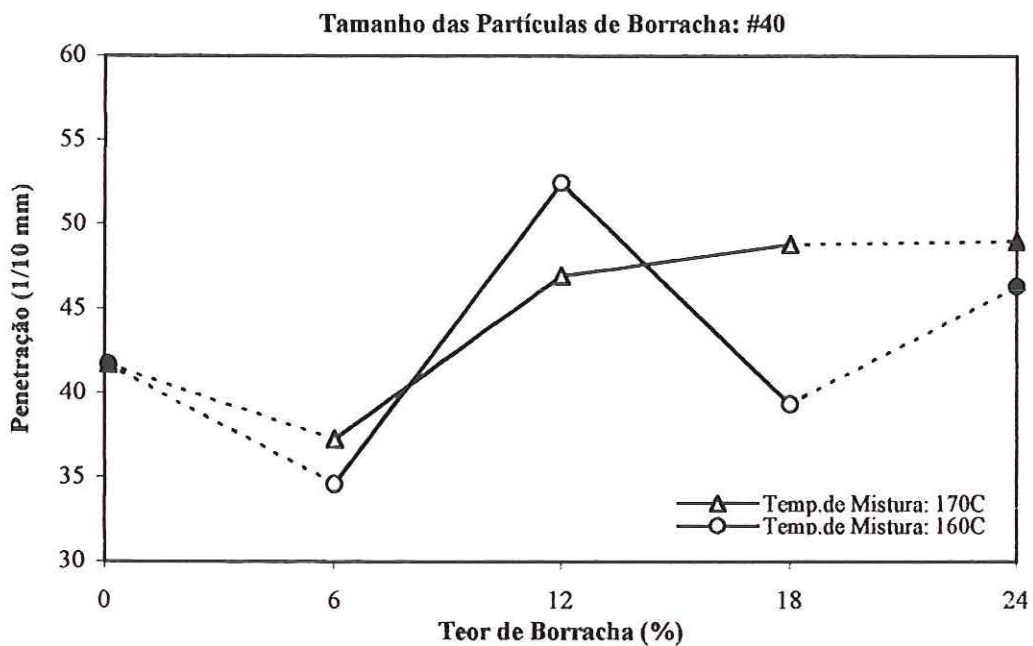


FIGURA 6.23 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha

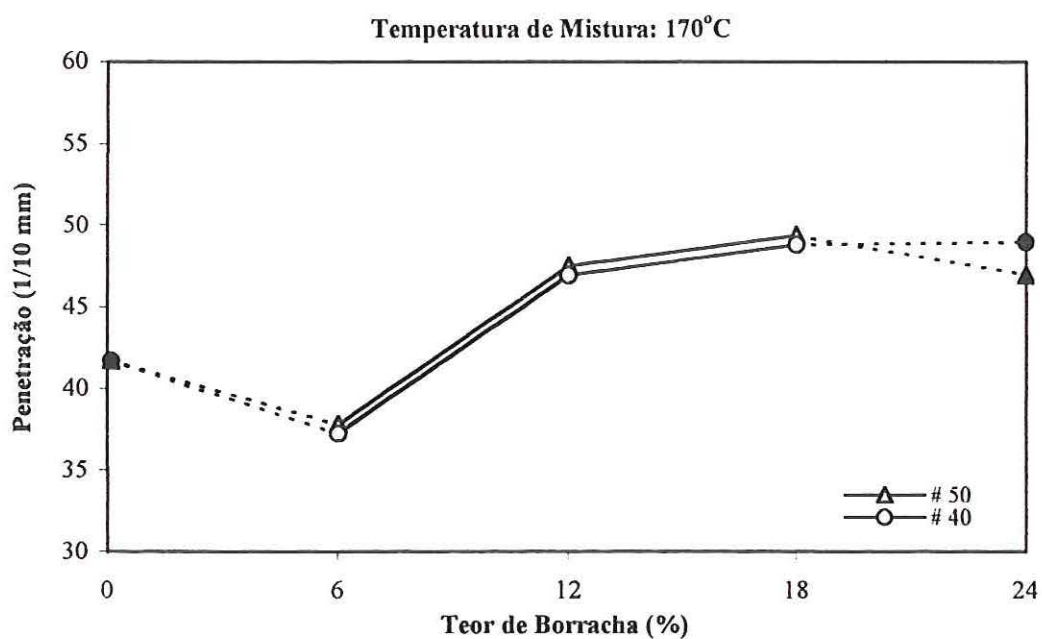


FIGURA 6.24 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha

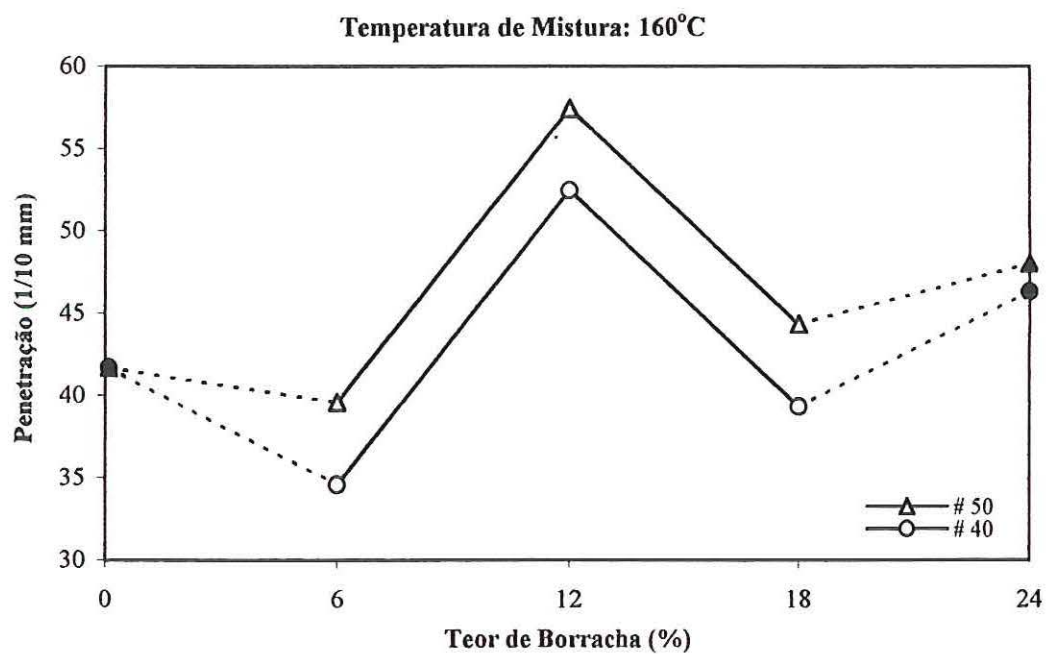


FIGURA 6.25 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha

Observa-se que a mistura com borracha mais grossa (#40) tende a apresentar menor penetração (Figuras 6.24 e 6.25). O efeito da temperatura de mistura (Figuras 6.22 e 6.23), por outro lado, não é constante com o aumento do teor de borracha.

d) Viscosidade Brookfield

As Figuras 6.26 a 6.29 apresentam os efeitos dos fatores sobre a viscosidade Brookfield a 175°C, enquanto as Figuras 6.30 a 6.34 apresentam a viscosidade Brookfield a 135°C. A viscosidade aparente, a 175°C, aumenta com o teor de borracha. A temperatura de mistura de 160°C resulta em maior viscosidade, enquanto o efeito da granulometria não é constante para todos os teores de borracha.

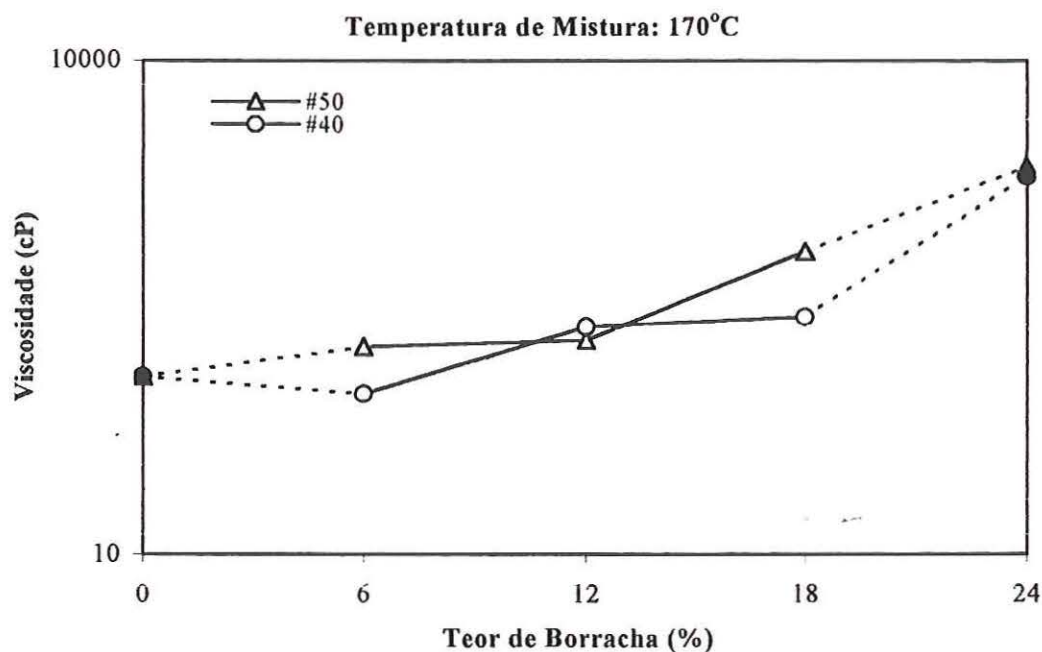


FIGURA 6.26 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

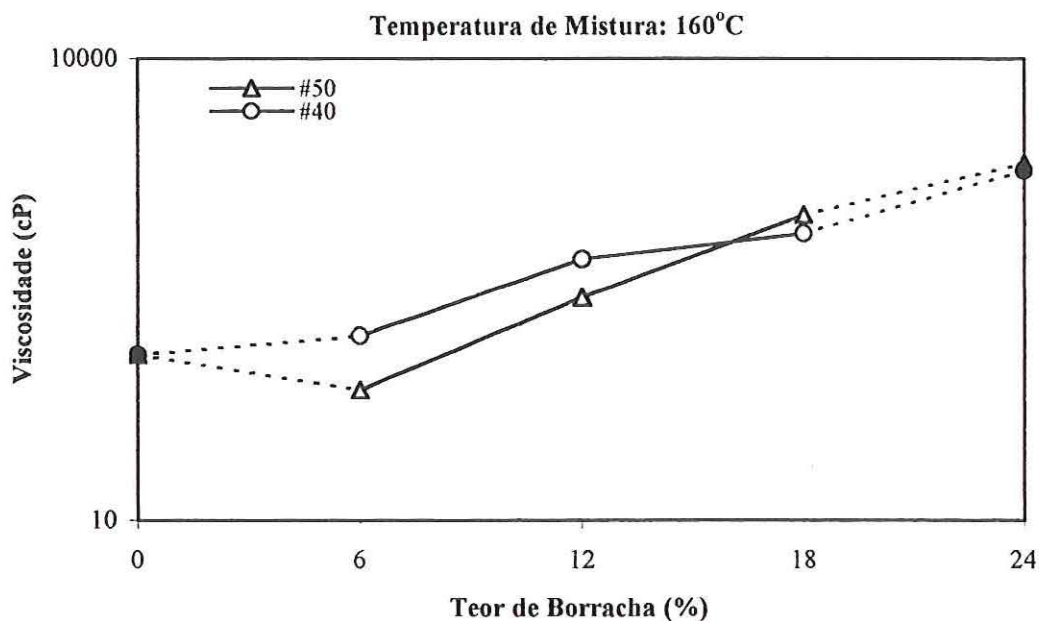


FIGURA 6.27 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

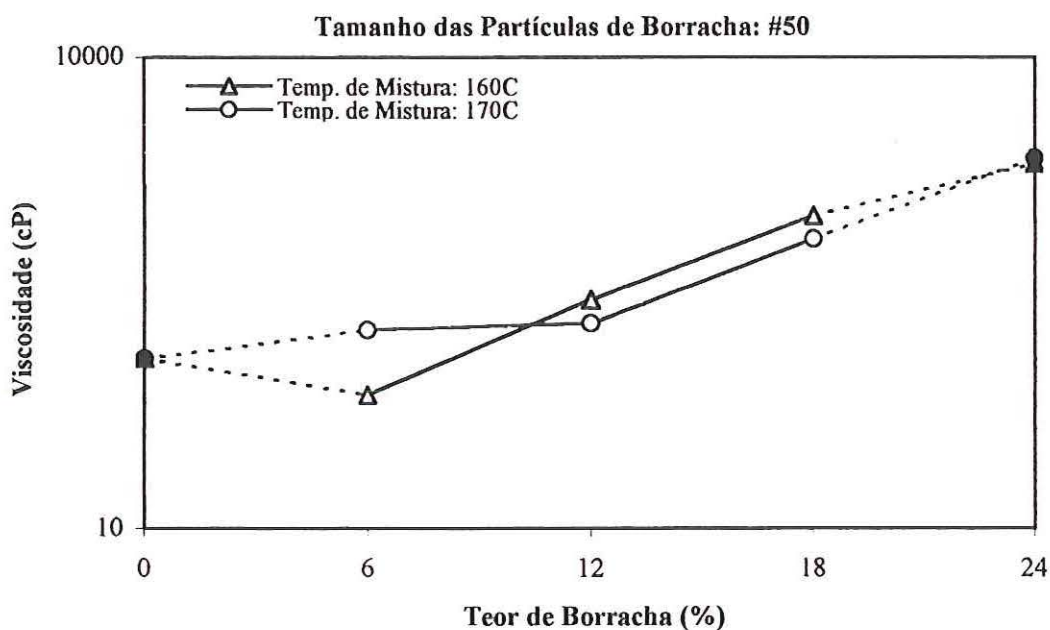


FIGURA 6.28 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C



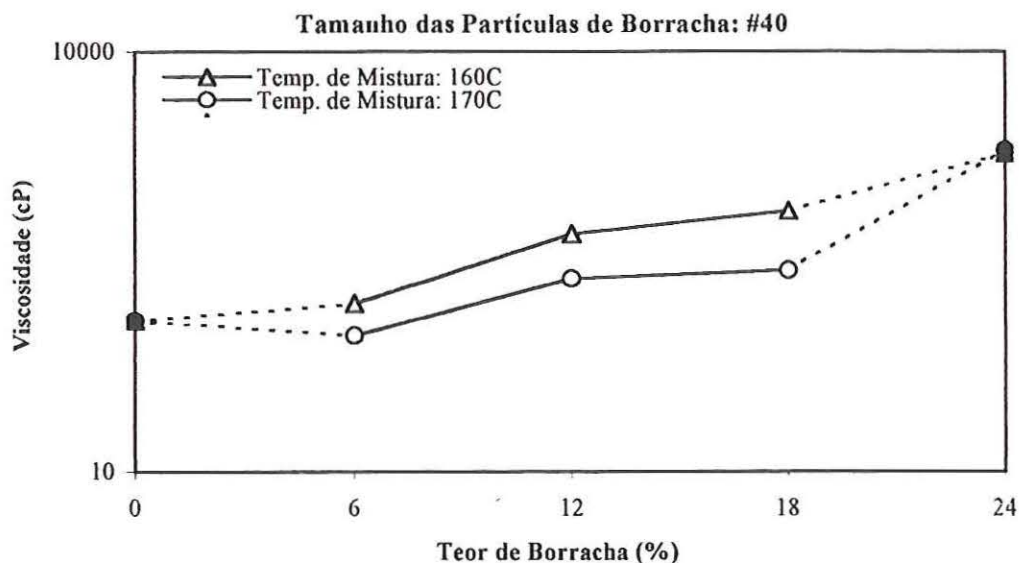


FIGURA 6.29 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

Há um aumento, esperado, da viscosidade com o teor de borracha. A viscosidade, para os teores de 6 e 12%, é maior para temperatura de mistura de 160°C (Figuras 6.27 e 6.29). Para partículas com maior tamanho (#40), a viscosidade é maior quando a temperatura de mistura é menor (Figuras 6.27 e 6.29).

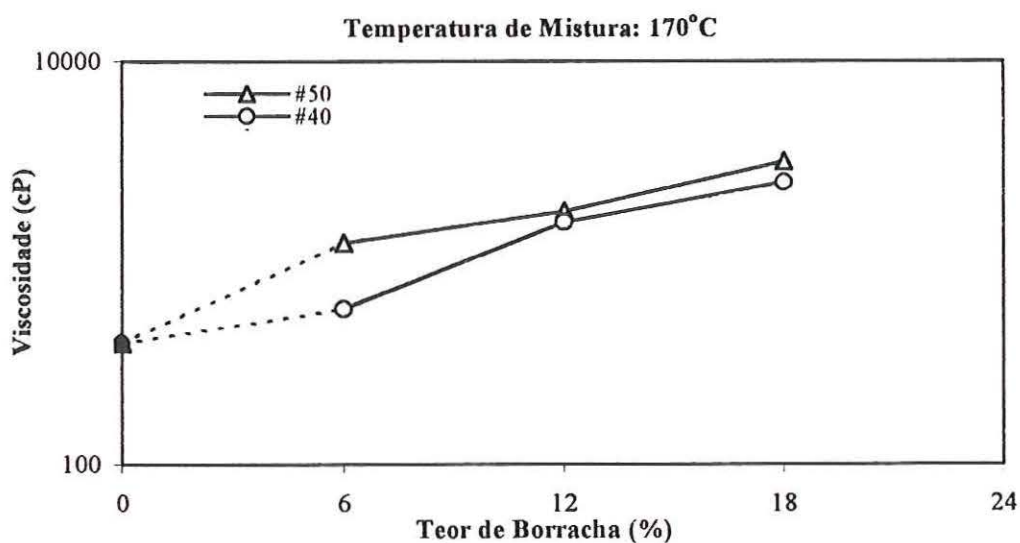


FIGURA 6.30 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

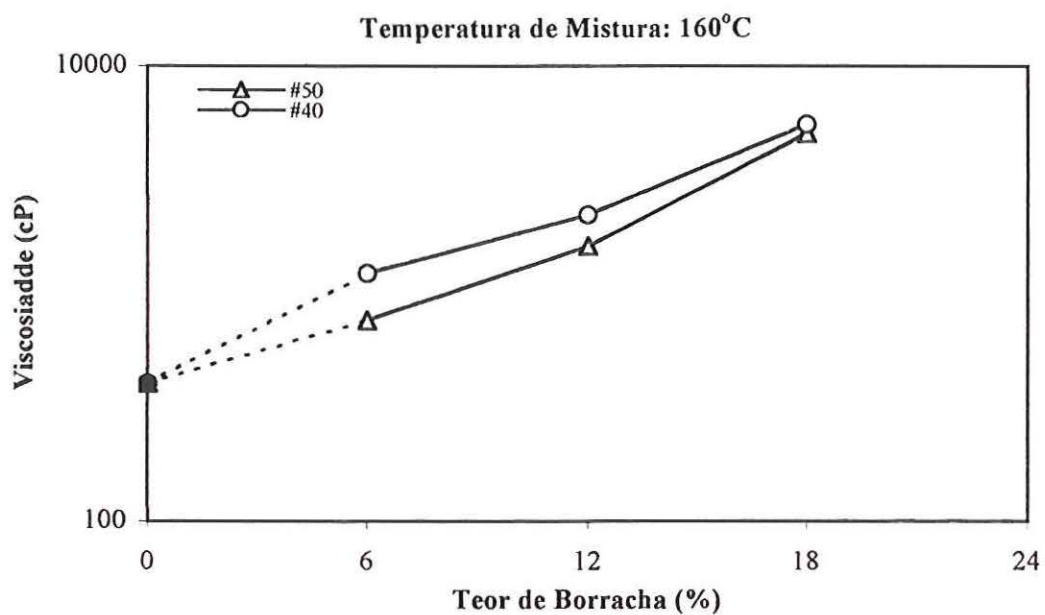


FIGURA 6.31 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

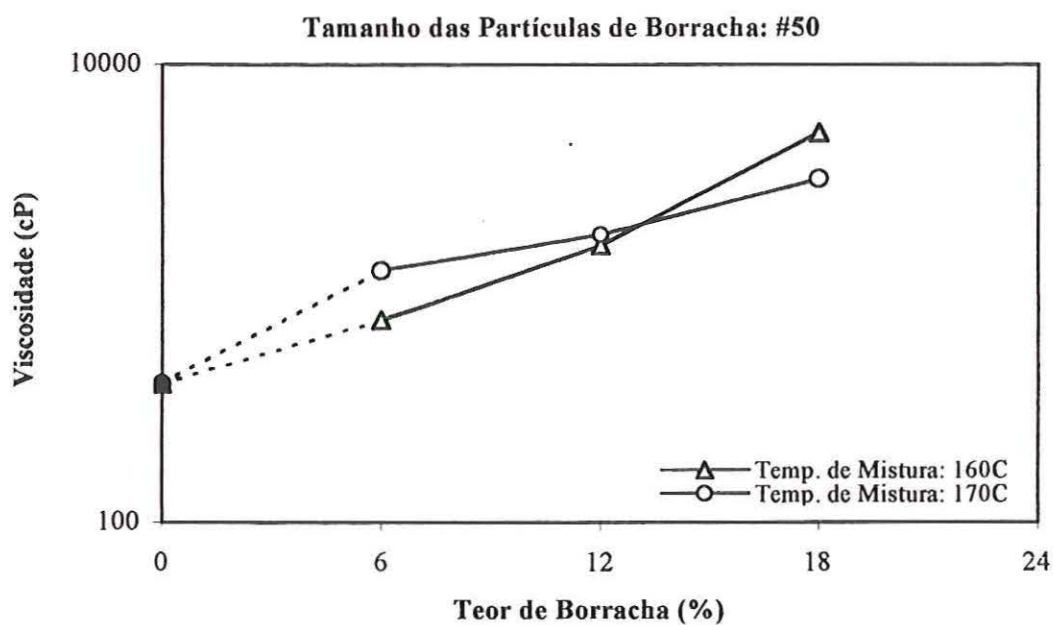


FIGURA 6.32 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

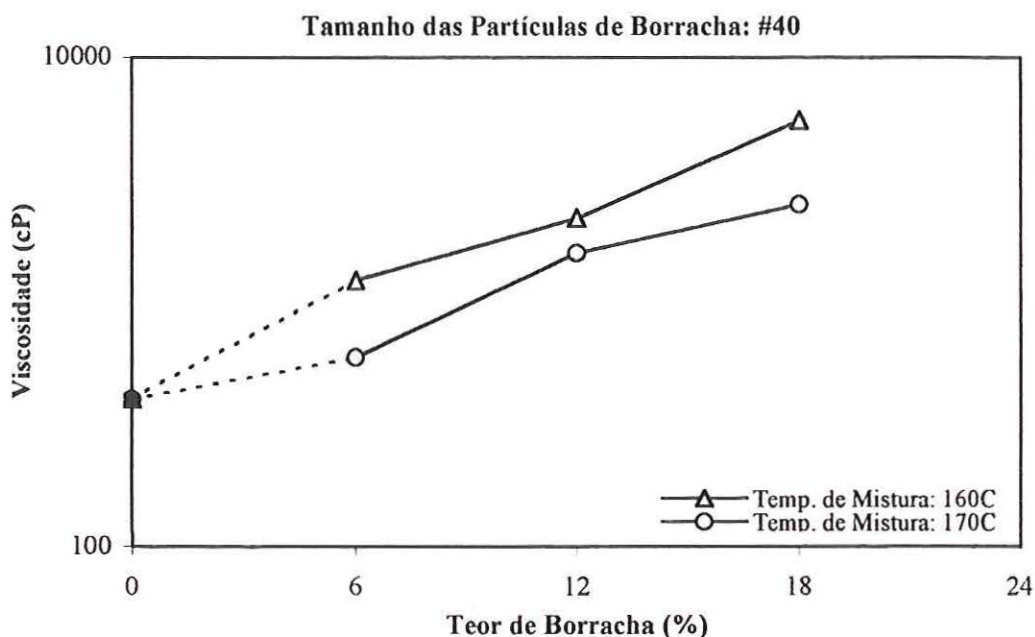


FIGURA 6.33 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

Há um aumento da viscosidade com o teor de borracha, sendo que o ligante asfalto-borracha produzido a uma temperatura de mistura de 170°C com partículas de borracha menores (#50) é mais viscoso (Figura 6.30), ocorrendo o inverso com o ligante produzido a uma temperatura de 160°C, em que a viscosidade é maior para as partículas de borracha maiores (Figura 6.31).

e) Cisalhamento Dinâmico antes do Envelhecimento

Os resultados do reômetro de cisalhamento dinâmico para amostras não envelhecidas, apresentados nas Figuras 6.6 a 6.8, mostram que a resistência ao acúmulo de deformação permanente aumenta em função do teor de borracha. Há um aumento do módulo de cisalhamento complexo, G^* (Figura 6.34), e uma redução do ângulo de fase, δ , com o aumento do teor de borracha (Figuras 6.35 a 6.38), mas não há um efeito característico dos fatores temperatura de mistura e tamanho das partículas de borracha.

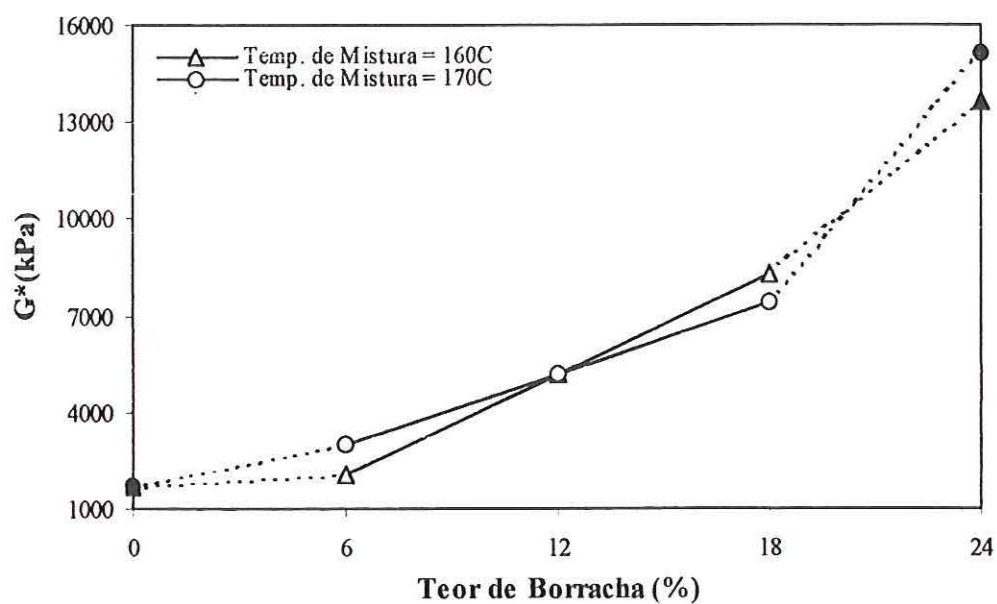


FIGURA 6.34 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

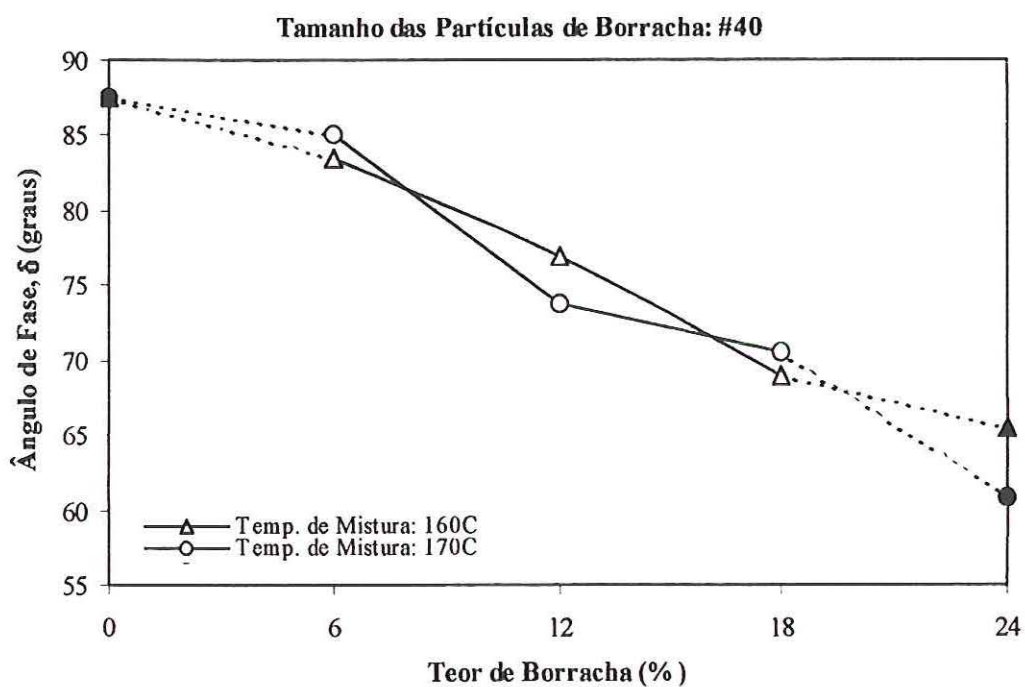


FIGURA 6.35 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

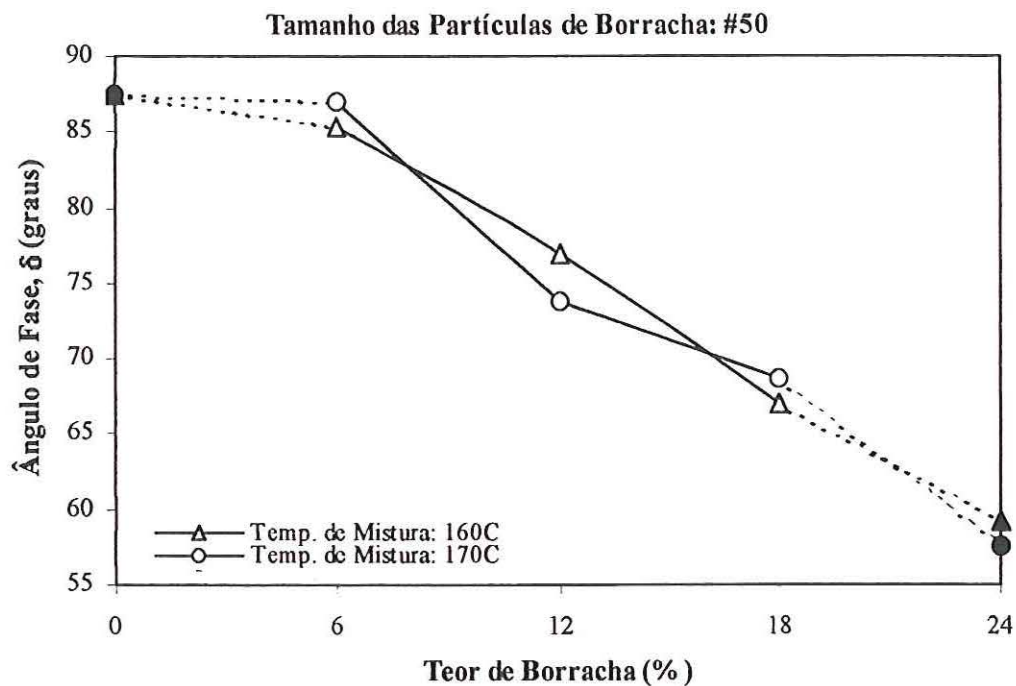


FIGURA 6.36 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

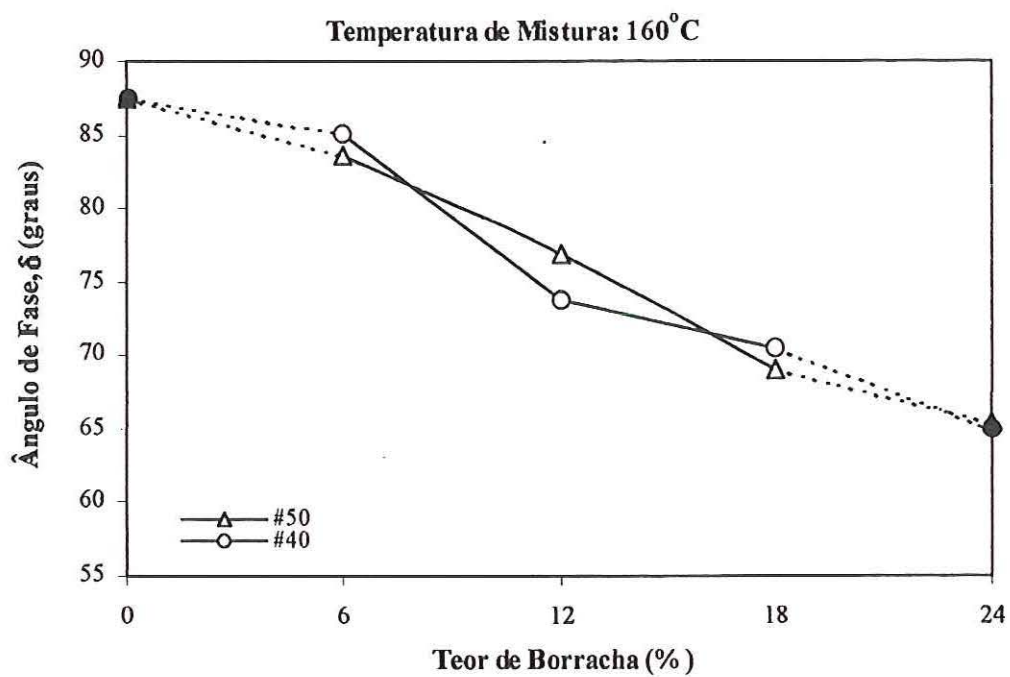


FIGURA 6.37 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

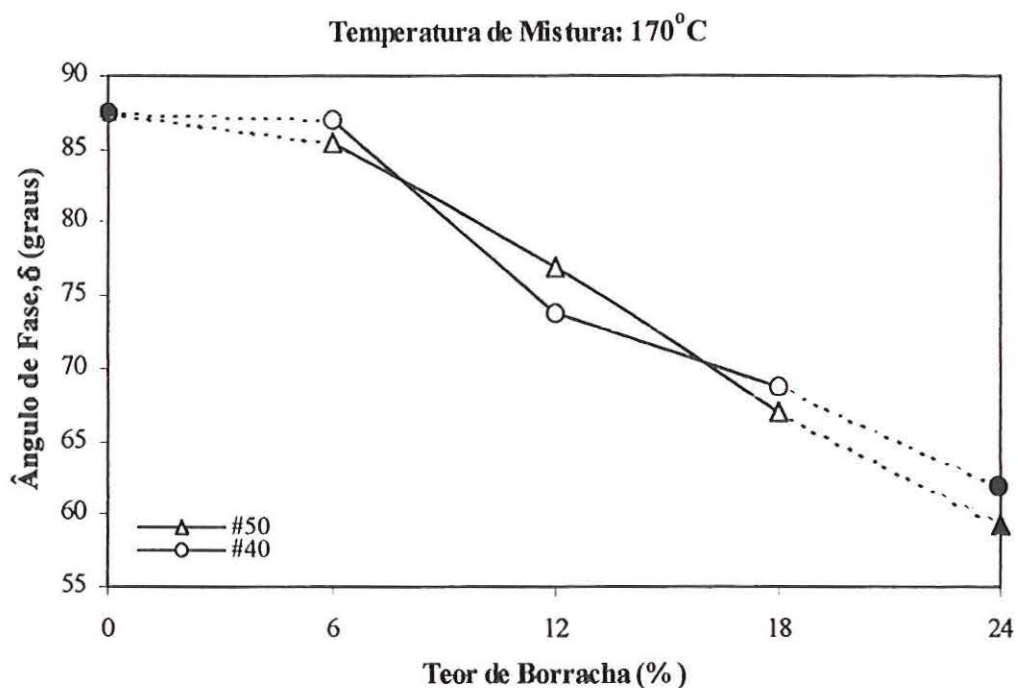


FIGURA 6.38 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

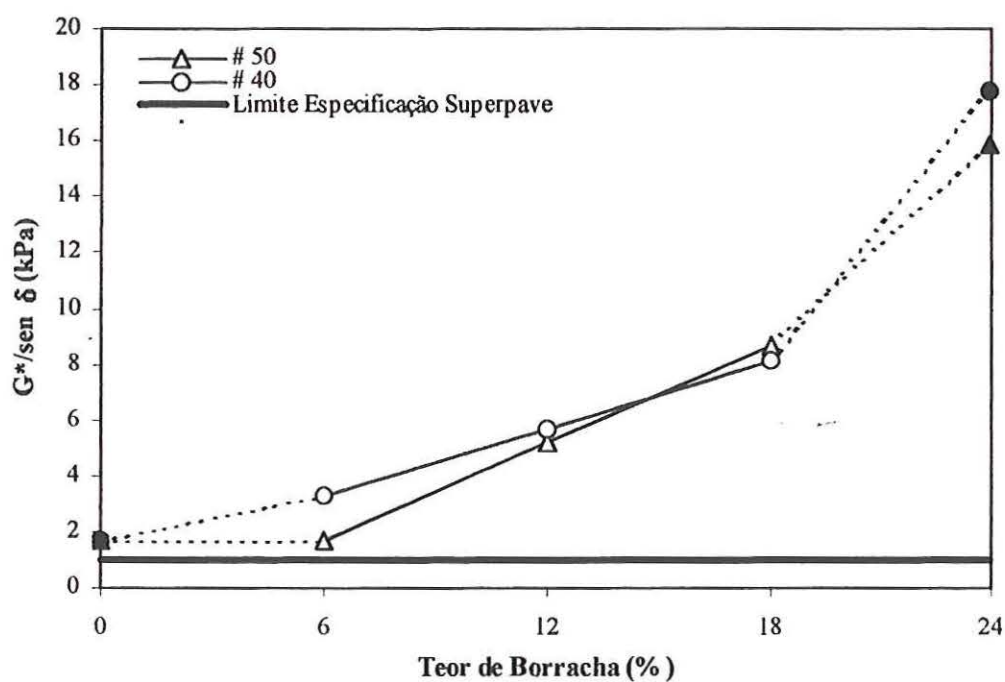


FIGURA 6.39 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

f) Cisalhamento Dinâmico após Envelhecimento de Curto Prazo

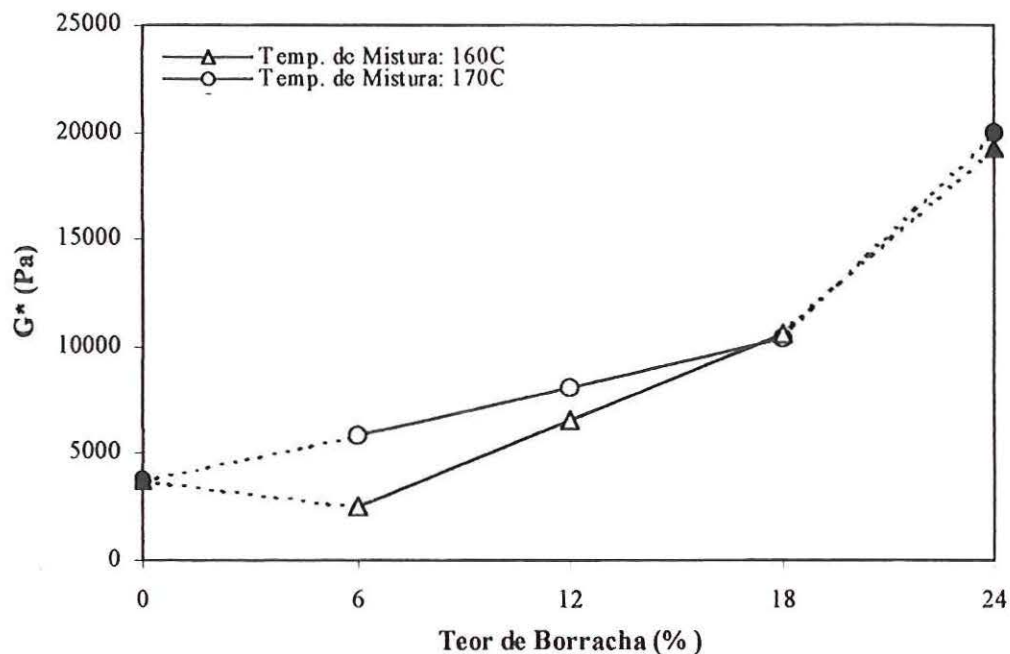


FIGURA 6.40 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo

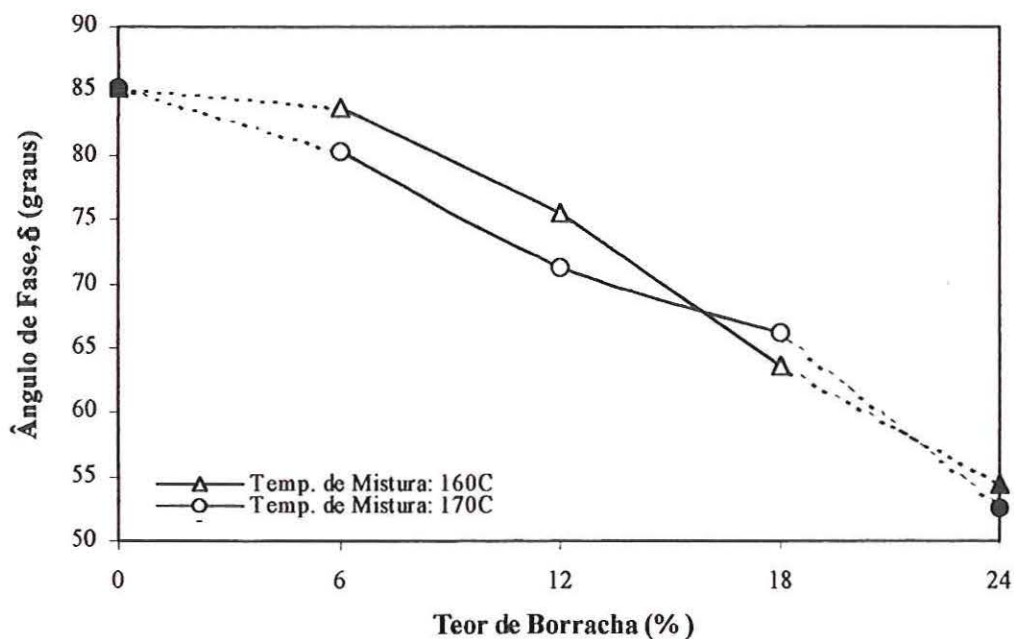


FIGURA 6.41 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo

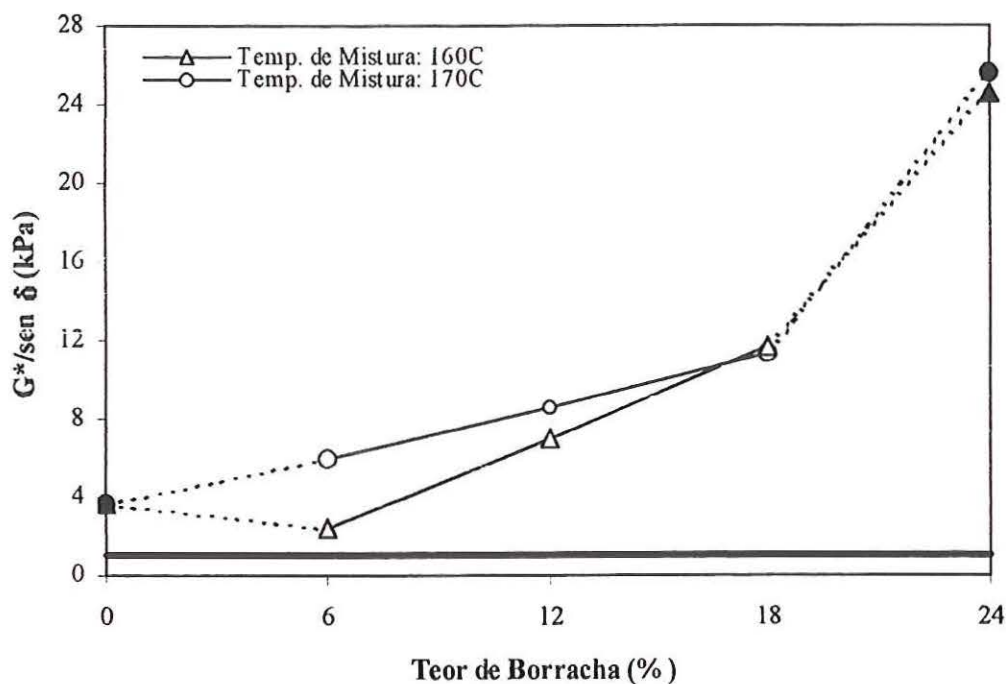


FIGURA 6.42 - Efeito do teor de ligante nas resistências à deformação permanente do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo

Os resultados da análise de variância do ensaio DSR (G^* , δ e $G^*/\text{sen}\delta$) do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo mostra que o tamanho das partículas não exerce influência no comportamento do ligante asfalto-borracha e apenas o teor de borracha e a temperatura de mistura são incluídos no modelo estatístico.

Há um aumento do módulo de cisalhamento dinâmico (Figura 6.40) e uma diminuição do ângulo de fase (Figura 6.41) com o aumento do teor de borracha, sendo que no intervalo de 6 a 18% o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ é menor para menores temperaturas de mistura (Figura 6.42).

g) Cisalhamento Dinâmico após Envelhecimento de Longo Prazo

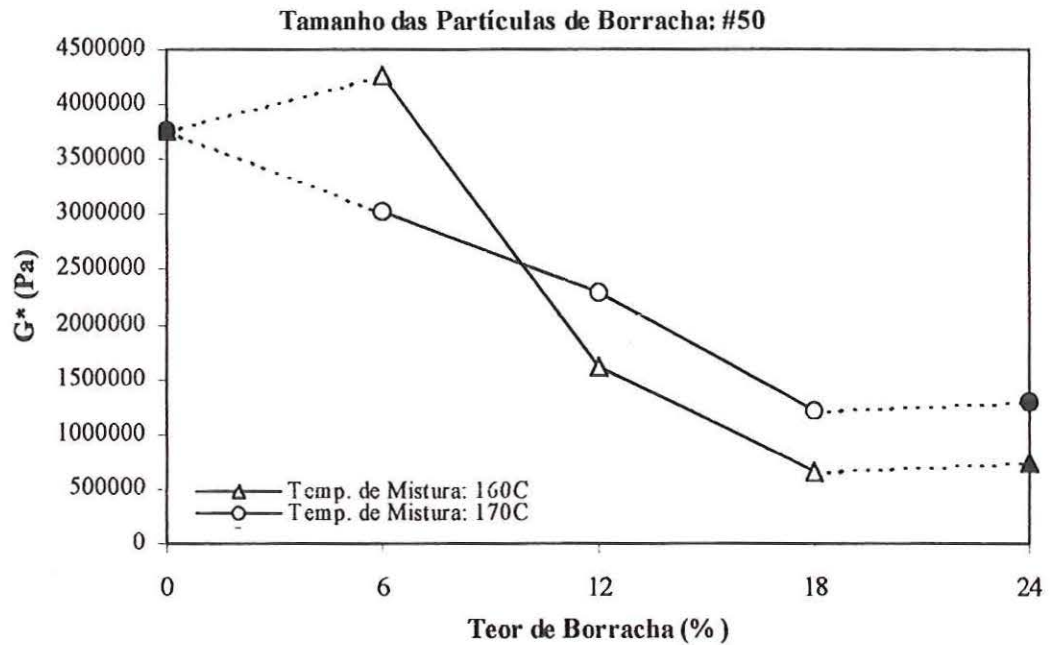


FIGURA 6.43 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

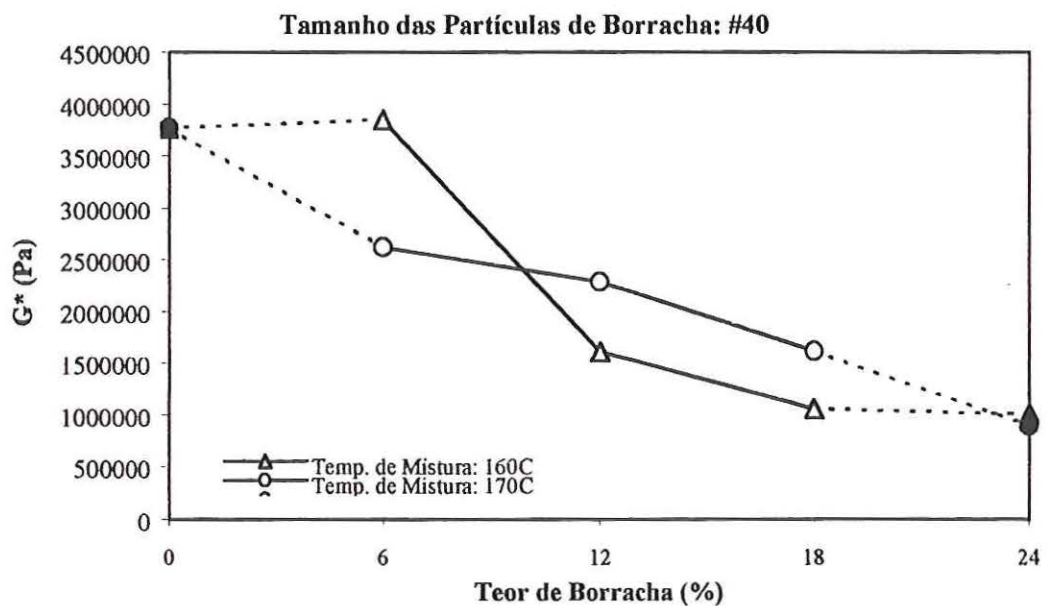


FIGURA 6.44 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

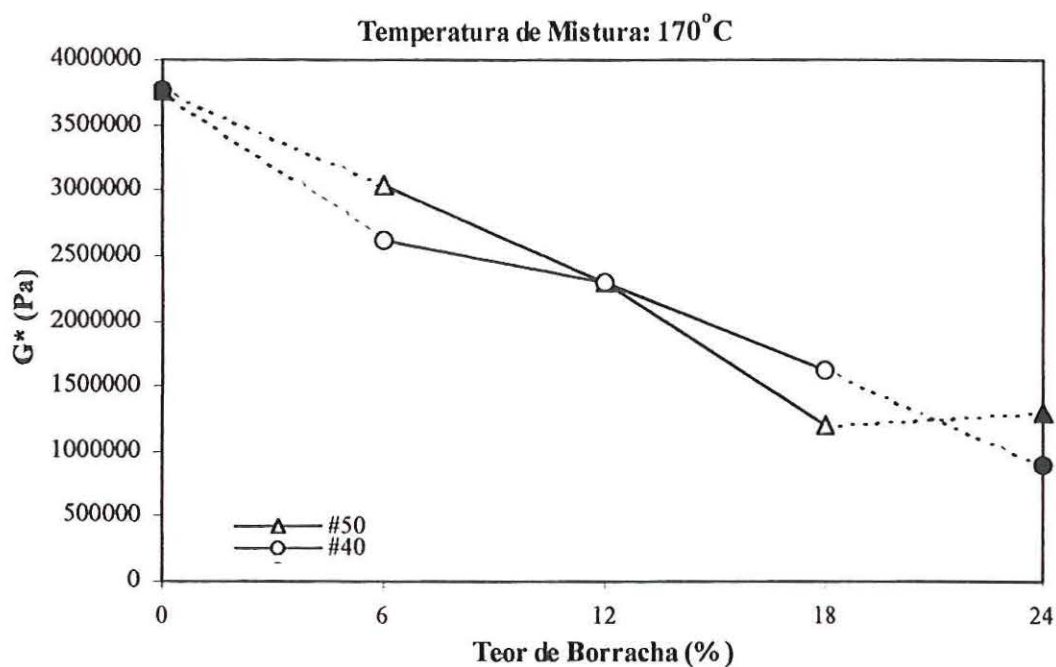


FIGURA 6.45 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

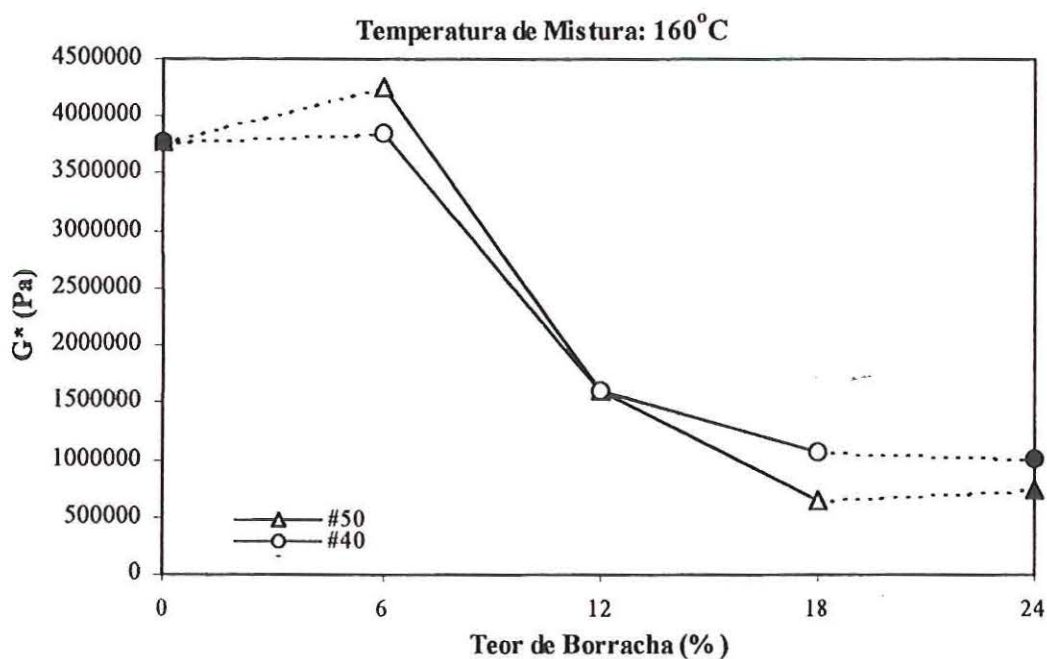


FIGURA 6.46 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

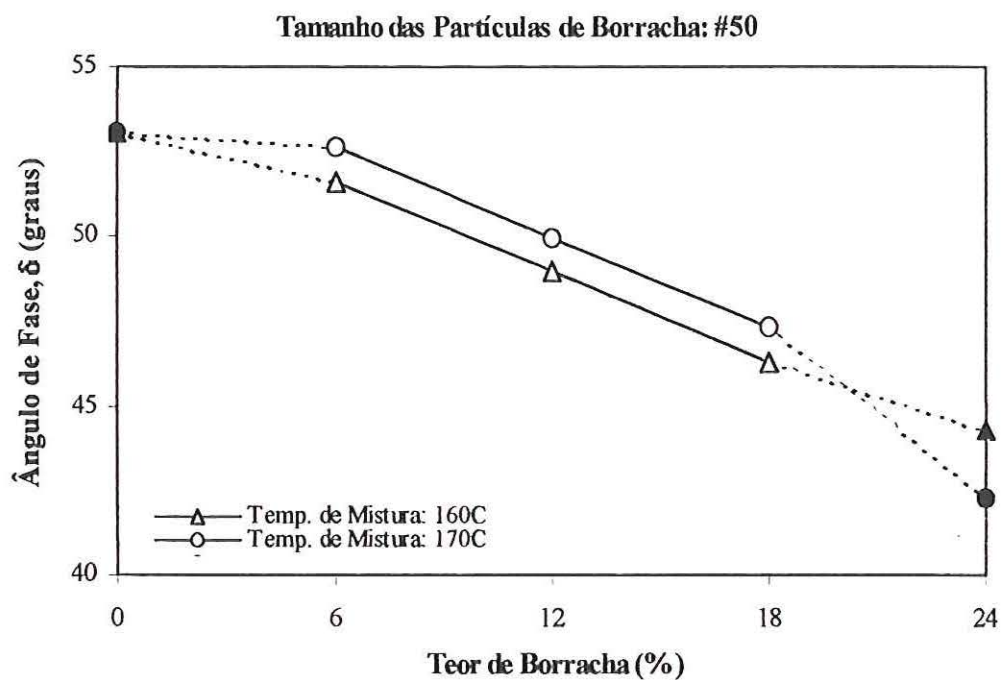


FIGURA 6.47 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

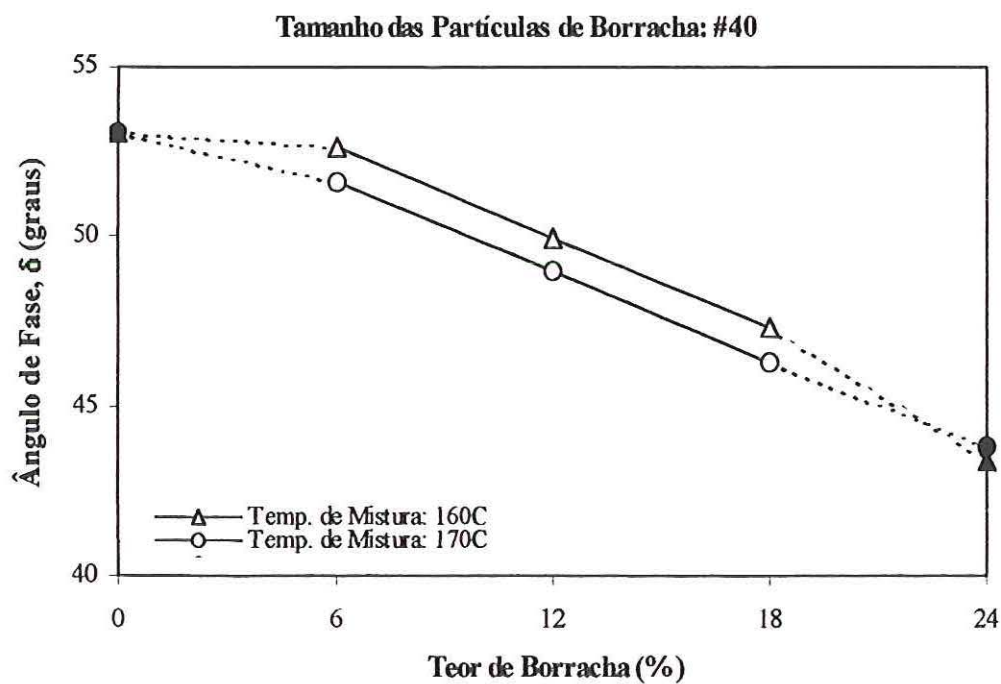


FIGURA 6.48 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

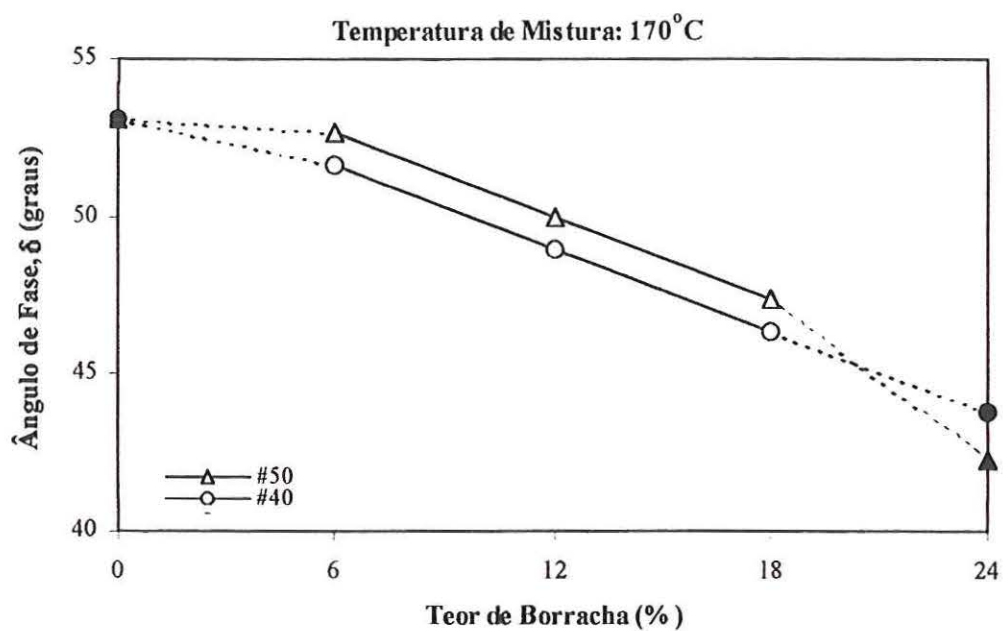


FIGURA 6.49 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

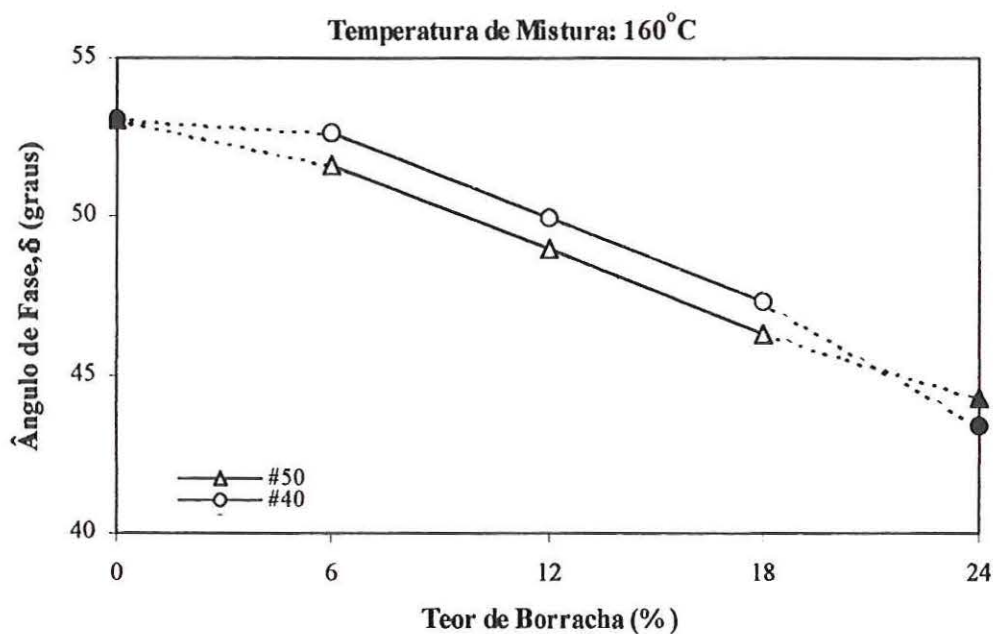


FIGURA 6.50 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

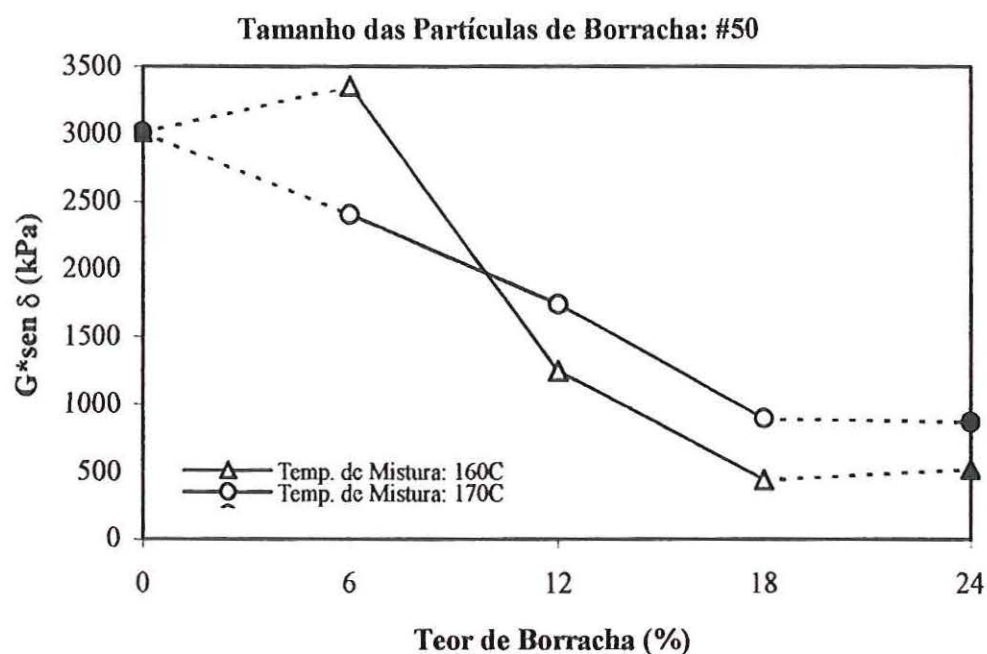


FIGURA 6.51 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

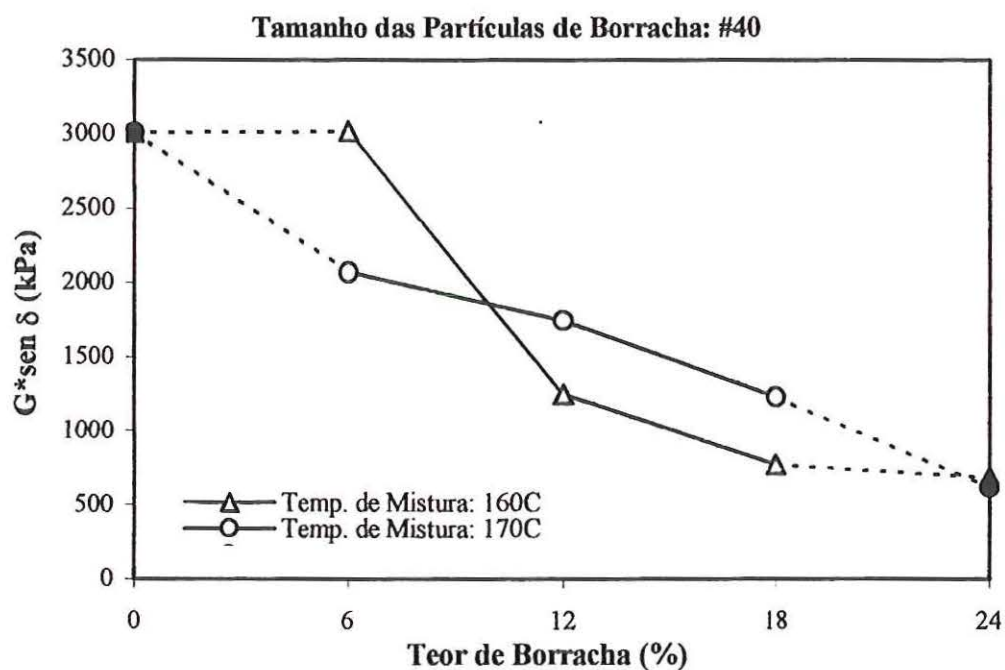


FIGURA 6.52 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

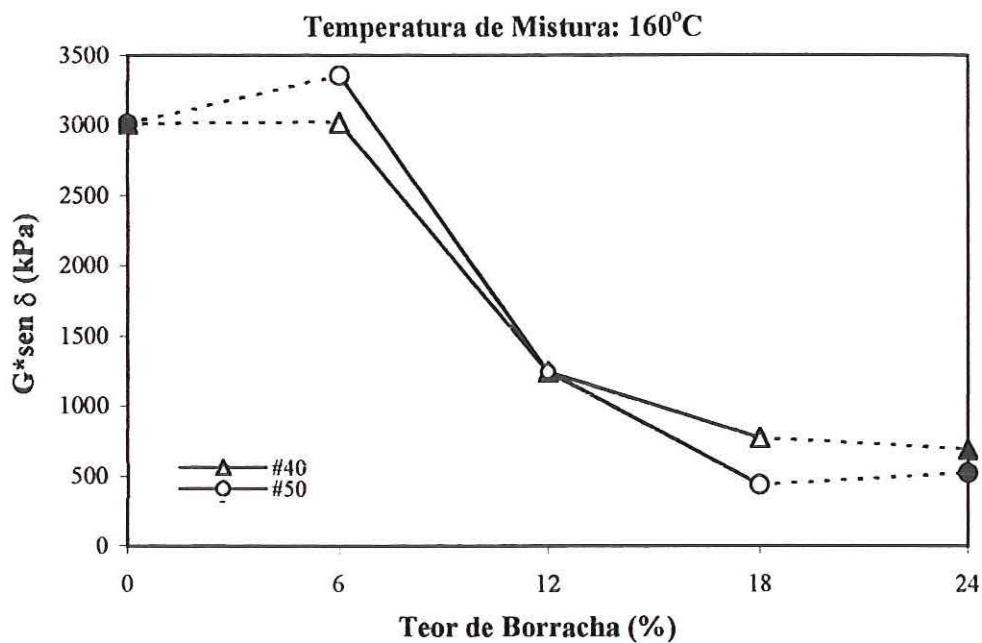


FIGURA 6.53 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

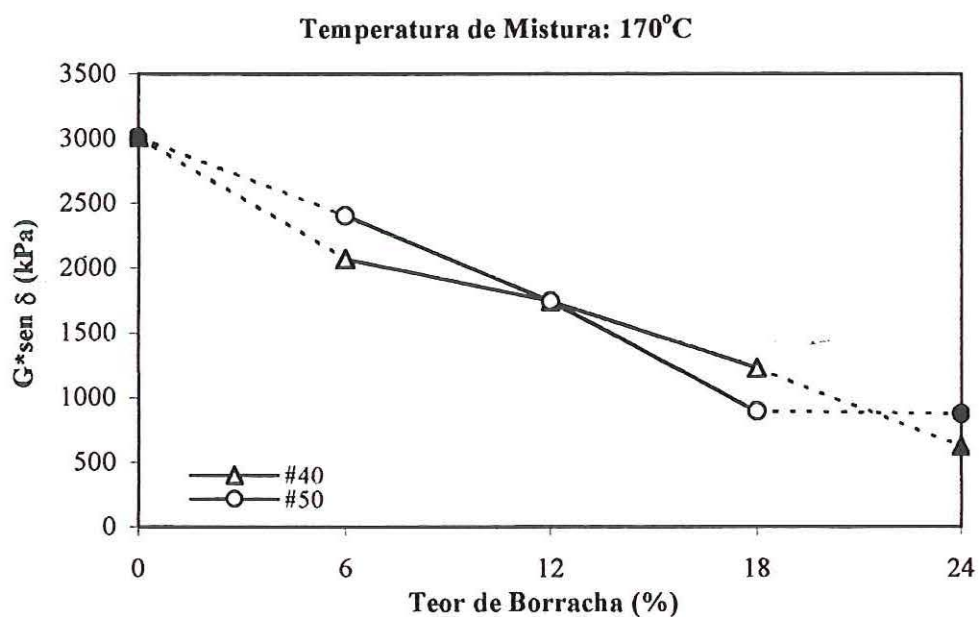


FIGURA 6.54 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

Pode-se verificar que o comportamento do ligante asfalto-borracha após o envelhecimento de longo prazo apresenta uma redução do parâmetro $G^*_{sen\delta}$ com o aumento do teor de borracha, o que indica um acréscimo na resistência a formação de trincas por fadiga (Figuras 6.51 a 6.54). Deve-se ressaltar que todas as amostras ensaiadas apresentaram resultados de $G^*_{sen\delta}$ abaixo do valor máximo estabelecido pela especificação Superpave.

Para os teores de 12 e 18%, a rigidez do ligante é maior para a maior temperatura de mistura (170°C , Figuras 6.43 e 6.44) e para a maior tamanho de partículas de borracha (#40, Figuras 6.45 e 6.46). Já o ângulo de fase é maior quando ocorrem as combinações de maior temperatura de mistura com partículas menores (Figuras 6.47 e 6.49) ou menor temperatura de mistura com partículas maiores (Figuras 6.48 e 6.50).

h) Rigidez à Fluência na Flexão

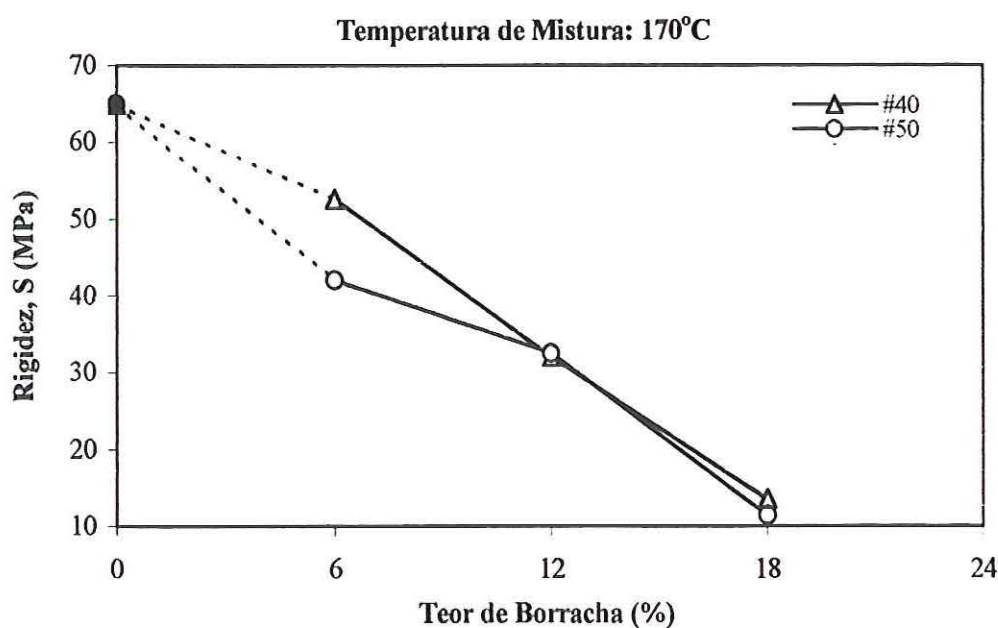


FIGURA 6.55 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

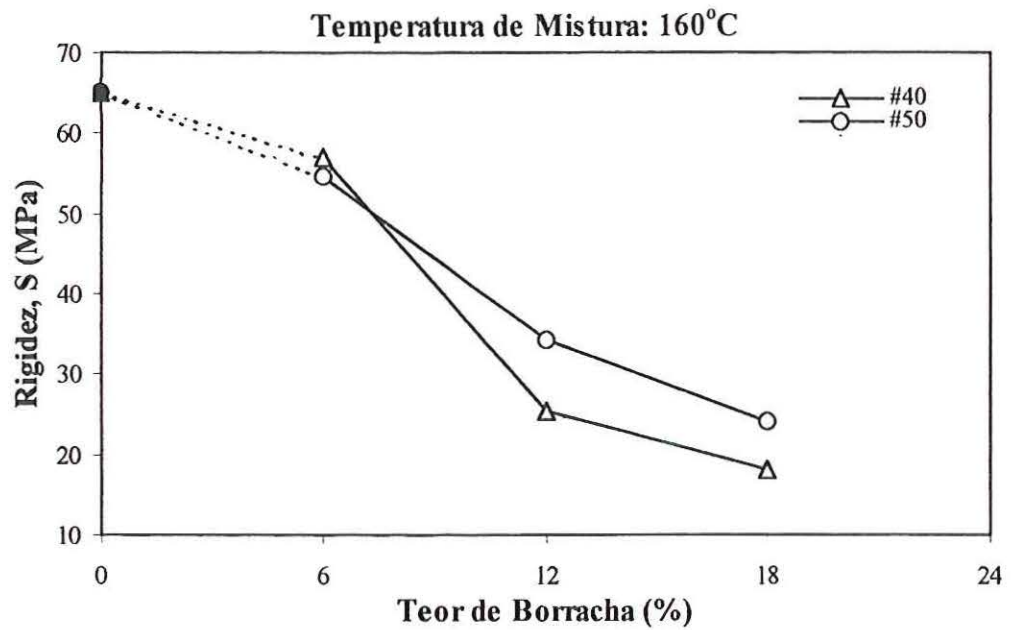


FIGURA 6.56 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

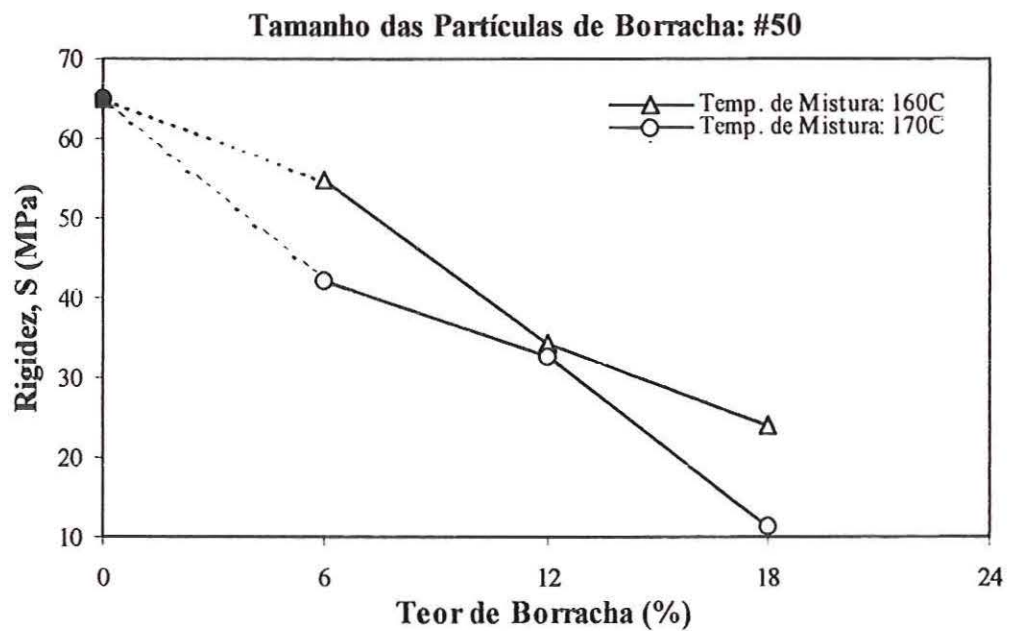


FIGURA 6.57 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

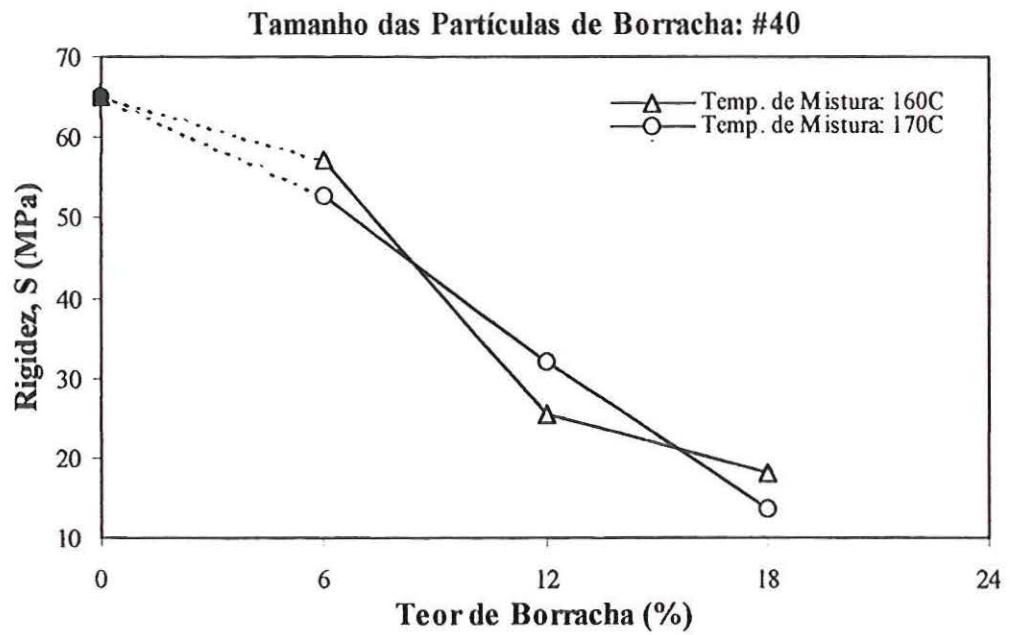


FIGURA 6.58 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

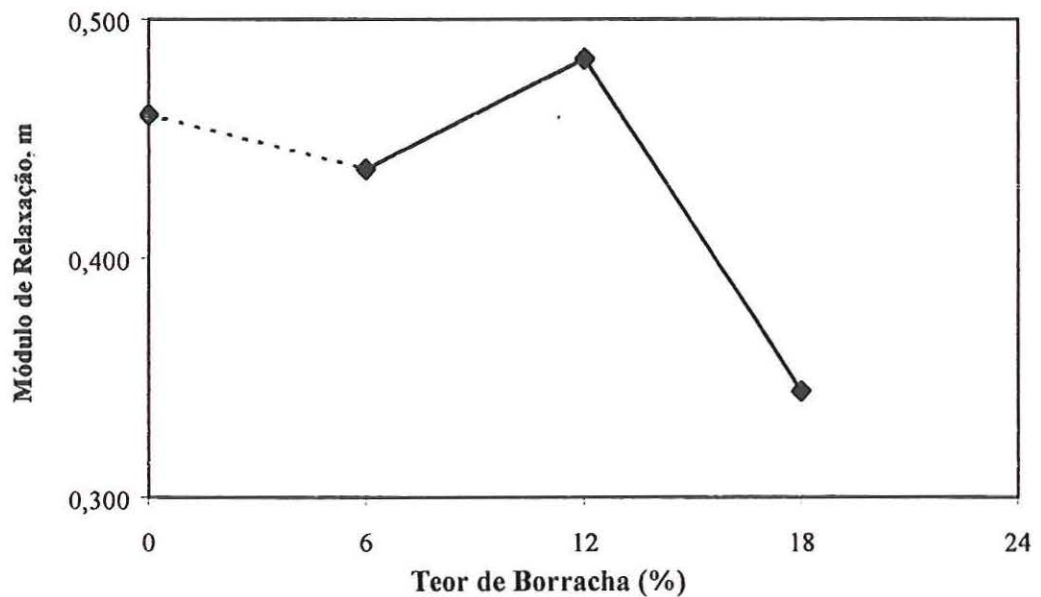


FIGURA 6.59 - Efeito do teor de borracha no módulo de relaxação (m) do ligante asfalto-borracha

Há uma redução da rigidez com o aumento do teor de borracha (Figuras 6.55 a 6.58), embora não se observe um padrão de comportamento associado à temperatura de mistura ou tamanho das partículas. Há uma tendência de diminuição do módulo de relaxação (m) com o teor de borracha (Figura 6.59), embora tenha ocorrido um aumento para o teor de 12% (o que é importante, pois o desempenho do ligante é melhor quanto maior for o m).

7 – CONCLUSÕES

Apresentam-se, neste trabalho, os resultados de uma pesquisa que teve por objetivo avaliar, tecnicamente, a viabilidade da incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação. Com base na revisão bibliográfica apresentada pode-se concluir pela atualidade e relevância do tema. Complementarmente, a utilização de ensaios adotados pelo método Superpave para avaliação do ligante asfalto-borracha amplia o campo de validade das conclusões da pesquisa.

Embora os fatores adotados na programação de experimentos laboratoriais e os respectivos níveis não representem todas as variáveis intervenientes, sem dúvida são os mais significativos e, conseqüentemente, serão de grande valia para o estabelecimento de critérios técnicos que viabilizem a utilização de borracha de pneus em larga escala nas obras de pavimentação.

As evidências da pesquisa, baseadas em ensaios de laboratório que simulam o comportamento do material no campo, são de que a mistura asfalto-borracha pode ser benéfica aos pavimentos, melhorando as propriedades de resistência ao acúmulo de deformação permanente (maior rigidez a elevadas temperaturas) e de resistência à formação de trincas por fadiga (maior elasticidade). Além disso, as amostras ensaiadas também apresentaram suficiente resistência à formação de trincas por contração térmica.

A adição de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação representa uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada de pneus usados. Ainda existem obstáculos ao emprego dessa tecnologia, principalmente de origem econômica, pois a trituração dos pneus representa um custo relativamente alto. Mas à medida em que trabalhos de pesquisa apresentarem resultados sobre a viabilidade técnica e a sociedade se conscientizar do elevado custo ambiental da disposição de pneus inservíveis, certamente o uso do ligante asfalto-borracha se disseminará.

Atualmente, no Brasil, a borracha de pneus moída não existe no mercado (em escala comercial). Porém, evidências da experiência americana indicam que o ligante asfalto-borracha tem um custo bem inferior ao dos asfaltos modificados (polímeros). O uso de polímeros nas misturas asfálticas produzidas no Brasil ainda é incipiente, embora sua utilização já venha sendo justificada em diversos projetos, há muito tempo. É provável, portanto, que a expansão do uso de polímeros seja acompanhada pela utilização do ligante asfalto-borracha. Conseqüentemente, empresas como a Relastomer, que forneceu a borracha usada nesta pesquisa, terão a demanda necessária para a produção em escala industrial.

Foi desenvolvida uma programação fatorial de ensaios laboratoriais que permitiu o desenvolvimento de modelos estatísticos para as diferentes propriedades consideradas. Para avaliação do ligante asfalto-borracha foram considerados ensaios tradicionais de caracterização de ligantes asfálticos e também ensaios do método Superpave (reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR, reômetro de viga à flexão – BBR e viscosímetro Brookfield).

Dentre os fatores considerados (teor de borracha, tamanho das partículas de borracha e temperatura de mistura), a análise estatística (ANOVA – Análise de

Variância) dos resultados obtidos confirma a maior influência do teor de borracha, presente (significativo) em todos os dezesseis modelos estatísticos desenvolvidos. O fator temperatura de mistura ou sua interação com outro fator se mostrou significativo em onze dos modelos estatísticos. O fator que menos afetou os resultados dos ensaios realizados foi o tamanho das partículas de borracha, significativo em apenas seis dos dezesseis modelos estatísticos.

Apesar das evidências obtidas com os resultados dos ensaios em laboratório, o desempenho de pavimentos construídos com o ligante asfalto-borracha será melhor estimado após análise de misturas asfálticas em laboratório e, principalmente, a construção de trechos experimentais. Para o desenvolvimento dessas etapas futuras, particularmente a construção de trechos experimentais, serão de grande importância os modelos estatísticos, pois as condições de trabalho nas usinas de asfalto ou mesmo a borracha disponível podem não corresponder à condição ideal. Dessa forma, o conhecimento do comportamento do ligante asfalto-borracha, para diferentes combinações de níveis e fatores, será de grande valia para a definição das condições operacionais visando a produção em larga escala.

Deve-se destacar, também, que os modelos estatísticos representam satisfatoriamente os efeitos dos fatores sobre os ensaios considerados, conforme atestam os elevados coeficientes de determinação (R^2) e, principalmente, a comparação das extrapolações com os resultados obtidos para os teores de 0 e 24% (controle).

Analisando-se particularmente o teor de borracha e seu efeito em todos os ensaios, verifica-se que todos os teores analisados (6, 12,18 e 24%) atendem aos requisitos de ponto de fulgor (segurança). Os requisitos de ponto de amolecimento e de penetração são atendidos pelos teores de 12, 18 e 24%. A viscosidade aparente a 135°C, importante para a produção de misturas

asfálticas (CAUQ), é atendida pelos teores de 6 e 12%. Os resultados do ensaio DSR, com base nas especificações Superpave, são melhores à medida que o teor de borracha aumenta. E, finalmente, quanto à rigidez no ensaio de fluência à flexão, o melhor teor é 12%.

Considerando-se ainda as dificuldades enfrentadas no preparo das amostras e na realização dos ensaios associadas aos teores de 18 e, principalmente, 24%, pode-se concluir que 12% apresenta-se como o teor mais adequado e como ponto de partida para investigações futuras.

Dentre as dificuldades encontradas no desenvolvimento do trabalho, duas merecem destaque:

- necessidade de aquisição de um misturador e de um recipiente capaz de aquecer o ligante até 190°C: com os recursos disponíveis, foi possível adquirir equipamentos que, se não são o que há de melhor em nível mundial, seguramente atenderam às necessidades do trabalho;
- dependência do laboratório da Petrobrás (CENPES, RJ) para realização dos ensaios Superpave: mesmo com todas as dificuldades associadas ao deslocamento para o Rio de Janeiro (transporte das amostras, custo etc.), a experiência no CENPES foi valiosa em razão da possibilidade de ter o acompanhamento dos técnicos quando do treinamento para a execução dos ensaios e, principalmente, pela disponibilidade, atenção e valiosas sugestões recebidas de seus engenheiros. Apesar disso, deve-se reafirmar a necessidade de que os principais laboratórios de pesquisa brasileiros adquiram os equipamentos exigidos pela Especificação Superpave.

Finalmente, as principais sugestões para trabalhos futuros são:

- análise fatorial completa do ligante asfalto-borracha, incluindo os fatores que não puderam ser analisados neste trabalho (tipo de CAP, tempo de reação, uso de diluente), além da consideração de níveis adicionais para os fatores granulometria da borracha e temperatura de mistura;
- preparo e ensaio de misturas asfálticas com ligante asfalto-borracha, avaliando-se as propriedades como módulo de resiliência, fluência estática, fluência dinâmica, adesividade etc.;
- execução de trechos experimentais e acompanhamento do desempenho sob condições de tráfego e climáticas;
- análise do ligante asfalto-borracha quanto a reciclagem de ligantes asfálticos modificados por borracha moída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT** (1971a) - *Determinação da Ductilidade de Materiais Betuminosos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/P-MB-167/NBR6293
- ABNT** (1971b) - *Determinação da Viscosidade Saybolt de Materiais Betuminosos a Alta Temperatura*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/P-MB-517
- ABNT** (1972) - *Determinação do Ponto de Amolecimento de Materiais Betuminosos - Método do Anel e Bola*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/MB-164/NBR 6560
- ABNT** (1990) - *Produtos de Petróleo - Determinação do Ponto de Fulgor e de Combustão em Vaso Aberto de Cleveland*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/NBR 11341
- ABNT** (1998) - *Materiais Betuminosos - Determinação da Penetração*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/NBR 6576
- ALL STATES ASPHALT Inc.** (1999) - Asphalt-Rubber. www.allstatesasphalt.com (14 jul.)
- ANDERSON, D.A.; CHRISTENSEN, D.W. e BAHIA, H.** (1991) - *Physical Properties of Asphalt Cement and the Development of Performance-Related Specifications*. Asphalt Paving Technology. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. vol. 60, p. 437-475

- ANIP** (1996) - *Associação Nacional de Indústrias de Pneumáticos*
- ARPG** (1993) - *Uses of Asphalt Rubber*. Asphalt Rubber Producers Group, Phoenix, Arizona
- ASPHALT INSTITUTE** (1995) - *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing* - SP-1
- ASPHALT INSTITUTE** (1989) - *The Asphalt Handbook*. Manual Series No.4 (MS-4)
- ASTM** (1995) - *Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using Brookfield Thermosel Apparatus*. American Society for Testing and Materials. ASTM D4402-1987
- ASTM** (1997) - *Standard Specifications for Asphalt-Rubber Binder*. American Society for Testing and Materials. ASTM D6114-1997
- BAHIA, H.U.; HISLOP, W.P.; ZHAI, H.; RANGEL, A.** (1998) - *Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. p.01-41
- BAKER RUBBER Inc.** (1988) - *Production of Crumb Rubber Modifier (CRM) Material* - FHWA - Federal Highway Administration. Workshop Notes. Session 3.0. Design Procedures and Construction Practices
- BAKER, R.F.; CONNOLLY, E.** (1995) - *Mix Designs and Air Quality Emissions Tests of Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete*. Transportation Research Record 1515, TRB, Washington, DC, p.18-27
- BARTH, E.J.** (1968) - *Asphalt. Science and Technology*. Gordon and Breach Science Publishers. New York
- BILLITER, T.C.; CHUN, J.S.; DAVISON, R.R.; GLOVER, C.J.; BULLIN, J.A.** (1996) - *Investigation of the Curing Variables of Asphalt-Rubber Binder*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. p.1221-1226

- BLOOMQUIST, D.; DIAMOND, G.; ODEN, M.; RUTH, B.; TIA, M.** (1993) - *Engineering and Environmental Aspects of Recycled Material for Highway Construction*. FHWA-RD-93-088. Final Report. July.
- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.H.** (1978) - *Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. Ed. John Wiley & Sons. 652p.
- BROWN, D.R.; JARED, D.; JONES, C.; WATSON, D.** (1997) - *Georgia's Experience with Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Record 1583, TRB, Washington, DC, p.45-51
- BROWN, R.** (1988) - *Historical Development*. National Center for Asphalt Technology. FHWA - Federal Highway Administration - Workshop Notes. Session 4.0. Design Procedures and Construction Practices
- CEMPRE** (1998) - *Pneus*. Ficha Técnica 8. Compromisso Empresarial para Reciclagem. www.cempre.org/ficha8.htm (15 abr.)
- CHARANIA, E.; CANO, J.O.; SCHNORMEIER, R.H.** (1991). *Twenty-Year Study of Asphalt Rubber Pavements in Phoenix, Arizona*. Transportation Research Record 1307. TRB. National Research Council. Washington, D.C., p.29-38
- CHEHOVITS, J.; MANNING, M.** (1984) - *Materials and Methods for Sealing Cracks in Asphalt Concrete Pavements*. Transportation Research Record 990, TRB, Washington, DC, p.21-30
- COELHO, V.** (1996) - *Contribuição ao Estudo das Deformações Permanentes, nas Condições do Brasil, em Camadas de Concreto Asfáltico de Pavimentação*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP

- **COETZEE, N.F.; MONISMITH, C.L.** (1979) - *Analytical Study of Minimization of Reflection Cracking in Asphalt Concrete Overlays by Use of a Rubber-Asphalt Interlayer*. Transportation Research Record 700, TRB, Washington, DC, p.100-108
- COOMARASAMY, A.; MANOLIS, S.; HESP, S.** (1996) - *High Temperature Performance of Scrap Tire Rubber Modified Asphalt Concrete*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. p.1322-1326
- CRAFCO INC.** (1980) - *Produtos e Técnicas para Selamento de Trincas como um Sistema de Manutenção Viária para Pavimento de Concreto Asfáltico*
- CHRISTENSEN; ANDERSON** (1992) - *Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. V.61, p.67-116
- DALY, W.H.; NEGULESCU, I.I.** (1997) - *Characterization of Asphalt Cements Modified with Crumb Rubber from Discarded Tires*. Transportation Research Record 1583, TRB, Washington, DC, p.37-44
- EMERY, J.** (1995) - *Evaluation of Rubber Modified Asphalt Demonstration Projects*. Transportation Research Record 1515, TRB, Washington, DC, p.37-46
- EPPS, J.A.** (1994) - *Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board, Washington, DC
- ESCH, D.C.** (1982) - *Construction and Benefits of Rubber-Modified Asphalt Pavements*. Transportation Research Record 860, TRB, Washington, DC, p.05-13

- ESTAKHRI, C.K.; BUTTON, J.W.; FERNANDO, E.G.** (1992) - *Use, Availability, and Cost-Effectiveness of Asphalt Rubber in Texas*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, DC, p.30-37
- FARRO, W.** (1997) - *Sucata Vira Matéria-Prima e Gera Lucro*. Desenvolvimento Sustentado. Revista de Indústria. Setembro, p. 22-26
- FERNANDES, JR., J. L.** (1995) - *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP
- FERNANDES, JR., J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F.** (1999) - *Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos*. Apostila. Escola de Engenharia de São Carlos - USP
- FERREIRA, A.B.H.** (1986) - *Novo Dicionário da Língua Portuguesa - Aurélio Buarque de Holanda Ferreira* - Ed. Nova Fronteira, RJ
- FHWA** (1993) - *A Study of the Use of Recycled Paving Material* - Report to Congress - Final Report. Federal Highway Administration - FHWA-RD-93-147 - EPA/600/R-93/095. June
- GOODYEAR** (1999) - *Charles Goodyear and the Strange Story of Rubber*. http://www.goodyear.com/corporate_information (15 fev.)
- HARRIGAN, E.T.; LEAHY, R.B.; YOUTCHEFF, J.S.** (1994) - *The SUPERPAVE Mix Design System manual of Specifications, Test Methods, and Practices*. SHRP-A-379. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC
- HEITZMAN, M.** (1992a) - *Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, DC, p.01-08
- HEITZMAN, M.** (1992b) - *State of the Practice - Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier*. FHWA-SA-92-022. Final Report. May
- ADDITIVE

- HICKS, R.G.; LUNDY, J.R.; LEAHY, R.B.; HANSON, D.; EPPS, J.** (1995) - *Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida*. FHWA-SA-95-056. September
- HUFF, B.J.; VALLERGA, B.A.** (1981) - *Characteristics and Performance of Asphalt-Rubber Material Containing a Blend of Reclaim and Crumb Rubber*. Transportation Research Record 821, TRB, Washington, DC, p.29-37
- IBP** (1990) - *Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos*. 5ª ed. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, RJ. 68 p.
- IBP** (1996) - *Informativo. O Asfalto*. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, p.01-06
- IESS, J.J.** (1998) - *Um Fim para os Restos da Indústria*. Revista Globo Ciência. Ano 8, nº85, Agosto, p.26-31
- JIMENEZ, R.A.** (1982) - *Laboratory Measurements of Asphalt-Rubber Concrete Mixtures*. Transportation Research Record 843, TRB, Washington, DC, p.04-11
- JIMENEZ, R.A.; MEIER, JR, W.R.** (1985) - *Laboratory Evaluation of Asphalt-Rubber SAL*. Transportation Research Record 1034, TRB, Washington, DC, p.86-96
- KANDHAL, P.; HANSON, D.** (1988) - *Crumb Rubber Modifier (CRM) Technologies* - National Center for Asphalt Technology. FHWA - Federal Highway Administration - Workshop Notes. Session 5.0 - Design Procedures and Construction Practices
- KHOSLA, N.P.** (1991) - *Effect of the Use of Modifiers on Performance of Asphaltic Pavements*. Transportation Research Record 1317, TRB, Washington, DC, p.10-22

- KRUTZ, N.C.; STROUP-GARDINER, M.** (1992) - *Permanent Deformation Characteristics of Recycled Tire Rubber-Modified and Unmodified Asphalt Concrete Mixtures*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, DC, p.38-44
- LEITE, L.F.M.** (1990) - *Estudos Reológicos de Cimentos Asfálticos* - Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ
- LEITE, L.F.M.** (1999) - *Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero* - Tese Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ
- LIANG, R.Y.; LEE, S.** (1996) - *Short-Term and Long-Term Aging Behavior of Rubber Modified Asphalt Paving Mixture*. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, p.11-17
- LING, M.; CURTIS, C.W.; HANSON, D.I.; HOLL, J.N.** (1997) - *Quantitative Analysis of Polymers and Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalts*. Transportation Research Record 1586, TRB, Washington, DC, p.57-67
- MADAPATI, R.R.; LEE, K.W.; MANNING, F.J.; FRANCO, C.A.** (1996) - *Feasibility of Crumb Rubber Use for Pavement Asphalt Construction*. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, p.64-71
- MALPASS, G.A.; KHOSLA, N. P.** (1995) - *Use of Ground Tire Rubber in Asphalt Concrete Pavements. A Design and Performance Evaluation*. Transportation Research Record 1515, TRB, Washington, DC, p.11-17
- MAUPIN, JR., G.W.** (1992) - *Virginia's Experimentation With Asphalt Rubber Concrete*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, DC, p.09-15
- MAUPIN, JR., G.W.** (1996) - *Hot Mix Asphalt Rubber Applications in Virginia*. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, p.18-24

- McDONALD, C.H.** (1981) - *Recollections of Early Asphalt-Rubber History*. National Seminar on Asphalt-Rubber. FHWA. San Antonio, Texas. p.23-39
- McQUILLEN, JR., J.L.; TAKALLOU, H.B.; HICKS, R.G.; ESCH, D.C.** (1988) - *Economic Analysis of Rubber-Modified Asphalt Mixes*. Journal Transportation Engineering, ASCE, vol.114, N°3, May, p.259-277
- MONTGOMERY, D.C.** (1991) - *Design and Analysis of Experiments* - Ed. John Wiley & Sons
- MORRIS, G.R.; CHEN, N.J.; DI VITO, J.A.** (1982) - *Application of Asphalt Rubber on New Highway Pavement Construction*. Transportation Research Record 888, TRB, Washington, DC, p.43-47
- MORRIS, G.R.; McDONALD, C.H.** (1976) - *Asphalt-Rubber Stress-Absorbing Membranes: Field Performance and State of the Art*. Transportation Research Record 595, TRB, Washington, DC, p.52-58
- MORRISON, G.R.; VAN DER STEL, R.; HESP, S.A.M.** (1995) - *Modification of Asphalt Binders and Asphalt Concrete Mixes with Crumb and Chemically Devulcanized Waste Rubber*. Transportation Research Record 1515, TRB, Washington, DC, p.56-63
- OLIVER, J.W.H.** (1981a) - *Modification of Paving Asphalts by Digestion with Scrap Rubber*. Transportation Research Record 821, TRB, Washington, DC, p.37-44
- OLIVER, J.W.H.** (1981b) - *Research on Asphalt-Rubber at the Australian Road Research Board*. National Seminar on Asphalt-Rubber. FHWA. San Antonio, Texas. p.241-256
- OTOO, E.A.** (1999) - *Evaluation of Field Performance of Open Graded Asphalt Rubber Friction Course*. Thesis. Civil Engineering Department - University of Florida, 148p.

- PAGE, G.C.; RUTH, B.R.; WEST, R.C.** (1992) - *Florida's Approach Using Ground Tire Rubber in Asphalt Concrete Mixtures*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, DC, p.16-22
- PATERSON, W.D.O.** (1991) - *Engineering and Economic Efficiency for Highways: An Introduction to the Highway Design and Maintenance Standards Model, HDM*. World Bank. Infrastructure Operations. Washington, DC
- PETROBRÁS** (1996) - *Manual de Serviços de Pavimentação*. Petrobrás Distribuidora S.A., Rio de Janeiro, RJ
- REESE, R.E.** (1994) - *Development of a Physical Property Specification for Asphalt-Rubber Binder*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. Vol 63, p.373-400
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T.W.** (1998) - *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction* - NAPA Educational Foundation - Lanham, Maryland
- ROBERTS, F.L.; LYTTON, R.** (1987) - *FAA Mixture Design Procedure for Asphalt-Rubber Concrete*. Transportation Research Record 1115, TRB, Washington, DC, p.216-225
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN E. R.; DUNNING, R. L.** (1989) - *Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology. Auburn, n.89, 172p.
- ROMINE, R.A.; TAHMORESSI, M.; ROWLETT, R.D.; MARTINEZ, D.F.** (1991) - *Survey of State Highway Authorities and Asphalt Modifier Manufacturers on Performance of Asphalt Modifiers*. Transportation Research Record 1323, TRB, Washington, DC, p.61-69

- RUTH B.E.; TIA, M.; JONSSON, G.; SETZE, J.C.** (1997) - *Recycling of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber*. Final Report. FL/DOT/MO D510717. University of Florida. Florida Department of Transportation. 221p.
- SALTER, R.J.; MAT, J.** (1990) - *Some Effects of Rubber Additives on Asphalt Mixes*. Transportation Research Record 1269, TRB, Washington, DC, p.79-86
- SCHNORMEIER, R.H.** (1980) - *Eleven-Year Pavement Condition History of Asphalt-Rubber Seals in Phoenix, Arizona*. Asphalt Pavement Construction: New Materials Techniques. ASTM Special Technical Publication 724. American Society for Testing and Materials. p.13-21
- SCHNORMEIER, R.H.** (1983) - *Use of Asphalt-Rubber on Low-Cost, Low-Volume Streets: A Review After 13 Years*. Transportation Research Record 898, TRB, Washington, DC, p.344-346
- SCHNORMEIER, R.H.** (1986) - *Fifteen-Year Pavement Condition History of Asphalt-Rubber Membranes in Phoenix, Arizona*. Transportation Research Record 1096, TRB, Washington, DC, p.62-67
- SHASHIDHAR, N.; CHOLLAR, B.N.** (1994) - *Rheological Properties of Asphalts with Particulate Additives*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. vol. _, p.1307-1316
- SHIH, C.; TIA, M.; RUTH, B.E.** (1996) - *Evaluation of the Effects of Crumb Rubber and SBR on Rutting Resistance of Asphalt Concrete*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. p.1227-1231
- SHRP** (1994) - *The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices* - SHRP-A-379. Strategic Highway Research Program - National Research Council, Washington, DC

- SHULER, S.** (1982) - *Specification Requirements for Asphalt-Rubber*. Transportation Research Record 843, TRB, Washington, DC, p.01-04
- SHULER, T.S.; PAVLOVICH, R.D.; EPPS, J.A.** (1985) - *Field Performance of Rubber-Modified Asphalt Paving Materials*. Transportation Research Record 1034, TRB, Washington, DC, p.96-102
- SOUSA, J.B.; HARVEY, J.T.; BOULDIN, M.G.; AZEVEDO, C.** (1994) - *Application of SHRP Mix Based Specifications*. Transportation Research Record 1454, TRB, Washington, DC, p.154-162
- STEPHENS, J.E.** (1982) - *Field Evaluation of Rubber-Modified Bituminous Concrete*. Transportation Research Record 843, TRB, Washington, DC, p.11-21
- STROUP-GARDINER, M.; NEWCOMB, D.E.; TANQUIST, B.** (1993) - *Asphalt-Rubber Interactions*. Transportation Research Record 1417, TRB, Washington, DC, p.99-108
- TA INSTRUMENTS** (1999) – *CSA500 Asphalt Rheometer*. TA Instruments Inc. Thermal Analysis & Rheology. RH 009B
- TAKALLOU, H.B.; BAHIA, H.U.; PERDOMO, D.; SCHWARTZ, R.** (1997) - *Use of Superpave Technology for Design and Construction of Rubberized Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record 1583, TRB, Washington, DC, p.71-81
- TAKALLOU, H.B.; HICKS, R.G.** (1988) - *Development of Improved Mix and Construction Guidelines for Rubber-Modified Asphalt Pavements*. Transportation Research Record 1171, TRB, Washington, DC, p.113-120
- TAKALLOU, H.B.; HICKS, R.G.; ESCH, D.C.** (1986) - *Effect of Mix Ingredients on the Behavior of Rubber-Modified Asphalt Mixtures*. Transportation Research Institute 1096, TRB, Washington, DC, p.68-80

- **TAKALLOU, H.B.; SAINTON, A.** (1992) - *Advances in Technology of Asphalt Paving Materials Containing Used Tire Rubber*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, DC, p.23-29
- **TROY, K.; SEBAALY, P.E.; EPPS, J.A.** (1996) - *Evaluation Systems for Crumb Rubber Modified Binders and Mixtures*. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, p.03-10
- TUNES,** (1998) - *Um Fim para os Restos da Indústria*. Revista Globo Ciência. Ano 8, nº85, Agosto, p.26-31
- VALERGA, B.A.** (1981) - *Design and Specifications Changes for Paving Mixes with Asphalt-Rubber Binders*. National Seminar on Asphalt-Rubber. FHWA. San Antonio, Texas. p.209-217
- WAY, G.B.** (1999) - *Flagstaff I-40 Asphalt-Rubber Overlays Project. Nine Years of Success*. Paper Presented to Transportation Research Board. 78th Annual Meeting, TRB
- WEST, R.C.; PAGE, G.C.; VEILLEUX, J.G.; CHOUBANE, B.** (1998) - *Effect of Tire Rubber Grinding Method on Asphalt-Rubber Binder Characteristics*. Transportation Research Record 1638, TRB, Washington, DC, p.134-140
- **ZAMAN, A.A.; FRICKE, A.L.; BEATTY, C.L.** (1995) - *Rheological Properties of Rubber-Modified Asphalt*. Journal Transportation Engineering, ASCE, vol.121, Nº 6, nov/ dec, p.461-467
- **ZANZOTTO, L., KENNEPOHL, G.J.** (1996) - *Development of Rubber and Asphalt Binders by Depolymerization and Devulcanization of Scrap Tires in Asphalt*. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, p.51-58

ANEXO A – TEMPERATURAS MÍNIMA E MÁXIMA DO ESTADO DE SÃO PAULO DE 1931 A 1999

PERÍODOS: 1931 – 1960
1961 – 1990
1995 – 1996
1997 – 1998
1999

TABELA A1 - Temperaturas mínima e máxima - Períodos: 1931–1960 e 1961–1990

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
	1931-1960	1961-1990	1931-1960	1961-1990
1. JANEIRO	17,5	19,0	28,0	27,5
2. FEVEREIRO	18,0	19,0	27,0	28,5
3. MARÇO	17,0	18,0	26,0	27,0
4. ABRIL	14,5	16,0	24,5	25,0
5. MAIO	13,0	14,0	23,0	23,0
6. JUNHO	11,0	12,0	21,5	21,5
7. JULHO	10,0	11,5	21,0	21,5
8. AGOSTO	11,5	12,5	23,5	23,5
9. SETEMBRO	12,0	14,0	24,0	24,5
10. OUTUBRO	14,5	15,5	25,0	24,8
11. NOVEMBRO	15,0	16,0	25,2	25,5
12. DEZEMBRO	16,0	17,0	25,6	26,0

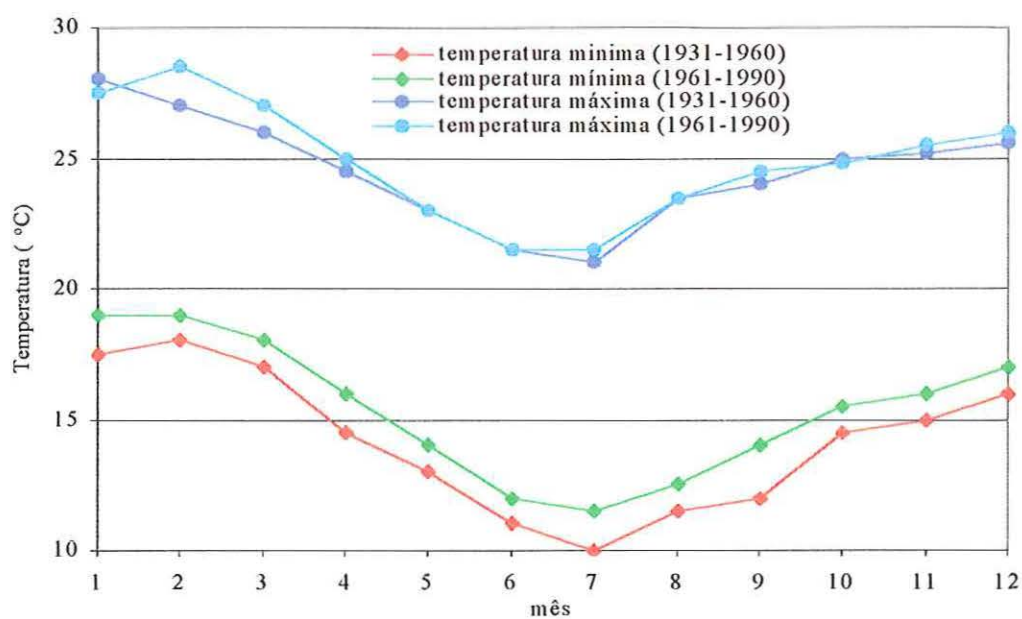


FIGURA A1 – Temperaturas mínima e máxima do estado de São Paulo durante os períodos de 1931-1960 e de 1961-1990

TABELA A2 - Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta - Períodos:
1931-1960 e 1961-1990

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
	1931-1960	1961-1990	1931-1960	1961-1990
1. JANEIRO	10,0	12,0	34,0	34,0
2. FEVEREIRO	10,5	13,0	35,0	34,5
3. MARÇO	10,2	12,0	32,0	33,0
4. ABRIL	6,0	8,0	31,0	31,0
5. MAIO	5,0	2,0	31,0	30,0
6. JUNHO	2,0	1,0	28,0	29,0
7. JULHO	1,0	2,0	29,5	29,5
8. AGOSTO	-2,0	3,0	32,0	33,0
9. SETEMBRO	2,0	4,0	34,0	37,0
10. OUTUBRO	4,0	7,0	35,0	35,0
11. NOVEMBRO	8,0	8,0	34,0	36,0
12. DEZEMBRO	9,0	10,0	34,0	34,0

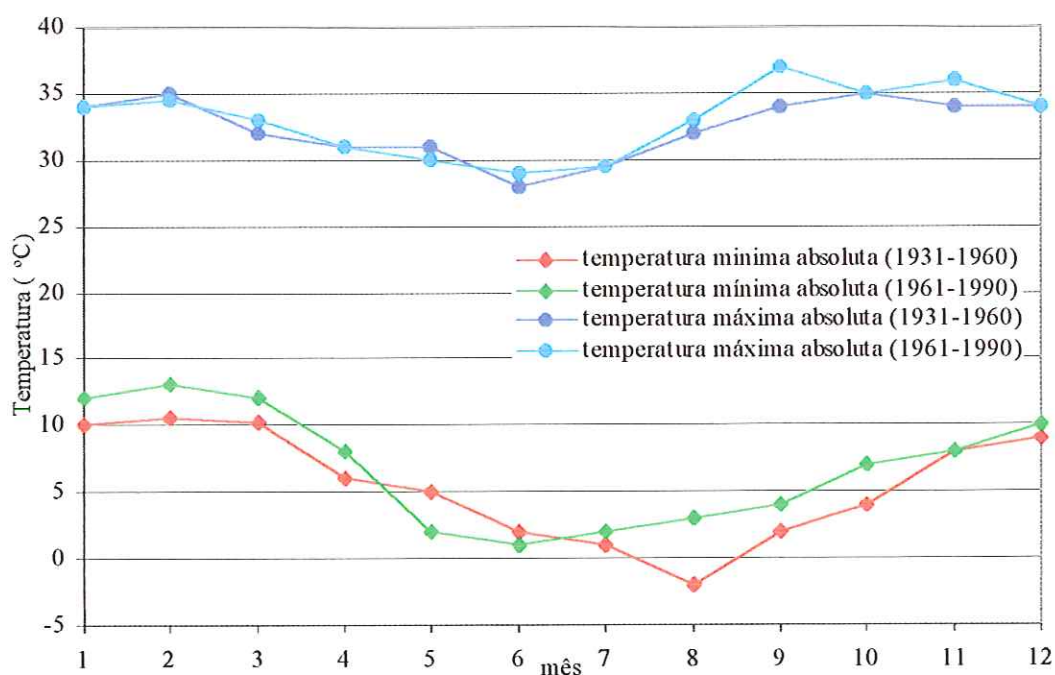


FIGURA A2 – Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta do estado de São Paulo durante os períodos de 1931-1960 e de 1961-1990

TABELA A3 - Temperaturas mínima e máxima - Períodos: 1995 e 1996

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
	1995	1996	1995	1996
1. JANEIRO	20,5	20,0	29,0	28,5
2. FEVEREIRO	20,0	19,0	27,0	28,0
3. MARÇO	18,0	19,0	26,5	27,0
4. ABRIL	17,0	17,5	26,0	26,0
5. MAIO	15,0	14,5	23,0	23,0
6. JUNHO	13,0	13,5	23,0	22,0
7. JULHO	14,0	11,5	24,0	20,5
8. AGOSTO	15,0	12,0	26,5	24,0
9. SETEMBRO	14,0	14,0	24,5	23,5
10. OUTUBRO	15,5	16,0	24,0	26,0
11. NOVEMBRO	17,0	16,5	26,0	26,5
12. DEZEMBRO	18,0	19,0	27,0	28,5

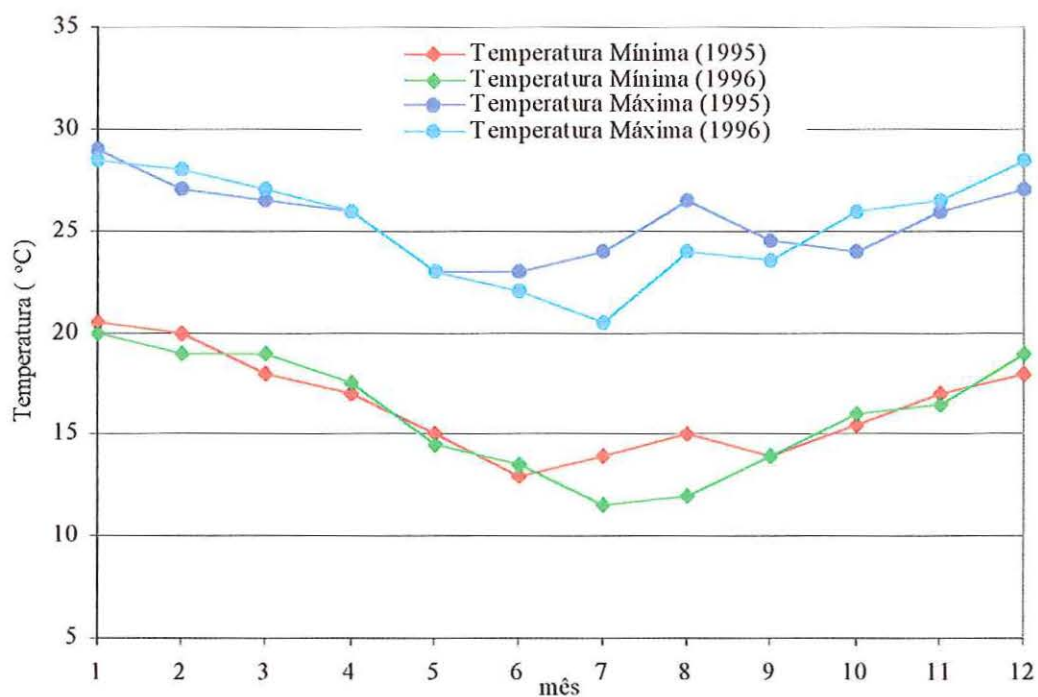
**FIGURA A3 - Temperaturas mínima e máxima do estado de São Paulo durante os períodos de 1995 e de 1996**

TABELA A4 - Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta - Períodos:
1995 e 1996

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
	1995	1996	1995	1996
1. JANEIRO	20,5	20,0	29,0	28,5
2. FEVEREIRO	20,0	19,0	27,0	28,0
3. MARÇO	18,0	19,0	26,5	27,0
4. ABRIL	17,0	17,5	26,0	26,0
5. MAIO	15,0	14,5	23,0	23,0
6. JUNHO	13,0	13,5	23,0	22,0
7. JULHO	14,0	11,5	24,0	20,5
8. AGOSTO	15,0	12,0	26,5	24,0
9. SETEMBRO	14,0	14,0	24,5	23,5
10. OUTUBRO	15,5	16,0	24,0	26,0
11. NOVEMBRO	17,0	16,5	26,0	26,5
12. DEZEMBRO	18,0	19,0	27,0	28,5

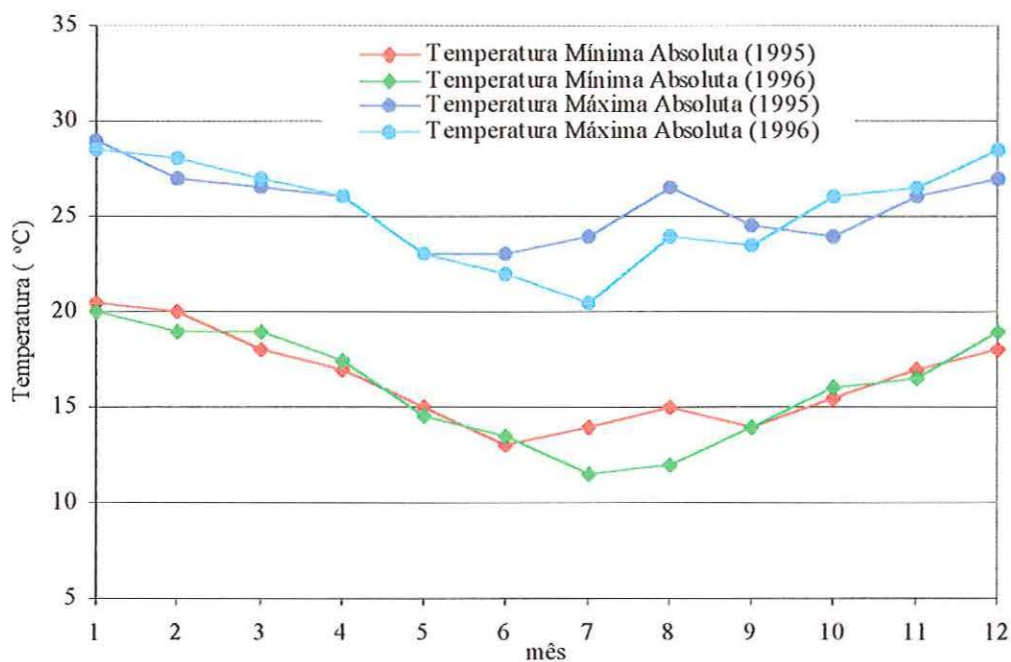


FIGURA A4 – Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta do estado de São Paulo durante os períodos de 1995 e de 1996

TABELA A5 - Temperaturas mínima e máxima - Períodos: 1997 e 1998

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
	1997	1998	1997	1998
1. JANEIRO	18,5	20,5	27,0	31,5
2. FEVEREIRO	18,7	20,0	28,5	29,5
3. MARÇO	17,5	19,5	26,5	28,5
4. ABRIL	16,0	18,0	25,5	26,5
5. MAIO	14,0	14,0	23,0	23,0
6. JUNHO	12,0	12,0	21,5	21,0
7. JULHO	13,5	14,0	24,0	24,1
8. AGOSTO	13,0	15,0	25,0	25,1
9. SETEMBRO	16,0	15,5	25,5	25,6
10. OUTUBRO	16,5	16,0	26,0	26,1
11. NOVEMBRO	18,5	16,5	28,0	28,1
12. DEZEMBRO	19,0	18,0	29,0	29,5

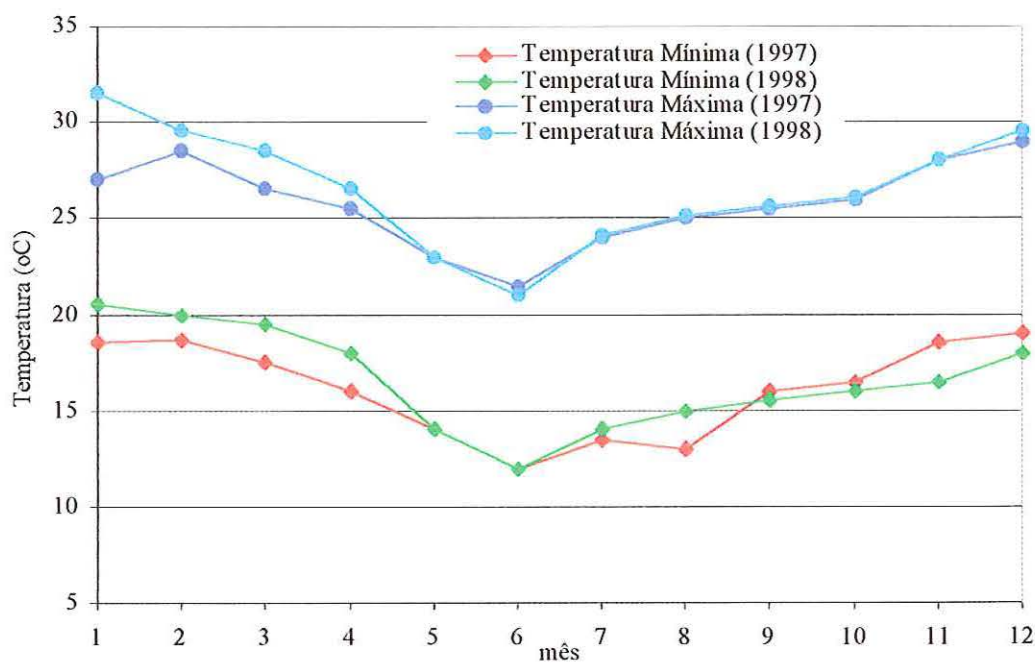
**FIGURA A5 – Temperaturas mínima e máxima do estado de São Paulo durante os períodos de 1997 e de 1998**

TABELA A6 - Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta - Períodos: 1997 e 1998

Mês	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
	1997	1998	1997	1998
1. JANEIRO	17,0	16,0	32,0	34,0
2. FEVEREIRO	17,0	16,5	32,0	33,5
3. MARÇO	14,0	17,0	31,0	33,0
4. ABRIL	13,5	13,0	29,5	32,0
5. MAIO	12,0	11,5	30,0	28,0
6. JUNHO	6,0	10,0	27,0	27,0
7. JULHO	10,5	10,0	27,5	29,0
8. AGOSTO	8,0	11,0	30,0	33,0
9. SETEMBRO	11,5	12,0	34,0	34,0
10. OUTUBRO	13,0	13,0	34,5	32,0
11. NOVEMBRO	14,0	13,5	35,0	35,0
12. DEZEMBRO	16,0	16,0	34,0	36,0

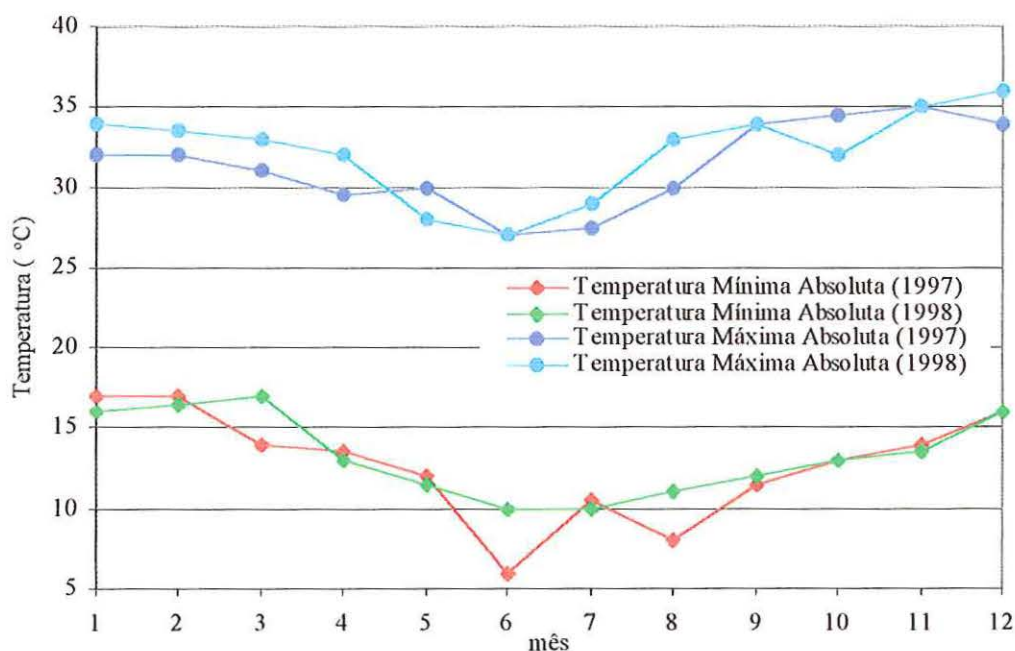


FIGURA A6 – Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta do estado de São Paulo durante os períodos de 1997 e de 1998

TABELA A7 - Temperaturas mínima e máxima - Período: 1999

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)
1. JANEIRO	19,5	31,5
2. FEVEREIRO	19,0	31,5
3. MARÇO	18,0	30,0
4. ABRIL	16,5	27,5
5. MAIO	12,5	24,0
6. JUNHO	12,0	23,0
7. JULHO	12,5	24,5
8. AGOSTO	11,5	26,0
9. SETEMBRO	14,5	25,0
10. OUTUBRO	14,0	23,5
11. NOVEMBRO	14,5	25,0
12. DEZEMBRO	18,5	28,0

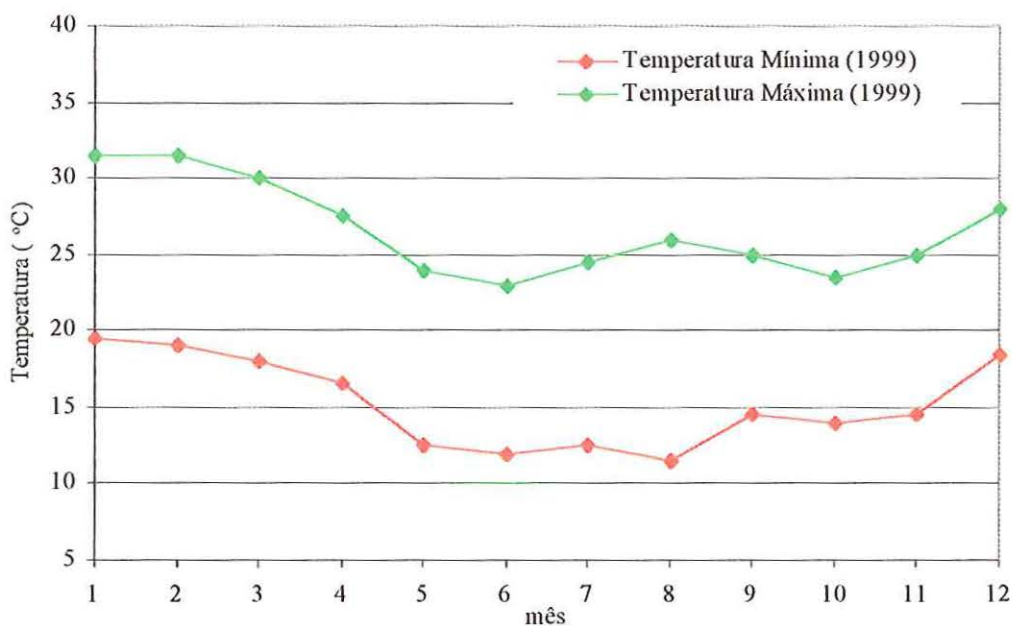
**FIGURA A7 – Temperaturas mínima e máxima do estado de São Paulo durante o período de 1999**

TABELA A8 - Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta - Período: 1999

MÊS	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)
1. JANEIRO	17,0	37,0
2. FEVEREIRO	17,5	33,5
3. MARÇO	16,0	34,0
4. ABRIL	7,0	33,5
5. MAIO	6,5	29,5
6. JUNHO	8,0	28,0
7. JULHO	9,0	30,0
8. AGOSTO	5,0	33,0
9. SETEMBRO	9,0	33,5
10. OUTUBRO	10,5	33,0
11. NOVEMBRO	11,0	32,0
12. DEZEMBRO	16,5	33,0

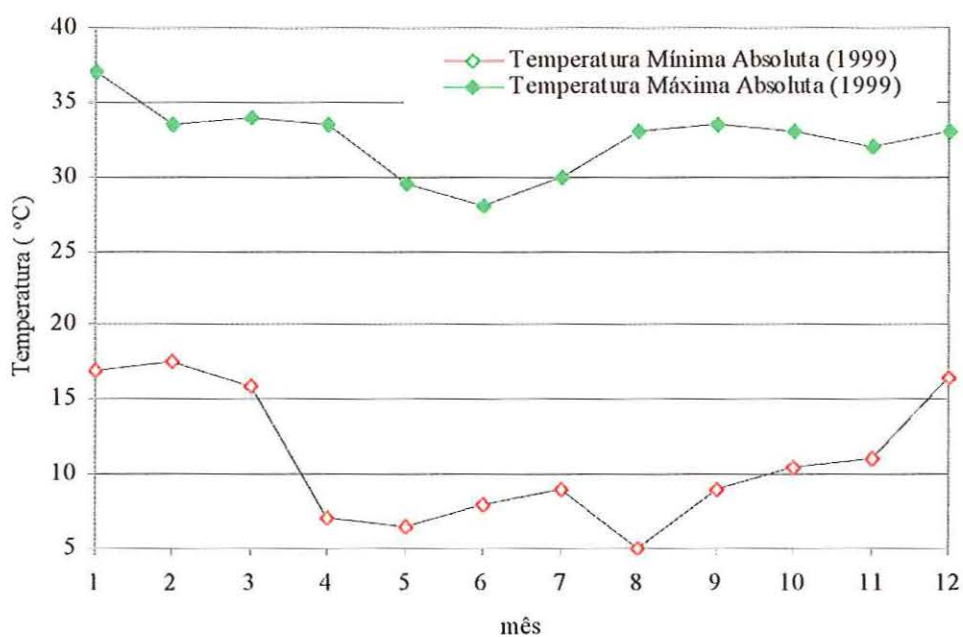


FIGURA A8 – Temperaturas mínima absoluta e máxima absoluta do estado de São Paulo durante o período de 1999

ANEXO B

PROCESSO RELASTOMER®

EMPRESA RELASTOMER TECNOLOGIA E PARTICIPAÇÕES S.A.

B1 - Os SISTEMAS

Basicamente, os sistemas empregados nos processos de regeneração de borrachas vulcanizadas, desenvolvidos pela Relastomer, são:

- sistema de quebra de pneus
- sistema de alimentação da matéria-prima
- sistema de intumescimento
- sistema de moagem/quebra
- sistema de filtração
- sistema de secagem
- sistema de vácuo
- sistema de água de resfriamento
- sistema de solvente
 - recuperação de solventes; de água; de vapor
 - estocagem de produtos químicos
 - exaustão/ventilação
- sub-sistema elétrico
- sub-sistema de instrumentação

B2 - UMA APRESENTAÇÃO

Para as unidades industriais, a Marobrás, uma fabricante de equipamentos e sistemas para mineração e britagem, e a Relastomer desenvolveram os projetos, e estão fornecendo a totalidade dos sistemas, onde se incluem para uma unidade de 4000 ton/ano:

- 3 vasos secadores - capacidade unitária de 8000 litros
- 2 transportadores helicoidais - capacidade unitária de 8 m³/hora
- 3 transportadores de correias - capacidade unitária de 6 a 12 m³/hora
- 3 SKIDs completos de moagem e peneiramento
- 1 SKID completo de moagem, peneiramento e separação de elementos de reforços
- 3 trocadores de calor

- 9 cabeçotes filtrantes, incluindo 18 refis
- 2 vasos de intumescimento - capacidade unitária de 36 m³
- 1 tanque de estocagem
- 1 sistema de lavagem inicial das aparas de pneus
- silos de produto final
- transportadores de correias
- bombas
- válvulas especiais
- elétrica
- instrumentação

B3 - UNIDADES E ITENS ACESSÓRIOS

B3.1 - moinho de quebra de pneus (fixo à unidade ou em unidade móvel, que atende aos locais de coleta)

B3.2 - sistema de armazenagem e de recuperação de solvente:

- tanques
- bombas
- trocadores de calor
- bombas de vácuo

B3.3 - sistema de vapor:

- caldeira
- torre de resfriamento
- tanques
- bombas

B3.4 - elétrica + instrumentação

B3.5 - balança

B3.6 - ventilação e exaustão do galpão

B3.7 - combate a incêndio

B3.8 - laboratório

B4 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO

- B4.1 - O material (pneus picados) a ser processado é descarregado em pátio concretado e descoberto.
- B4.2 - Um transportador de correias é alimentado manualmente ou com um "bob-cat", elevando o material até a peneira vibratória de lavagem.
- B4.3 - O material é lavado com jatos de água sob pressão. Após a secagem, o material retido na peneira (pneus picados) cai em um silo. O material passante com a água (sujeira) é descartado periodicamente. A operação da peneira sobre a piscina permite o reaproveitamento da água de lavagem.
- B4.4 - O silo alimenta um transportador helicoidal, até o vaso de intumescimento.
- B4.5 - No vaso de intumescimento, o material é intumescido pela ação do solvente, durante aproximadamente 4 horas. O vaso possui trocador de calor externo com circulação de vapor, que garante a operação em torno de 80°C. O vaso possui sistema de revolvimento interno.
- B4.6 - O material intumescido a quente passa, então, para o vaso de resfriamento, que opera a temperatura ambiente.
- B4.7 - Deste estágio, o material intumescido é levado por outro transportador helicoidal até o 1º SKID de moagem, onde o material é primeiramente moído, passando depois por um separador magnético e por uma peneira vibratória. O material que já atingiu a granulometria desejada é transportado para o vaso intermediário. O material não passante é conduzido para o 2º SKID, e assim sucessivamente. Neste estágio também se processa a separação dos arames de aço e do cordonel de nylon.
- B4.8 - O material contido no vaso intermediário é então processado em 3 bombas de alta pressão e seus respectivos cabeçotes filtrantes, onde atinge a granulometria específica e final do processo.

B4.9 - O material, ainda úmido, passa então pelos vasos secadores, onde é retirado o restante do veículo de intumescimento, seguindo para o silo de produto acabado.

* Todos os equipamentos, a partir do vaso de intumescimento, são encapuzados, possibilitando a recuperação do solvente evaporado.

* Todos os motores, transmissões e interligações são a prova de explosão, e resistentes ao veículo de intumescimento.

B5 - UNIDADE DE REGENERAÇÃO DE PNEUMÁTICOS

B5.1 - pátio de aparas de pneus

B5.2 - TC móvel entre o pátio de aparas e a peneira de lavagem

B5.3 - Peneira vibratória de lavagem:

- montada sobre uma "piscina", possibilita circulação de água (lavagem)
- com sprinklers de lavagem e sopradores de ar de secagem.

B5.4 - Silinho intermediário de estocagem de aparas lavadas

B5.5 - TH entre o silinho e o 1º vaso de intumescimento

B5.6 - 1º vaso de intumescimento

B5.7 - TH entre o 1º e o 2º vaso de intumescimento

B5.8 - 2º vaso de intumescimento

B5.9 - TH entre o 2º vaso de intumescimento e o 1º SKID de moagem

B5.10 - Conjunto de 3 SKIDs de moagem + separação de reforços (cordonéis de aço e nylon) + peneiramento

B5.11 - TC entre o 3º SKID e o vaso intermediário

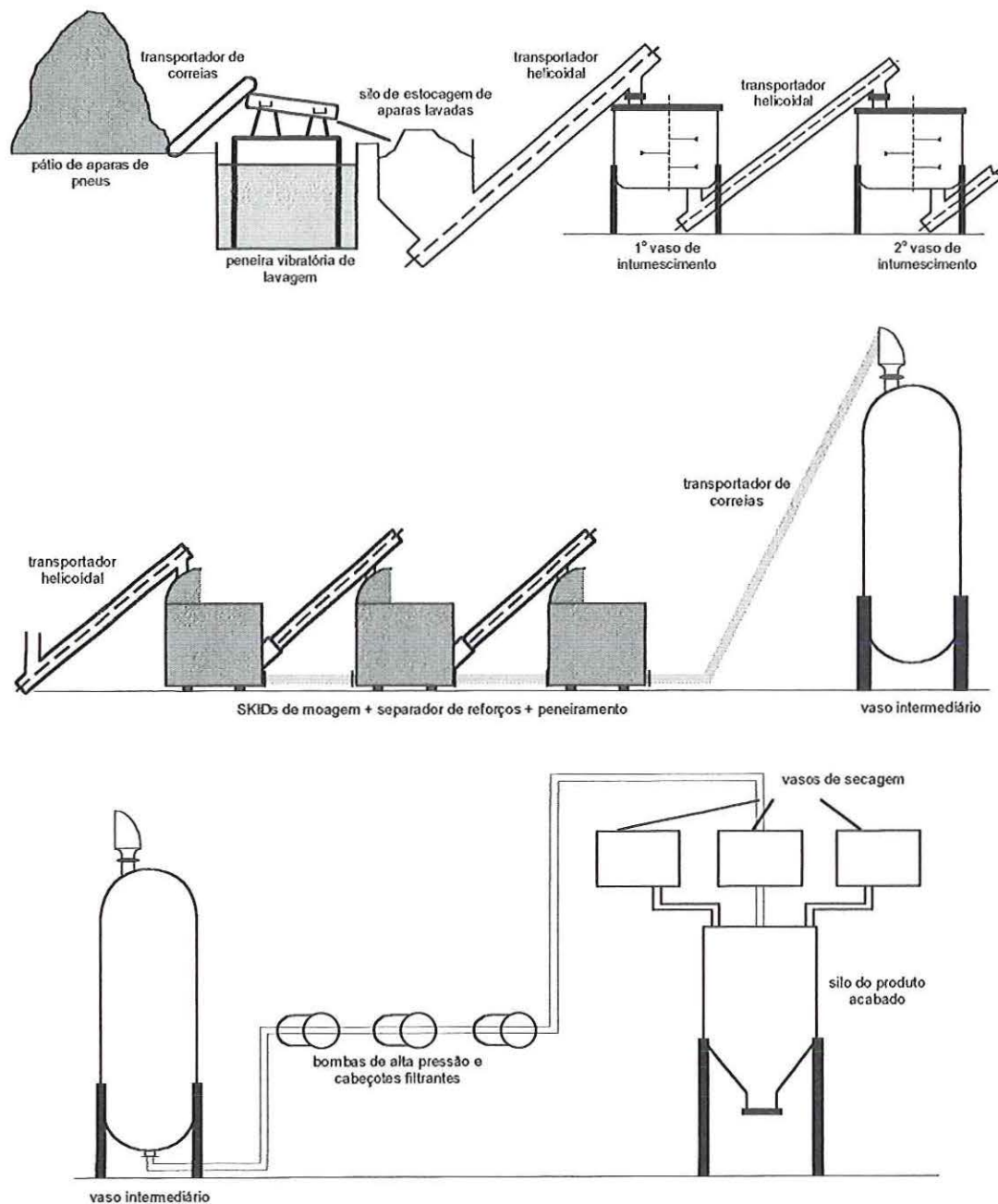
B5.12 - Vaso intermediário

B5.13 - Conjunto de 3 bombas de alta pressão e cabeçotes filtrantes

B5.14 - Conjunto de 3 vasos de secagem

B5.15 - Silo do produto acabado

B6 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO - PROCESSO RELASTOMER



ANEXO C – DETALHES DOS ENSAIOS SUPERPAVE

CÁLCULO DA RIGIDEZ, $S(t)$, e do MÓDULO DE RELAXAÇÃO, m

Os gráficos de carga e de deflexão *versus* tempo de carregamento são usados para a determinação da rigidez S e do módulo de relaxação m (“creep rate”), que representa a variação da rigidez em função do tempo de carregamento, $S(t)$.

PROCEDIMENTO DE CÁLCULOS

C1 - Deflexão de uma Viga Elástica

Usando os fundamentos da mecânica, a deflexão no ponto médio de uma viga prismática de asfalto (elástica) submetida a carregamento constante na seção transversal, em três pontos, pode ser obtida aplicando-se as seguintes equações:

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

onde:

δ = deflexão no ponto médio da viga, mm

P = carga aplicada, N

L = comprimento da viga, mm

E = módulo de elasticidade, MPa

I = momento de inércia, mm⁴

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

onde:

I = momento de inércia da seção transversal da viga, mm^4

b = largura da viga, mm

h = espessura da viga, mm

C2 - Módulo de Fluência Elástica

De acordo com a teoria elástica, o Módulo de Fluência Elástica de uma viga prismática submetida a um carregamento constante no seu ponto médio é obtido da seguinte forma:

$$E = \frac{PL^3}{4bh^3\delta}$$

onde:

E = rigidez, MPa

P = carga aplicada, N

L = comprimento da viga, mm

b = largura da viga, mm

h = espessura da viga, mm

δ = deflexão da viga, mm

C3 - Deflexão Máxima

$$\delta = \frac{3PL}{2bh^2}$$

onde:

δ = máxima deflexão da viga, mm

P = carga aplicada, N

L = comprimento da viga, mm

b = largura da viga, mm

h = espessura da viga, mm

C4 - Deformação Máxima

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \text{ mm/mm}$$

onde:

ε = máxima deformação da viga, mm/mm

δ = deflexão da viga, mm

h = espessura da viga, mm

L = comprimento da viga, mm

C5 - Rigidez de Ligantes Asfálticos, S

Os resultados do ensaio BBR (Rigidez à Fluência na Flexão) com a viga são apresentados em gráficos de tempo de carregamento *versus* carga e tempo de carregamento *versus* deflexão (Figura C1).

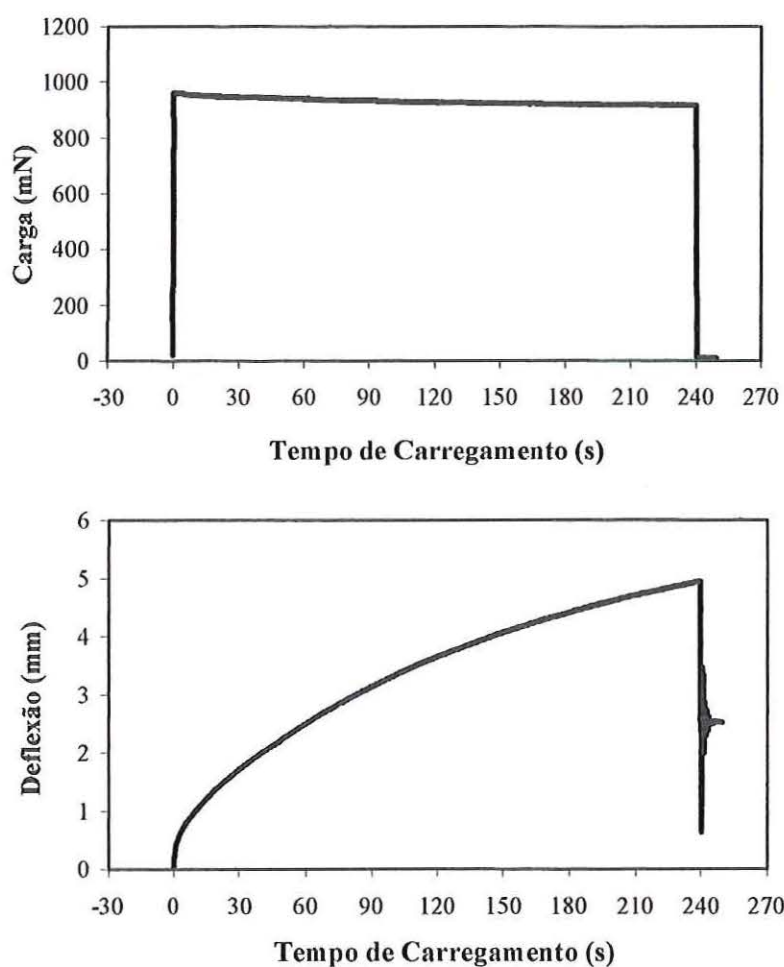


FIGURA C1: Exemplo de gráficos com resultados do ensaio BBR

Considerando o intervalo de tempo de 8 a 240 segundos, os dados plotados nos gráficos da Figura C1 podem ser representados por um polinômio de segunda ordem:

$$\log S(t) = A + B[\log (t)] + C[\log(t)]^2$$

onde:

$S(t)$ = rigidez em MPa

t = tempo em segundos

A, B e C = coeficientes de regressão

Segundo o princípio de equivalência elástico-viscoelástico, pode-se assumir que se uma viga viscoelástica linear é submetida a uma carga constante em $t=0$, a distribuição de tensão é a mesma que em uma viga elástica linear submetida a mesma carga. As deformações e os deslocamentos dependem do tempo e a rigidez é obtida da seguinte forma:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3 \delta(t)}$$

onde:

$S(t)$ = rigidez, MPa (varia em função do tempo)

P = carga aplicada, N

L = comprimento da viga, mm

b = largura da viga, mm

h = espessura da viga, mm

$\delta(t)$ = deflexão da viga, mm (varia em função do tempo)

C6 - Módulo de Relaxação, m

O valor absoluto de m (módulo de relaxação) pode ser obtido pela derivada do logaritmo da rigidez pelo logaritmo do tempo de carregamento, ou seja,

$$|m(t)| = d \left[\frac{\log S(t)}{\log (t)} \right] = B + 2C [\log (t)]$$

ou, ainda, através da determinação dos coeficientes de regressão e dos valores de S em função dos resultados apresentados nos gráficos gerados pelo ensaio com o BBR.

$$m = B + 2C \cdot [\log(t)]$$

onde:

$$A = [S_y \cdot (S_{x2} \cdot S_{x4} - S_{x3}^2) - S_{xy} \cdot (S_{x1} \cdot S_{x4} - S_{x2} \cdot S_{x3}) + S_{xxy} \cdot (S_{x1} \cdot S_{x3} - S_{x2}^2)]/D$$

$$B = [6 \cdot (S_{xy} \cdot S_{x4} - S_{xxy} \cdot S_{x3}) - S_{x1} \cdot (S_y \cdot S_{x4} - S_{xxy} \cdot S_{x2}) + S_{x2} \cdot (S_y \cdot S_{x3} - S_{xy} \cdot S_{x2})]/D$$

$$C = [6 \cdot (S_{x2} \cdot S_{xxy} - S_{x3} \cdot S_{xy}) - S_{x1} \cdot (S_{x1} \cdot S_{xxy} - S_{x3} \cdot S_y) + S_{x2} \cdot (S_{x1} \cdot S_{xy} - S_{x2} \cdot S_y)]/D$$

$$D = 6 \cdot (S_{x2} \cdot S_{x4} - S_{x3}^2) - S_{x1} \cdot (S_{x1} \cdot S_{x4} - S_{x2} \cdot S_{x3}) + S_{x2} \cdot (S_{x1} \cdot S_{x3} - S_{x2}^2)$$

$$S_{x1} = \log 8 + \log 15 + \log 30 + \log 60 + \log 120 + \log 240$$

$$S_{x2} = (\log 8)^2 + (\log 15)^2 + (\log 30)^2 + (\log 60)^2 + (\log 120)^2 + (\log 240)^2$$

$$S_{x3} = (\log 8)^3 + (\log 15)^3 + (\log 30)^3 + (\log 60)^3 + (\log 120)^3 + (\log 240)^3$$

$$S_{x4} = (\log 8)^4 + (\log 15)^4 + (\log 30)^4 + (\log 60)^4 + (\log 120)^4 + (\log 240)^4$$

$$S_y = \log S(8) + \log S(15) + \log S(30) + \log S(60) + \log S(120) + \log S(240)$$

$$S_{xy} = \log S(8) \cdot \log 8 + \log S(15) \cdot \log 15 + \log S(30) \cdot \log 30 + \log S(60) \cdot \log 60 + \\ + \log S(120) \cdot \log 120 + \log S(240) \cdot \log 240$$

$$S_{xxy} = \log S(8) \cdot (\log 8)^2 + \log S(15) \cdot (\log 15)^2 + \log S(30) \cdot (\log 30)^2 + \\ + \log S(60) \cdot (\log 60)^2 + \log S(120) \cdot (\log 120)^2 + \log S(240) \cdot (\log 240)^2$$

ANEXO D – EXEMPLO DE CÁLCULO – DETERMINAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO

Resultados do Ensaio DSR com ligante virgem: valores de G*

	b ₁				b ₂				Σ
	c ₁		c ₂		c ₁		c ₂		
	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	
a ₁	2548	2574	2776	2290	2958	2919	2867	2855	21787
a ₂	3750	3944	5544	5266	5734	5358	5223	3191	38010
a ₃	8914	8901	7419	7573	9213	8974	6733	6709	64436
Σ	15212	15419	15739	15129	17905	17251	14823	12755	124233

= r ₁ ²	6,49x10 ⁶	6,63 x10 ⁶	7,71x10 ⁶	5,24x10 ⁶	8,75x10 ⁶	8,52x10 ⁶	8,22x10 ⁶	8,15x10 ⁶	5,97x10 ⁷
	1,41x10 ⁷	1,56x10 ⁷	3,07x10 ⁷	2,77x10 ⁷	3,29x10 ⁷	2,87x10 ⁷	2,73x10 ⁷	1,02x10 ⁷	1,87x10 ⁸
	7,95x10 ⁷	7,92x10 ⁷	5,50x10 ⁷	5,74x10 ⁷	8,49x10 ⁷	8,05x10 ⁷	4,53x10 ⁷	4,50x10 ⁷	5,27x10 ⁸
	1,00x10 ⁸	1,01x10 ⁸	9,35x10 ⁷	9,03x10 ⁷	1,27x10 ⁸	1,18x10 ⁸	8,08x10 ⁷	6,33x10 ⁷	7,74x10 ⁸

= Σ (r₁²)

	SQ	COEF.	GL	QM	F
C	6,43 x10 ⁸				
SQ(AI)	1,14 x10 ⁸	2665,56	1	1,14 x10 ⁸	363,98*
SQ(Aq)	2,17 x10 ⁶	212,56	1	2,17 x10 ⁶	6,94
SQ(B)	6,36 x10 ⁴	-51,46	1	6,36 x10 ⁴	0,20
SQ(C)	2,25 x10 ⁶	305,88	1	2,25 x10 ⁶	7,19
SQ(AIB)	4,19 x10 ⁵	-161,81	1	4,19 x10 ⁵	1,34
SQ(AqB)	6,53 x10 ⁴	-36,90	1	6,53 x10 ⁴	0,21
SQ(AIC)	3,38 x10 ⁶	-459,81	1	3,38 x10 ⁶	10,83*
SQ(AqC)	1,56 x10 ⁶	-180,31	1	1,56 x10 ⁶	5,00
SQ(BC)	2,54 x10 ⁶	-325,63	1	2,54 x10 ⁶	8,15
Réplica	4,07 x10 ⁵		1	4,07 x10 ⁵	1,30
Resíduo	4,06 x10 ⁶		13	3,12 x10 ⁵	
SQtotal	1,31 x10 ⁸	5176,38	23	5,67 x10 ⁶	18,18*

Teste F de Snedecor

*Significância de 1%

a) Soma de Quadrados Total

$$SQ_{\text{total}} = \sum x^2 - C = 7,74 \times 10^8 - 6,43 \times 10^8 = 1,31 \times 10^8$$

$$C = \frac{(\sum x)^2}{n} = \frac{(124233)^2}{24} = 6,43 \times 10^8$$

$$\text{COEF.} = \frac{\sum x}{n} = \frac{124233}{24} = 5176,4$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{1,31 \times 10^8}{23} = 5678307$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{5678307}{312335} = 18,2$$

b) Fator A

A soma de quadrados da componente linear do Fator A é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{A,l} = \frac{(a_3 - a_1)^2}{r \cdot a'' \cdot b' \cdot c'} = \frac{(64436 - 21787)^2}{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2} = 1,14 \times 10^8$$

onde:

a_1 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível inferior

a_3 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível superior

r \equiv número de réplicas = 2

$a'' = \sum c_j = (-1)^2 + (+1)^2 = 2$

b', c' \equiv número de níveis dos fatores b, c $\rightarrow b' = c' = 2$

$$\text{COEF.} = \frac{a_3 - a_1}{r \cdot a'' \cdot b' \cdot c'} = \frac{64436 - 21787}{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2} = 2665,6$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{1,14 \times 10^8}{1} = 1,14 \times 10^8$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{1,14 \times 10^8}{312335} = 363,98$$

A soma de quadrados da componente quadrática do Fator A é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{A,q} = \frac{(a_1 - 2a_2 + a_3)^2}{r \cdot c'' \cdot a' \cdot b'} = \frac{(21787 - 2 \cdot 38010 + 64436)^2}{2 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 2} = 2,17 \times 10^6$$

onde:

a_1 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível inferior

a_2 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível intermediário

a_3 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível superior

$$c'' = \sum c_j = (-1)^2 + (-2)^2 + (+1)^2 = 6$$

$$a' = 2$$

$$b' = 2$$

$$COEF. = \frac{a_1 - 2a_2 + a_3}{r \cdot c'' \cdot a' \cdot b'} = \frac{21787 - 2 \cdot 38010 + 64436}{2 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 2} = 212,6$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{2,17 \times 10^6}{1} = 2,17 \times 10^6$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{2,17 \times 10^6}{312335} = 6,94$$

c) Fator B

$$SQ_B = \frac{(b_2 - b_1)^2}{r \cdot a'' \cdot a' \cdot c'} = \frac{(62734 - 61499)^2}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2} = 6,34 \times 10^4$$

onde:

b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B apresenta o nível inferior

b_2 \equiv somatório das observações em que o fator B apresenta o nível superior

$$r = 2$$

$$a'' = 2$$

$$a' = 3$$

$$c' = 2$$

$$COEF. = \frac{b_2 - b_1}{r \cdot a'' \cdot a' \cdot c'} = \frac{62734 - 61499}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2} = 51,46$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{6,36 \times 10^4}{1} = 6,36 \times 10^4$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{6,36 \times 10^4}{312335} = 0,20$$

d) Fator C

$$SQ_B = \frac{(c_2 - c_1)^2}{r \cdot a'' \cdot a' \cdot c'} = \frac{(58446 - 65787)^2}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2} = 2,25 \times 10^6$$

onde:

$$c_1 \equiv \text{somatório das observações em que o fator C apresenta o nível inferior} = 15212 + 15419 + 17905 + 17251 = 65787$$

$$c_2 \equiv \text{somatório das observações em que o fator C apresenta o nível superior} = 15739 + 15219 + 14823 + 12755 = 58446$$

$$r = 2$$

$$a'' = 2$$

$$a' = 3$$

$$b' = 2$$

$$\text{COEF.} = \frac{b_2 - b_1}{r \cdot a'' \cdot a' \cdot c'} = \frac{58446 - 65787}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2} = -305,9$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{2,25 \times 10^6}{1} = 2,25 \times 10^6$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{2,25 \times 10^6}{312335} = 7,19$$

e) Interação entre os Fatores A, B e C

As somas de quadrados da componente linear das interações podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$SQ_{AB,1} = \frac{(a_3b_2 - a_1b_2 - a_3b_1 + a_1b_1)^2}{r \cdot (ab_1)'' \cdot c'}$$

$$SQ_{AB,1} = \frac{(31629 - 11599 - 32807 + 10188)^2}{2 \cdot 4 \cdot 2} = 4,19 \times 10^5$$

onde:

$$a_3b_2 \equiv \text{somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível superior} = 9213 + 8974 + 6733 + 6709 = 31629$$

$$a_1b_2 \equiv \text{somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível inferior} = 2958 + 2919 + 2867 + 2855 = 11599$$

a_3b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível superior = $8914+8901+7419+7573 = 32807$

a_1b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível inferior = $2548+2574+2776+2290 = 10188$

$$(ab_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$\text{COEF.} = \frac{a_3b_2 - a_1b_2 - a_3b_1 + a_1b_1}{r.(ab_1)'' . c'} = \frac{31629 - 11599 - 32807 + 10188}{2.4.2} = -161,81$$

$$\text{QM} = \frac{\text{SQ}}{\text{GL}} = \frac{4,19 \times 10^5}{1} = 4,19 \times 10^5$$

$$F = \frac{\text{QM}}{\text{QM}_{\text{residuo}}} = \frac{4,19 \times 10^5}{312335} = 1,34$$

$$\text{SQ}_{AC,1} = \frac{(a_3c_2 - a_1c_2 - a_3c_1 + a_1c_1)^2}{r.(ac_1)'' . b'}$$

$$\text{SQ}_{AC,1} = \frac{(28434 - 10788 - 17948 + 10999)^2}{2.4.2} = 3,38 \times 10^6$$

onde:

a_3c_2 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível superior = $7419+7573+6733+6709 = 28434$

a_1c_2 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível inferior = $2776+2290+2867+2855 = 10788$

a_3c_1 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível superior = $8914+8901+9213+8974 = 17948$

a_1c_1 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível inferior = $2548+2574+2958+2919 = 10999$

$$(ac_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$\text{COEF.} = \frac{a_3c_2 - a_1c_2 - a_3c_1 + a_1c_1}{r.(ac_1)'' . b'}$$

$$\text{COEF.} = \frac{28434 - 10788 - 17948 + 10999}{2.4.2} = -459,81$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{3,38 \times 10^6}{1} = 3,38 \times 10^6$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{3,38 \times 10^6}{312335} = 10,83$$

As somas de quadrados da componente quadrática das interações podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$SQ_{AB,q} = \frac{(a_3b_2 - 2a_2b_2 + a_1b_2 - a_3b_1 + 2a_2b_1 + a_1b_1)^2}{r.(ab_q)'' . c'}$$

$$SQ_{AB,q} = \frac{(31629 - 2.19506 + 11599 - 32807 + 2.18504 + 10188)^2}{2.12.2} = 6,53 \times 10^4$$

onde:

a_2b_2 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível intermediário = 5734+5358+5223+3191 = 19506

a_2b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível intermediário = 3750+3944+5544+5266 = 18504

$$(ab_q)'' = \sum c_j = (-1.+1)^2 + (-1.-2)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.+1)^2 + (+1.-2)^2 + (+1.+1)^2 = 12$$

$$COEF. = \frac{a_3b_2 - 2a_2b_2 + a_1b_2 - a_3b_1 + 2a_2b_1 + a_1b_1}{r.(ab_q)'' . c'}$$

$$COEF. = \frac{31629 - 2.19506 + 11599 - 32807 + 2.18504 + 10188}{2.12.2} = -36,90$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{6,53 \times 10^4}{1} = 6,53 \times 10^4$$

$$F = \frac{QM}{QM_{\text{resíduo}}} = \frac{6,53 \times 10^4}{312335} = 0,21$$

$$SQ_{AC,q} = \frac{(a_3c_2 - 2a_2c_2 + a_1c_2 - a_3c_1 + 2a_2c_1 + a_1c_1)^2}{r.(ac_q)'' . b'}$$

$$SQ_{AC,q} = \frac{(28434 - 2.19224 + 10788 - 17948 + 2.18786 + 10999)^2}{2.12.2} = 1,56 \times 10^6$$

onde:

a_2c_2 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível intermediário = $5544+5266+5223+3191 = 19224$

a_2c_1 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível intermediário = $3750+3944+5734+5358 = 18786$

$$(ac_q)'' = \sum c_j = (-1.+1)^2 + (-1.-2)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.+1)^2 + (+1.-2)^2 + (+1.+1)^2 = 12$$

$$COEF. = \frac{a_3c_2 - 2a_2c_2 + a_1c_2 - a_3c_1 + 2a_2c_1 + a_1c_1}{r.(ac_q)'' . b'}$$

$$COEF. = \frac{28434 - 2.19224 + 10788 - 17948 + 2.18786 + 10999}{2.12.2} = -180,31$$

$$QM = \frac{SQ}{GL} = \frac{1,56 \times 10^6}{1} = 1,56 \times 10^6$$

$$F = \frac{QM}{QM_{residuo}} = \frac{1,56 \times 10^6}{312335} = 5,00$$

$$SQ_{BC} = \frac{(b_2c_2 - b_1c_2 - b_3c_1 + b_1c_1)^2}{r.(bc_1)'' . a'}$$

$$SQ_{BC} = \frac{(30631 - 30958 - 35156 + 27578)^2}{2.4.3} = 2,54 \times 10^6$$

onde:

b_2c_2 \equiv somatório das observações em que os fatores B e C estão presentes = $15212+15419 = 30631$

b_1c_2 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator C não = $15739+15219 = 30958$

b_2c_1 \equiv somatório das observações em que o fator C está presente e o fator B não = $17905+17251 = 35156$

b_1c_1 \equiv somatório das observações em que nem o fator B nem o fator C estão presentes = $14823+12755 = 27578$

$$(bc_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$\text{COEF.} = \frac{b_2c_2 - b_1c_2 - b_3c_1 + b_1c_1}{r \cdot (bc_1)^n \cdot a'}$$

$$\text{COEF.} = \frac{30631 - 30958 - 35156 + 27578}{2 \times 4 \times 3} = -325,63$$

$$\text{QM} = \frac{\text{SQ}}{\text{GL}} = \frac{2,54 \times 10^6}{1} = 2,54 \times 10^6$$

$$F = \frac{\text{QM}}{\text{QM}_{\text{resíduo}}} = \frac{2,54 \times 10^6}{312335} = 8,15$$

f) Réplica

$$\text{SQ} = \frac{((\sum r_1) - (\sum r_2))^2}{r \cdot a' \cdot b' \cdot c'} = \frac{(63679 - 60554)^2}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2} = 4,07 \times 10^5$$

onde:

$$\begin{aligned} \sum r_1 &\equiv \text{somatório das observações da réplica 1} = 15212 + 15739 + 17905 + 14823 \\ &= 63679 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum r_2 &\equiv \text{somatório das observações da réplica 2} = 15419 + 15129 + 17251 + 12755 \\ &= 60554 \end{aligned}$$

$$\text{QM} = \frac{\text{SQ}}{\text{GL}} = \frac{4,07 \times 10^5}{1} = 4,07 \times 10^5$$

$$F = \frac{\text{QM}}{\text{QM}_{\text{resíduo}}} = \frac{4,07 \times 10^5}{312335} = 1,30$$

Portanto, o modelo estatístico do módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento é o seguinte:

$$Y = 5176,38 + 2665,56B_1 - 459,81B_1T$$

E o coeficiente de determinação é determinado da seguinte forma:

$$R^2 = \frac{\text{SQ}_{\text{modelo}}}{\text{SQ}_{\text{total}}} = \frac{\sum \text{SQ}_i}{\text{SQ}_{\text{total}}} = \frac{1,14 \times 10^8 + 3,38 \times 10^6}{1,31 \times 10^8} = 0,90$$

$$R^2 = 0,90$$

ANEXO E – RESULTADOS DOS ENSAIOS

E1 - PENETRAÇÃO

AMOSTRA	PENETRAÇÃO (1/10mm)			
	RÉPLICA 1	RÉPLICA 2	RÉPLICA 3	MÉDIA
1	59	60	60	59,7
2	46	47	46	46,3
3	51	52	51	51,3
4	49	49	49	49,0
5	48	47	49	48,0
6	47	48	46	47,0
7	40	41	39	40,0
8	43	44	42	43,0
9	48	46	47	47,0
10	47	46	46	46,3
11	48	49	50	49,0
12	46	47	46	46,3
13	41	39	39	39,7
14	39	40	42	40,3
15	36	36	38	36,7
16	35	36	37	36,0
17	42	42	41	41,7

E2 - PONTO DE FULGOR

AMOSTRA	PONTO DE FULGOR (°C)			
	RÉPLICA 1	RÉPLICA 2	RÉPLICA 3	MÉDIA
1	315	319	317	317
2	297	293	292	294
3	290	291	292	291
4	300	299	298	299
5	294	295	290	293
6	298	297	299	298
7	308	306	310	308
8	294	296	292	294
9	304	305	303	304
10	296	295	291	294
11	295	298	301	298
12	295	297	296	296
13	278	279	277	278
14	266	264	265	265
15	284	283	282	283
16	281	280	282	281
17	289	287	291	289

E3 - PONTO DE AMOLECIMENTO

AMOSTRA	PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)			
	RÉPLICA 1	RÉPLICA 2	RÉPLICA 3	MÉDIA
1	57	59	58	58,0
2	60	62	61	61,0
3	59	59	58	58,5
4	60	59	61	60,0
5	65	64	66	65,0
6	66	66	65	65,5
7	64	64	64	64,0
8	64	63	61	62,5
9	61	60	61	60,5
10	68	67	66	67,0
11	64	66	65	65,0
12	57	56	58	57,0
13	52	54	50	52,0
14	54	55	53	54,0
15	55	56	54	55,0
16	53	55	54	54,0
17	51	52	50	51,0

E4 - VISCOSIDADE BROOKFIELD – ASTM D6114-97

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
1	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	7,5	250,0	34,9	13,9	175
	15	7,5	250,0	34,9	13,9	175
	15	7,5	250,0	34,9	13,9	175
MÉDIA	15	7,5	250,0	34,9	13,9	175
	20	9,7	243,1	45,0	18,6	175
	20	9,7	243,1	45,0	18,6	175
	20	9,6	242,4	44,8	18,6	175
MÉDIA	20	9,7	242,9	44,9	18,6	175
	30	14,0	233,3	65,1	27,9	175
	30	14,0	233,3	65,1	27,9	175
	30	13,9	231,7	64,6	27,9	175
MÉDIA	30	14,0	232,8	64,9	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
2	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	23,5	783,3	109,3	13,9	175
	15	23,1	770,0	107,4	13,9	175
	15	22,9	763,3	106,5	13,9	175
MÉDIA	15	23,2	772,2	107,7	13,9	175
	20	28,2	719,0	131,3	18,6	175
	20	27,9	711,2	129,6	18,6	175
	20	27,6	703,1	128,5	18,6	175
MÉDIA	20	27,9	711,1	129,8	18,6	175
	30	37,7	628,3	175,3	27,9	175
	30	37,4	628,3	173,9	27,9	175
	30	37,1	618,3	172,5	27,9	175
MÉDIA	30	37,4	625,0	173,9	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
3	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	15,5	516,7	72,1	13,9	175
	15	15,5	516,7	72,1	13,9	175
	15	15,5	516,7	72,1	13,9	175
MÉDIA	15	15,5	516,7	72,1	13,9	175
	20	19,4	495,0	92,1	18,6	175
	20	19,6	490,0	91,1	18,6	175
	20	19,4	485,0	90,2	18,6	175
MÉDIA	20	19,5	490,0	91,1	18,6	175
	30	27,4	456,7	127,4	27,9	175
	30	27,3	455,0	126,9	27,9	175
	30	27,2	453,3	126,5	27,9	175
MÉDIA	30	27,3	455,0	126,9	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
4	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	5,7	190,0	26,5	13,9	175
	15	5,7	190,0	26,5	13,9	175
	15	5,7	190,0	26,5	13,9	175
MÉDIA	15	5,7	190,0	26,5	13,9	175
	20	9,4	235,0	43,7	18,6	175
	20	9,3	232,5	43,2	18,6	175
	20	9,2	230,0	42,8	18,6	175
MÉDIA	20	9,3	232,5	43,2	18,6	175
	30	11,2	186,7	52,1	27,9	175
	30	11,1	185,0	51,6	27,9	175
	30	11,2	186,7	52,1	27,9	175
MÉDIA	30	11,2	186,1	51,9	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
5	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	42,4	7067	197,2	2,8	175
	3	42,1	7017	195,8	2,8	175
	3	41,9	6983	194,8	2,8	175
MÉDIA	3	42,1	7022,3	195,9	2,8	175
	6	58,1	4842	270,2	5,6	175
	6	58,2	4850	270,6	5,6	175
	6	57,4	4783	266,9	5,6	175
MÉDIA	6	57,9	4825,0	269,2	5,6	175
	12	84,8	3533	394,3	11,2	175
	12	85,1	3546	395,7	11,2	175
	12	84,2	3508	391,5	11,2	175
MÉDIA	12	84,7	3529,0	393,8	11,2	175
	20		2078,3		18,6	175
	20		2123,2		18,6	175
	20		2073,3		18,6	175
MÉDIA	20		2091,5		18,6	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
6	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	6	38,3	3192,0	178,1	5,6	175
	6	38,8	3233,0	180,4	5,6	175
	6	37,6	3133,0	174,8	5,6	175
MÉDIA	6	38,2	3186,0	177,8	5,6	175
	12	65,0	2708,0	302,3	11,2	175
	12	63,5	2646,0	295,3	11,2	175
	12	64,6	2692,0	300,4	11,2	175
MÉDIA	12	64,4	2682,0	299,3	11,2	175
	20	100,6	2351,3	467,9	18,7	175
	20	95,5	2183,8	444,1	18,7	175
	20	98,0	2287,1	456,0	18,7	175
MÉDIA	20	98,0	2274,1	456,0	18,7	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
7	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	25,6	853,3	119,0	13,9	175
	15	25,4	846,7	118,1	13,9	175
	15	25,0	833,3	116,3	13,9	175
MÉDIA	15	25,3	844,4	117,8	13,9	175
	20	30,7	796,1	142,7	18,6	175
	20	30,4	789,5	141,5	18,6	175
	20	30,0	777,8	139,5	18,6	175
MÉDIA	20	30,4	787,8	141,2	18,6	175
	30	40,9	681,7	190,2	27,9	175
	30	40,5	675,0	188,3	27,9	175
	30	40,0	666,7	186,0	27,9	175
MÉDIA	30	40,5	674,5	188,2	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
8	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	28	933,3	130,2	13,9	175
	15	27,8	926,7	129,3	13,9	175
	15	27,6	920,0	128,3	13,9	175
MÉDIA	15	27,8	926,7	129,3	13,9	175
	20	39,2	980,0	182,3	18,6	175
	20	38,2	955,0	177,6	18,6	175
	20	37,3	932,5	173,4	18,6	175
MÉDIA	20	38,2	955,8	177,8	18,6	175
	30	75	1250,0	348,7	27,9	175
	30	73,6	1227,0	342,2	27,9	175
	30	72,9	1215,0	339,0	27,9	175
MÉDIA	30	73,8	1230,7	343,3	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
9	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	7,3	243,3	33,9	13,9	175
	15	7,2	240,0	33,5	13,9	175
	15	7,3	243,3	33,9	13,9	175
MÉDIA	15	7,3	242,2	33,8	13,9	175
	20	9,7	242,6	45,1	18,6	175
	20	9,6	240,7	44,8	18,6	175
	20	9,7	242,6	45,1	18,6	175
MÉDIA	20	9,7	242,0	45,0	18,6	175
	30	14,5	241,7	67,4	27,9	175
	30	14,5	241,7	67,4	27,9	175
	30	14,5	241,7	67,4	27,9	175
MÉDIA	30	14,5	241,7	67,4	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
10	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	51,5	8583	239,5	2,8	175
	3	50,0	8333	232,5	2,8	175
	3	49,2	8200	228,8	2,8	175
MÉDIA	3	50,2	8372,0	233,6	2,8	175
	6	73,7	6142	342,7	5,6	175
	6	71,4	5950	332,0	5,6	175
	6	72,2	6017	335,7	5,6	175
MÉDIA	6	72,4	6036,3	336,8	5,6	175
	20	100,6	1891,7	522,0	18,7	175
	20	95,5	1856,6	504,8	18,7	175
	20	98,0	1906,8	521,4	18,7	175
MÉDIA	20	98,0	1885,5	516,1	18,7	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
11	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	37,6	6267	174,8	2,8	175
	3	36,8	6133	171,1	2,8	175
	3	36,2	6033	168,3	2,8	175
MÉDIA	3	36,9	6144,3	171,4	2,8	175
	6	52,9	4408	246,0	5,6	175
	6	50,7	4225	235,8	5,6	175
	6	51,1	4258	237,6	5,6	175
MÉDIA	6	51,6	4297,0	239,8	5,6	175
	12	75,4	3142	350,6	11,2	175
	12	74,5	3104	346,4	11,2	175
	12	74,2	3092	345,0	11,2	175
MÉDIA	12	74,7	3112,7	347,3	11,2	175
	20	100,6	1902,2	409,8	18,7	175
	20	95,5	1811,0	403,3	18,7	175
	20	98,0	2225,2	403,8	18,7	175
MÉDIA	20	98,0	1979,5	405,6	18,7	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
12	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	7,6	253,3	35,3	13,9	175
	15	7,6	253,3	35,3	13,9	175
	15	7,6	253,3	35,3	13,9	175
MÉDIA	15	7,6	253,3	35,3	13,9	175
	20	10,0	250,6	46,5	18,6	175
	20	10,0	250,6	46,5	18,6	175
	20	10,0	250,6	46,5	18,6	175
MÉDIA	20	10,0	250,6	46,5	18,6	175
	30	14,8	246,7	68,8	27,9	175
	30	14,8	246,7	68,8	27,9	175
	30	14,8	246,7	68,8	27,9	175
MÉDIA	30	14,8	246,7	68,8	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
13	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	3,8	126,7	17,7	13,9	175
	15	3,9	130,0	18,1	13,9	175
	15	3,8	126,7	17,7	13,9	175
MÉDIA	15	3,8	127,8	17,8	13,9	175
	20	5,0	124,6	23,1	18,6	175
	20	5,0	126,6	23,4	18,6	175
	20	4,3	124,6	20,0	18,6	175
MÉDIA	20	4,8	125,3	22,2	18,6	175
	30	7,3	121,7	33,9	27,9	175
	30	7,3	121,7	33,9	27,9	175
	30	7,3	121,7	33,9	27,9	175
MÉDIA	30	7,3	121,7	33,9	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
14	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	3,9	130,0	18,1	13,9	175
	15	3,9	130,0	18,1	13,9	175
	15	3,9	130,0	18,1	13,9	175
MÉDIA	15	3,9	130,0	18,1	13,9	175
	20	5,1	128,6	23,8	18,6	175
	20	5,1	128,6	23,8	18,6	175
	20	5,1	127,9	23,7	18,6	175
MÉDIA	20	5,1	128,4	23,8	18,6	175
	30	7,6	126,7	35,3	27,9	175
	30	7,6	126,7	35,3	27,9	175
	30	7,5	125,0	34,9	27,9	175
MÉDIA	30	7,6	126,1	35,2	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
15	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	3,2	106,7	14,9	13,9	175
	15	3,2	106,7	14,9	13,9	175
	15	3,3	110,0	15,3	13,9	175
MÉDIA	15	3,2	107,8	15,0	13,9	175
	20	5,1	127,5	23,7	18,6	175
	20	5,1	127,5	23,7	18,6	175
	20	5,1	127,5	23,7	18,6	175
MÉDIA	20	5,1	127,5	23,7	18,6	175
	30	6,4	106,7	29,8	27,9	175
	30	6,4	106,7	29,8	27,9	175
	30	6,4	106,7	29,8	27,9	175
MÉDIA	30	6,4	106,7	29,8	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
16	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	15	3,8	126,7	17,7	13,9	175
	15	3,8	126,7	17,7	13,9	175
	15	3,8	126,7	17,7	13,9	175
MÉDIA	15	3,8	126,7	17,7	13,9	175
	20	5,0	126,0	23,4	18,6	175
	20	5,0	126,0	23,4	18,6	175
	20	5,0	126,0	23,4	18,6	175
MÉDIA	20	5,0	126,0	23,4	18,6	175
	30	7,5	125,0	34,9	27,9	175
	30	7,5	125,0	34,9	27,9	175
	30	7,5	125,0	34,9	27,9	175
MÉDIA	30	7,5	125,0	34,9	27,9	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
17	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	20	3,0	119,8	13,9	18,6	175
	20	3,0	119,8	13,9	18,6	175
	20	3,0	119,8	13,9	18,6	175
MÉDIA	20	3,0	119,8	13,9	18,6	175
	30	7,1	118,3	33,0	27,9	175
	30	7,1	118,3	33,0	27,9	175
	30	7,1	118,3	33,0	27,9	175
MÉDIA	30	7,1	118,3	33,0	27,9	175
	60	14,1	117,5	65,6	58,8	175
	60	14,1	117,5	65,6	58,8	175
	60	14,1	117,5	65,6	58,8	175
MÉDIA	60	14,1	117,5	65,6	58,8	175

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
1	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	12	36,0	1500,0	167,4	11,2	135
	12	36,0	1500,0	167,4	11,2	135
	12	36,0	1500,0	167,4	11,2	135
MÉDIA	12	36,0	1500,0	167,4	11,2	135
	20	59,2	1488,0	275,5	18,6	135
	20	59,2	1488,0	275,5	18,6	135
	20	59,2	1488,0	275,5	18,6	135
MÉDIA	20	59,2	1488,0	275,5	18,6	135
	30	88,3	1473,0	410,6	27,9	135
	30	88,3	1473,0	410,6	27,9	135
	30	88,3	1473,0	410,6	27,9	135
MÉDIA	30	88,3	1473,0	410,6	27,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
2	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	37,5	6250	174,4	2,8	135
	3	37,2	6200	173,0	2,8	135
	3	36,9	6150	171,6	2,8	135
MÉDIA	3	37,2	6200	173,0	2,8	135
	6	60,1	5008	279,5	5,6	135
	6	59,8	4983	278,1	5,6	135
	6	60,7	5058	282,3	5,6	135
MÉDIA	6	60,2	5016	280,0	5,6	135
	12	99,8	4158	464,1	11,2	135
	12	100,0	4171	465,5	11,2	135
	12	99,2	4133	461,3	11,2	135
MÉDIA	12	99,7	4154	463,6	11,2	135
	20	120,3	3354	560,2	18,9	135
	20	120,1	3349	558,3	18,9	135
	20	119,4	3337	555,3	18,9	135
MÉDIA	20	119,9	3346	557,9	18,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
3	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	6	35,5	2958,0	165,1	11,2	135
	6	35,2	2933,0	163,7	11,2	135
	6	35,0	2917,0	162,8	11,2	135
MÉDIA	6	35,2	2936,0	163,9	11,2	135
	12	65,7	2737,0	305,5	27,9	135
	12	65,4	2725,0	304,1	27,9	135
	12	65	2708,0	302,3	27,9	135
MÉDIA	12	65,4	2723,3	304,0	27,9	135
	20	106,0	2442,3	492,7	50,2	135
	20	105,7	2447,7	491,3	50,2	135
	20	105	2429,3	488,3	50,2	135
MÉDIA	20	105,5	2439,8	490,8	50,2	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
4	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	17,4	2900	80,9	2,8	135
	3	17,4	2900	80,9	2,8	135
	3	17,3	2883	80,4	2,8	135
MÉDIA	3	17,4	2894	80,7	2,8	135
	6	32,1	2675	149,3	5,6	135
	6	32,0	2667	148,8	5,6	135
	6	31,8	2650	147,9	5,6	135
MÉDIA	6	32,0	2664	148,7	5,6	135
	12	60,0	2500	279,0	11,2	135
	12	60,1	2504	279,5	11,2	135
	12	59,8	2492	278,1	11,2	135
MÉDIA	12	60,0	2499	278,9	11,2	135
	20	73,6	2349	342,4	18,9	135
	20	73,5	2342	341,6	18,9	135
	20	73,2	2336	340,5	18,9	135
MÉDIA	20	73,4	2342	341,5	18,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
5	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	0,5	41,8	41800	194,4	0,5	135
	0,5	37,6	37600	174,8	0,5	135
	0,5	39,6	39600	184,1	0,5	135
MÉDIA	0,5	39,7	39667	184,4	0,5	135
	1,0	59,9	29950	278,5	0,9	135
	1,0	59,3	29650	275,7	0,9	135
	1,0	58,1	29050	270,2	0,9	135
MÉDIA	1,0	59,1	29550	274,8	0,9	135
	1,5	66,5	22167	309,2	1,4	135
	1,5	75,1	25033	349,2	1,4	135
	1,5	66,0	22000	306,9	1,4	135
MÉDIA	1,5	69,2	23067	321,8	1,4	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
6	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	0,5	28,0	28000	130,2	0,5	135
	0,5	27,7	27700	128,8	0,5	135
	0,5	29,0	29000	134,9	0,5	135
MÉDIA	0,5	28,2	28233	131,3	0,5	135
	1,0	43,6	21800	202,7	0,9	135
	1,0	43,0	21500	199,9	0,9	135
	1,0	42,4	21200	197,2	0,9	135
MÉDIA	1,0	43,0	21500	199,9	0,9	135
	1,5	52,1	17367	242,3	1,4	135
	1,5	52,7	17567	245,1	1,4	135
	1,5	51,9	17300	241,3	1,4	135
MÉDIA	1,5	52,2	17411	242,9	1,4	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
7	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	31,0	5167	144,2	2,8	135
	3	30,9	5150	143,7	2,8	135
	3	31,0	5167	144,2	2,8	135
MÉDIA	3	31,0	5161	144,0	2,8	135
	6	63,6	5300	295,7	5,6	135
	6	62,3	5192	289,7	5,6	135
	6	64,1	5342	298,1	5,6	135
MÉDIA	6	63,3	5278	294,5	5,6	135
	20	120,2	5531	558,9	18,9	135
	20	116,7	5235	542,4	18,9	135
	20	121,8	5676	566,3	18,9	135
MÉDIA	20	119,6	5481	555,9	18,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
8	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	3	33,9	5650	157,6	2,8	135
	3	33,9	5650	157,6	2,8	135
	3	33,9	5683	158,6	2,8	135
MÉDIA	3	33,9	5661	157,9	2,8	135
	6	65,0	5417	302,3	5,6	135
	6	64,8	5400	301,3	5,6	135
	6	65,3	5442	303,6	5,6	135
MÉDIA	6	65,0	5420	302,4	5,6	135
	20	119,0	5012	553,6	18,9	135
	20	118,5	4966	550,9	18,9	135
	20	119,5	5023	555,5	18,9	135
MÉDIA	20	119,1	5000	553,3	18,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
9	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	20	58,8	1960	273,4	13,9	135
	20	56,8	1893	264,1	13,9	135
	20	55,9	1863	259,9	13,9	135
MÉDIA	20	57,2	1905	265,8	13,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
10	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	0,5	65,2	65200	303,2	0,5	135
	0,5	63,5	63500	295,3	0,5	135
	0,5	63,4	63400	294,8	0,5	135
MÉDIA	0,5	64,0	64033	297,8	0,5	135
	1,0	90,3	45150	419,9	0,9	135
	1,0	93,6	46800	435,2	0,9	135
	1,0	94,7	47350	440,4	0,9	135
MÉDIA	1,0	92,9	46433	431,8	0,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
11	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	0,5	43,3	43300	201,3	0,5	135
	0,5	42,8	42800	199,0	0,5	135
	0,5	42,2	42200	196,2	0,5	135
MÉDIA	0,5	42,8	42767	198,8	0,5	135
	1,0	61,1	30550	284,1	0,9	135
	1,0	61,2	30600	284,6	0,9	135
	1,0	61,0	30500	283,6	0,9	135
MÉDIA	1,0	61,1	30550	284,1	0,9	135
	1,5	76,4	25467	355,3	1,4	135
	1,5	76,5	25500	355,7	1,4	135
	1,5	76,3	25433	354,8	1,4	135
MÉDIA	1,5	76,4	25467	355,3	1,4	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
12	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	20	44,8	1493	208,3	13,9	135
	20	44,7	1490	207,9	13,9	135
	20	44,8	1493	208,3	13,9	135
MÉDIA	20	44,8	1492	208,2	13,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
13	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	12	21,7	904,2	100,9	11,2	135
	12	21,7	904,2	100,9	11,2	135
	12	21,6	900,0	100,4	11,2	135
MÉDIA	12	21,7	902,8	100,7	11,2	135
	20	37,7	929,8	175,3	18,6	135
	20	37,7	928,2	174,9	18,6	135
	20	37,6	924,4	174,2	18,6	135
MÉDIA	20	37,7	927,5	174,8	18,6	135
	30	57,7	961,7	268,3	27,9	135
	30	57,7	958,3	267,4	27,9	135
	30	57,7	955,0	266,4	27,9	135
MÉDIA	30	57,7	958,3	267,4	27,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
14	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	12	21,8	908,3	101,4	11,2	135
	12	21,8	908,3	101,4	11,2	135
	12	21,8	908,3	101,4	11,2	135
MÉDIA	12	21,8	908,3	101,4	11,2	135
	20	36,47	910,5	169,6	18,6	135
	20	36,47	910,5	169,6	18,6	135
	20	36,47	910,5	169,6	18,6	135
MÉDIA	20	36,5	910,5	169,6	18,6	135
	30	54,8	913,3	254,8	27,9	135
	30	54,8	913,3	254,8	27,9	135
	30	54,8	913,3	254,8	27,9	135
MÉDIA	30	54,8	913,3	254,8	27,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
15	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	12	23,5	979,2	109,3	11,2	135
	12	23,4	975,0	108,8	11,2	135
	12	23,4	975,0	108,8	11,2	135
MÉDIA	12	23,4	976,4	109,0	11,2	135
	20	39,0	976,6	181,4	18,6	135
	20	38,9	973,5	180,9	18,6	135
	20	39,0	975,8	181,6	18,6	135
MÉDIA	20	39,0	975,3	181,3	18,6	135
	30	58,4	973,3	271,6	27,9	135
	30	58,3	971,7	271,1	27,9	135
	30	58,6	976,7	272,5	27,9	135
MÉDIA	30	58,4	973,9	271,7	27,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
16	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	12	21,9	912,5	101,8	11,2	135
	12	21,9	912,5	101,8	11,2	135
	12	22	916,7	102,3	11,2	135
MÉDIA	12	21,9	913,9	102,0	11,2	135
	20	36,74	916,6	170,8	18,6	135
	20	36,7	915,8	170,6	18,6	135
	20	36,76	918,2	170,9	18,6	135
MÉDIA	20	36,7	916,9	170,8	18,6	135
	30	55,3	921,7	257,1	27,9	135
	30	55,2	920,0	256,7	27,9	135
	30	55,2	920,0	256,7	27,9	135
MÉDIA	30	55,2	920,6	256,8	27,9	135

AMOSTRA	VELOCIDADE	TORQUE	VISCOSIDADE	SHEAR STRESS	SHEAR RATE	TEMPERATURA
17	RPM	%	cP	d/cm ²	1/sec	°C
	20	16,1	402,5	74,9	18,6	135
	20	16,0	400,0	74,4	18,6	135
	20	16,0	400,0	74,4	18,6	135
MÉDIA	20	16,0	400,8	74,6	18,6	135

E5 - CISALHAMENTO DINÂMICO - AMOSTRA VIRGEM

AMOSTRA	FREQUÊNCIA	TEMPO	TEMPERATURA	TENSÃO	DEFORMAÇÃO	G*/sen δ	G*	δ
	rad/sec	s	°C	Pa	%	kPa	Pa	graus
1	9,987	63,44	64	453,3	12,12	3,834	3750	78,0
	9,987	63,55	64	474,6	12,06	4,036	3944	77,8
MÉDIA	9,987	63,50	64	464,0	12,09	3,935	3847	77,9
2	9,987	79,00	64	901,9	12,19	7,866	7419	70,6
	9,987	79,08	64	923,1	12,22	8,034	7573	70,5
MÉDIA	9,987	79,04	64	912,5	12,21	7,950	7496	70,6
3	9,987	63,47	64	699,9	12,24	5,987	5734	73,3
	9,987	63,52	64	652,7	12,22	5,587	5358	73,5
MÉDIA	9,987	63,50	64	676,3	12,23	5,787	5546	73,4
4	9,987	63,48	64	565,7	12,02	4,865	4719	75,9
	9,987	63,52	64	535,7	12,05	4,598	4460	75,9
MÉDIA	9,987	63,50	64	550,7	12,04	4,732	4590	75,9
5	9,987	79,03	64	1670,0	12,151	16,100	13770	58,8
	9,987	79,01	64	1643,0	12,151	15,720	13550	59,6
MÉDIA	9,987	79,02	64	1656,5	12,151	15,910	13660	59,2
6	9,987	79,12	64	1285,0	12,176	11,620	10580	65,6
	9,987	79,03	64	1379,0	12,205	12,480	11320	65,2
MÉDIA	9,987	79,08	64	1332,0	12,191	12,050	10950	65,4
7	9,987	79,10	64	1115,0	12,13	9,975	9213	67,5
	9,987	63,42	64	1095,0	12,23	9,716	8974	67,5
MÉDIA	9,987	71,26	64	1105,0	12,18	9,846	9094	67,5
8	9,987	78,90	64	1081,0	12,16	9,689	8914	66,9
	9,987	79,09	64	1079,0	12,15	9,727	8901	66,2
MÉDIA	9,987	79,00	64	1080,0	12,16	9,708	8908	66,6
9	9,987	63,37	64	670,0	12,09	5,744	5544	75,2
	9,987	63,41	64	633,8	12,06	5,443	5266	75,4
MÉDIA	9,987	63,39	64	651,9	12,08	5,594	5405	75,3

AMOSTRA	FREQUÊNCIA	TEMPO	TEMPERATURA	TENSÃO	DEFORMAÇÃO	G*/sen δ	G*	δ
	rad/sec	s	°C	Pa	%	kPa	Pa	graus
10	9,987	78,97	64	1843,0	12,15	18.000	15210	57,7
	9,987	79,00	64	1824,0	12,14	17.840	15050	57,5
MÉDIA	9,987	78,99	64	1833,5	12,14	17.920	15130	57,6
11	9,987	79,02	64	1860,0	12,23	17.390	15240	61,2
	9,987	79,02	64	1776,0	12,21	16.750	14570	60,4
MÉDIA	9,987	79,02	64	1818,0	12,22	17.070	14905	60,8
12	9,987	63,43	64	631,1	12,12	5,412	5223	74,8
	9,987	63,44	64	383,2	12,06	3,310	3191	74,6
MÉDIA	9,987	63,44	64	507,2	12,09	4,361	4207	74,7
13	9,987	63,74	64	333,8	12,05	2,785	2776	85,3
	9,987	47,83	64	275,7	12,06	2,296	2290	85,7
MÉDIA	9,987	55,79	64	304,8	12,06	2,541	2533	85,5
14	9,987	47,93	64	306,3	12,04	2,556	2548	85,6
	9,987	47,97	64	312,2	12,15	2,581	2574	85,7
MÉDIA	9,987	47,95	64	309,3	12,10	2,569	2561	85,7
15	9,987	63,53	64	355,2	12,03	2,969	2958	85,1
	9,987	63,53	64	349,5	11,99	2,929	2919	85,1
MÉDIA	9,987	63,53	64	352,4	12,01	2,949	2939	85,1
16	9,987	63,52	64	345,3	12,06	2,879	2867	84,8
	9,987	63,43	64	343,0	12,03	2,867	2855	84,8
MÉDIA	9,987	63,48	64	344,2	12,05	2,873	2861	84,8
17	9,987	47,96	64	206,0	11,97	1,724	1723	87,7
	9,987	47,94	64	197,0	12,08	1,635	1633	87,4
MÉDIA	9,987	47,95	64	201,5	12,02	1,680	1678	87,6

E6 - CISALHAMENTO DINÂMICO - APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT

AMOSTRA	FREQÜÊNCIA rad/sec	TEMPO s	TEMPERATURA °C	TENSÃO Pa	DEFORMAÇÃO %	G*/sen δ kPa	G* Pa	δ graus
1	9,987	63,57	64	664,3	10,01	6,869	6649	75,4
	9,987	63,59	64	550,6	10,02	5,643	5508	77,4
MÉDIA	9,987	63,58	64	607,5	10,02	6,256	6079	76,4
2	9,987	63,74	64	1042,0	10,06	11,000	10370	70,5
	9,987	63,65	64	988,8	10,07	10,400	9843	71,2
MÉDIA	9,987	63,70	64	1015,4	10,07	10,700	10107	70,9
3	9,987	63,60	64	610,2	10,05	6,295	6088	75,3
	9,987	63,52	64	618,3	10,01	6,428	6190	74,4
MÉDIA	9,987	63,56	64	614,3	10,03	6,362	6139	74,9
4	9,987	63,48	64	564,2	10,02	5,854	5643	74,6
	9,987	63,64	64	586,1	10,04	6,070	5852	74,6
MÉDIA	9,987	63,56	64	575,2	10,03	5,962	5748	74,6
5	9,987	79,01	64	2658,0	10,052	35,14	26480	48,9
	9,987	78,99	64	2722,0	10,059	36,05	27100	48,7
MÉDIA	9,987	79,00	64	2690,0	10,056	35,60	26790	48,8
6	9,987	79,37	64	1262,0	10,117	14,39	12500	60,3
	9,987	78,91	64	1127,0	10,146	12,84	11130	60,1
MÉDIA	9,987	79,14	64	1194,5	10,132	13,62	11815	60,2
7	9,987	63,69	64	1102,0	10,17	12,110	10860	63,8
	9,987	63,44	64	1145,0	10,11	12,770	11350	62,8
MÉDIA	9,987	63,57	64	1123,5	10,14	12,440	11105	63,3
8	9,987	79,17	64	1063,0	10,12	11,720	10520	63,9
	9,987	78,92	64	1027,0	10,09	11,350	10200	63,9
MÉDIA	9,987	79,05	64	1045,0	10,11	11,535	10360	63,9
9	9,987	63,43	64	787,8	10,06	8,448	7849	68,3
	9,987	63,61	64	918,7	10,12	9,897	9101	66,9
MÉDIA	9,987	63,52	64	853,3	10,09	9,173	8475	67,6

AMOSTRA	FREQUÊNCIA rad/sec	TEMPO s	TEMPERATURA °C	TENSÃO Pa	DEFORMAÇÃO %	G*/sen δ kPa	G* Pa	δ graus
10	9,987	79,04	64	2392,0	10,051	32,39	23840	47,4
	9,987	78,98	64	2013,0	10,058	25,51	20040	51,8
MÉDIA	9,987	79,01	64	2202,5	10,055	28,95	21940	49,6
11	9,987	79,15	64	1622,0	10,090	18,95	16100	58,2
MÉDIA	9,987	79,15	64	1622,0	10,090	18,95	16100	58,2
12	9,987	63,72	64	727,8	10,01	7,605	7284	73,3
	9,987	63,37	64	814,7	10,09	8,596	8094	70,3
MÉDIA	9,987	63,55	64	771,3	10,05	8,101	7689	71,8
13	9,987	63,70	64	513,6	10,00	5,204	5142	81,2
	9,987	63,58	64	498,1	10,03	5,029	4976	81,7
MÉDIA	9,987	63,64	64	505,9	10,02	5,117	5059	81,5
14	9,987	63,44	64	417,5	10,03	4,197	4168	83,3
	9,987	63,58	64	412,5	10,02	4,150	4121	83,3
MÉDIA	9,987	63,51	64	415,0	10,03	4,174	4145	83,3
15	9,987	47,93	64	116,1	9,97	1,175	1168	84,1
	9,987	48,01	64	120,8	9,97	1,224	1217	83,8
MÉDIA	9,987	47,97	64	118,5	9,97	1,200	1193	84,0
16	9,987	63,48	64	588,3	10,03	5,988	5875	78,9
	9,987	63,45	64	726,6	9,99	7,407	7283	79,5
MÉDIA	9,987	63,47	64	657,5	10,01	6,698	6579	79,2
17	9,987	63,61	64	343,9	10,01	3,453	3442	85,4
	9,987	63,40	64	399,1	9,99	4,014	3998	85,0
MÉDIA	9,987	63,51	64	371,5	10,00	3,734	3720	85,2

E7 - CISALHAMENTO DINÂMICO - APÓS ENVELHECIMENTO NO PAV

AMOSTRA	FREQUÊNCIA rad/sec	TEMPO s	TEMPERATURA °C	TENSÃO Pa	DEFORMAÇÃO %	G*sen δ kPa	G* Pa	δ graus
1	9,987	63,54	31	20050	1,01	1550	1891000	51,1
	9,987	63,52	31	16540	1,01	1274	1640000	51,0
MÉDIA	9,987	63,53	31	18295	1,01	1412	1765500	51,1
2	9,987	78,97	31	11590	1,01	850	1179000	46,2
	9,987	63,73	31	10940	1,01	789	1097000	46,0
MÉDIA	9,987	71,35	31	11265	1,01	820	1138000	46,1
3	9,987	63,50	31	16910	1,01	1277	1683000	49,4
	9,987	63,74	31	15590	1,01	1174	1557000	49,0
MÉDIA	9,987	63,62	31	16250	1,01	1226	1620000	49,2
4	9,987	63,42	31	15230	1,01	1134	1520000	48,3
	9,987	63,72	31	15810	1,01	1176	1576000	48,3
MÉDIA	9,987	63,57	31	15520	1,01	1155	1548000	48,3
5	9,987	47,92	31	7436	1,01	521	746400	44,3
MÉDIA	9,987	47,92	31	7436	1,01	521	746400	44,3
6	9,987	47,81	31	9922	1,01	689	1004000	43,4
MÉDIA	9,987	47,81	31	9922	1,01	689	1004000	43,4
7	9,987	47,95	31	9779	1,01	720	995100	46,3
	9,987	47,85	31	9457	1,01	685	942600	46,6
MÉDIA	9,987	47,90	31	9618	1,01	702	968850	46,5
8	9,987	63,40	31	8594	1,01	627	863500	46,6
	9,987	47,94	31	9381	1,01	682	952500	45,8
MÉDIA	9,987	55,67	31	8988	1,01	655	908000	46,2
9	9,987	78,99	31	27090	1,00	2038	2706000	48,9
	9,987	63,46	31	21590	1,01	1609	2138000	48,8
MÉDIA	9,987	71,23	31	24340	1,01	1824	2422000	48,9
10	9,987	63,64	31	12980	1,01	871	1295000	42,3
MÉDIA	9,987	63,64	31	12980	1,01	871	1295000	42,3

AMOSTRA	FREQUÊNCIA	TEMPO	TEMPERATURA	TENSÃO	DEFORMAÇÃO	$G^*/\text{sen } \delta$	G^*	δ
	rad/sec	s	°C	Pa	%	kPa	Pa	Graus
11	9,987	79,07	31	9489	1,01	652	938500	44,0
	9,987	47,93	31	8504	1,01	592	857700	43,6
MÉDIA	9,987	42,33	31	5998	1,01	919	1263067	45,7
12	9,987	63,50	31	20490	1,02	1539	2024000	49,5
	9,987	63,55	31	19760	1,01	1487	1962000	49,3
MÉDIA	9,987	63,53	31	20125	1,02	1513	1993000	49,4
13	9,987	63,50	31	29680	1,01	2310	2944000	51,7
	9,987	63,41	31	31890	1,02	2469	3147000	51,7
MÉDIA	9,987	63,46	31	30785	1,02	2390	3045500	51,7
14	9,987	63,61	31	43830	1,02	3416	4312000	52,4
	9,987	79,11	31	45670	1,00	3613	4555000	52,5
MÉDIA	9,987	71,36	31	44750	1,01	3515	4433500	52,5
15	9,987	63,37	31	38740	1,02	3049	3816000	53,0
	9,987	79,05	31	38740	1,02	2971	3872000	50,1
MÉDIA	9,987	71,21	31	38740	1,02	3010	3844000	51,6
16	9,987	63,38	31	20460	1,01	1603	2029000	52,2
	9,987	63,74	31	29010	1,02	2278	2856000	52,9
MÉDIA	9,987	63,56	31	24735	1,02	1941	2442500	52,6
17	9,987	63,73	31	33890	1,01	2674	3361000	52,7
	9,987	63,41	31	42520	1,02	3353	4174000	53,4
MÉDIA	9,987	63,57	31	38205	1,02	3014	3767500	53,1

E8 - RIGIDEZ DE LIGANTES ASFALTO-BORRACHA À FLUÊNCIA NA FLEXÃO

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.199e+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.3 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.01	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 16:16:41	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM01.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	955	0.973	77.5	77.8	-0.33	0.439
15.0	955	1.281	58.8	58.7	0.22	0.457
30.0	955	1.764	42.7	42.4	0.59	0.477
60.0	951	2.479	30.3	30.3	0.01	0.496
120.0	945	3.542	21.1	21.3	-1.08	0.516
240.0	942	4.989	14.9	14.8	0.59	0.536

Regression Coefficients

A = 2.26 B = -0.380 C = -0.0328 R² = 0.999896
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.038e+005
Operator: CLAUDIOL	Actual Temp: 0.2 °C	Date: 09/14/00
Specimen: AM.02	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247525
Time : 16:36:54	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.002463
Date : 09/14/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/14/00
File : AM02.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	951	2.076	36.1	36.4	-0.84	0.420
15.0	950	2.641	28.4	28.1	1.08	0.405
30.0	948	3.485	21.5	21.3	0.73	0.388
60.0	938	4.549	16.3	16.4	-0.61	0.372
120.0	918	5.753	12.6	12.7	-1.15	0.355
240.0	873	6.819	10.1	10.0	0.80	0.339

Regression Coefficients

A = 1.96 B = -0.469 C = -0.0273 R² = 0.999598
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.177e+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.2 °C	Date: 09/15/00
Specimen: AM.03	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247525
Time : 16:55:12	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.002471
Date : 09/15/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/15/00
File : AM03.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	959	1.621	46.7	46.8	-0.21	0.417
15.0	953	2.091	36.0	35.9	0.23	0.425
30.0	951	2.798	26.8	26.7	0.43	0.433
60.0	946	3.798	19.6	19.7	-0.60	0.441
120.0	933	5.086	14.5	14.5	0.07	0.448
240.0	911	6.759	10.6	10.6	0.10	0.456

Regression Coefficients

A = 2.04 B = -0.394 C = -0.0132 R² = 0.999958
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.038e+005
Operator: CLAUDIOL	Actual Temp: 0.2 °C	Date: 09/14/00
Specimen: AM.04	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247525
Time : 16:47:09	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.002463
Date : 09/14/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/14/00
File : AM04.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	967	2.675	28.5	28.3	0.67	0.148
15.0	952	2.997	25.1	25.5	-1.50	0.187
30.0	981	3.486	22.2	22.0	0.70	0.231
60.0	977	4.154	18.6	18.5	0.54	0.275
120.0	969	5.096	15.0	15.1	-0.42	0.318
240.0	960	6.372	11.9	11.9	0.02	0.362

Regression Coefficients

A = 1.53 B = -0.0162 C = -0.0727 R² = 0.999315
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.038e+005
Operator: CLAUDIOL	Actual Temp: 0.3 °C	Date: 09/14/00
Specimen: AM.07	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247525
Time : 16:58:34	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.002463
Date : 09/14/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/14/00
File : AM07.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	954	2.094	36.0	36.5	-1.39	0.471
15.0	952	2.701	27.8	27.4	1.41	0.440
30.0	949	3.598	20.8	20.4	1.72	0.406
60.0	937	4.748	15.6	15.6	-0.16	0.371
120.0	923	6.160	11.8	12.2	-3.50	0.336
240.0	862	6.828	10.0	9.8	2.03	0.302

Regression Coefficients

A = 2.03 B = -0.575 C = -0.0574 R² = 0.998089
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.038e+005
Operator: CLAUDIOL	Actual Temp: 0.1 °C	Date: 09/14/00
Specimen: AM.08	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247525
Time : 17:06:42	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.002463
Date : 09/14/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/14/00
File : AM08.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	969	2.023	37.8	38.4	-1.62	0.479
15.0	965	2.597	29.3	28.8	1.84	0.441
30.0	953	3.444	21.8	21.5	1.43	0.400
60.0	947	4.510	16.6	16.5	0.47	0.359
120.0	934	5.879	12.5	13.1	-4.37	0.317
240.0	896	6.497	10.9	10.6	2.42	0.276

Regression Coefficients

A = 2.07 B = -0.603 C = -0.0687 R² = 0.997119
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.199e+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.3 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.09	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 16:24:09	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM09.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	964	0.892	85.4	85.6	-0.26	0.432
15.0	966	1.171	65.1	64.9	0.33	0.450
30.0	965	1.610	47.3	47.2	0.23	0.469
60.0	964	2.247	33.8	33.9	-0.20	0.488
120.0	957	3.158	23.9	24.0	-0.35	0.507
240.0	945	4.430	16.8	16.8	0.24	0.527

Regression Coefficients

A = 2.30 B = -0.375 C = -0.0319 R^2 = 0.999976
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.199e+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.2 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.12	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 16:31:39	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM12.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	935	0.698	106	106	-0.28	0.447
15.0	937	0.926	79.9	79.6	0.36	0.466
30.0	936	1.288	57.3	57.2	0.17	0.487
60.0	934	1.819	40.5	40.5	-0.01	0.509
120.0	927	2.606	28.1	28.3	-0.58	0.530
240.0	921	3.721	19.5	19.4	0.33	0.551

Regression Coefficients

A = 2.40 B = -0.384 C = -0.0350 R^2 = 0.999967
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.199E+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.3 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.13	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 11:58:06	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM13.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	950	0.746	101	101	-0.01	0.340
15.0	953	0.932	80.7	80.6	0.15	0.366
30.0	951	1.217	61.7	61.9	-0.28	0.396
60.0	950	1.611	46.6	46.6	0.07	0.425
120.0	950	2.179	34.4	34.3	0.17	0.454
240.0	945	3.009	24.8	24.8	-0.09	0.483

Regression Coefficients

A = 2.27 B = -0.253 C = -0.0484 R² = 0.999990
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.19E+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.3 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.15	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 12:05:27	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM15.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	1489	0.954	123	123	0.36	0.377
15.0	1464	1.205	95.9	96.4	-0.49	0.393
30.0	1449	1.572	72.7	72.9	-0.30	0.412
60.0	1438	2.075	54.7	54.5	0.41	0.430
120.0	1425	2.790	40.3	40.2	0.28	0.448
240.0	1414	3.819	29.2	29.3	-0.26	0.466

Regression Coefficients

A = 2.40 B = -0.322 C = -0.0303 R² = 0.999947
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project : SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.19E+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.4 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.16	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 11:50:06	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM16.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	971	0.620	124	123	0.11	0.341
15.0	972	0.777	98.7	98.9	-0.21	0.364
30.0	967	1.002	76.2	76.1	0.07	0.390
60.0	969	1.327	57.6	57.6	0.03	0.416
120.0	964	1.779	42.8	42.8	0.05	0.442
240.0	961	2.427	31.2	31.2	-0.05	0.467

Regression Coefficients

A = 2.36 B = -0.264 C = -0.0428 R² = 0.999995
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

TEST INFORMATION

Project.: SANDRA	Target Temp: 0.0 °C	Conf. Test: 2.19E+005
Operator: ALEXANDRE	Actual Temp: 0.2 °C	Date: 09/12/00
Specimen: AM.17	Soak time : 60.0 min	Load Const: 0.247117
Time : 12:12:52	Beam Width : 12.81 mm	Defl Const: 0.00246
Date : 09/12/00	Thickness : 6.38 mm	Date: 09/12/00
File : AM17.DAT		

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	960	0.501	151	151	0.02	0.378
15.0	961	0.641	118	118	-0.00	0.404
30.0	963	0.859	88.5	88.5	-0.05	0.432
60.0	960	1.165	65.0	65.0	0.02	0.460
120.0	962	1.623	46.8	46.8	0.06	0.489
240.0	961	2.300	33.0	33.0	-0.03	0.517

Regression Coefficients

A = 2.48 B = -0.293 C = -0.0469 R² = 1.00000
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

ANEXO F – EXEMPLOS DE PLANILHA DE RESULTADOS DOS ENSAIOS SUPERPAVE

F1 - VISCOSIDADE BROOKFIELD – ASTM D6114-97

Amostra 13

175°C

RPM=15	M=RV	S=21	%=3.8	cP=126.7	D/CM2=17.7	1/SEC=13.9	T=175C	Z01:00
RPM=15	M=RV	S=21	%=3.9	cP=130.0	D/CM2=18.1	1/SEC=13.9	T=175C	Z01:00
RPM=15	M=RV	S=21	%=3.8	cP=126.7	D/CM2=17.7	1/SEC=13.9	T=175C	Z01:00
RPM=20	M=RV	S=21	%=5.1	cP=128.9	D/CM2=23.8	1/SEC=18.6	T=175C	Z01:00
RPM=20	M=RV	S=21	%=5.1	cP=128.9	D/CM2=23.8	1/SEC=18.6	T=175C	Z01:00
RPM=20	M=RV	S=21	%=5.1	cP=128.3	D/CM2=23.7	1/SEC=18.6	T=175C	Z01:00
RPM=30	M=RV	S=21	%=7.3	cP=121.7	D/CM2=33.9	1/SEC=27.9	T=175C	Z01:00
RPM=30	M=RV	S=21	%=7.3	cP=121.7	D/CM2=33.9	1/SEC=27.9	T=175C	Z01:00
RPM=30	M=RV	S=21	%=7.3	cP=121.7	D/CM2=33.9	1/SEC=27.9	T=175C	Z01:00

onde:

RPM = velocidade

M = modelo de viscosímetro (RV = rotacional)

S = número do spindle

% = torque

CP = viscosidade (em cPoise)

D/CM2 = shear stress

1/SEC = shear rate

T = temperatura (°C)

F2 - CISALHAMENTO DINÂMICO - AMOSTRA VIRGEM
DYNAMIC SHEAR RHEOMETER - DSR

TA Instruments CSA

AM02V

Operator: Sandra Geometry name: 25.0mm steel plate 1.000mm gap
 Date and time: 28/06/2000 13:39:36 Notes: TA CSA
 Notes: Am02v Sample name: Original Binder

AM02V.01O

Original Binder

ang.frequency rad/sec	time s	temperature Deg C	osc.stress Pa	% strain	G*/sin(delta) kPa	G* Pa	delta degrees
9.987	79.00	64.0	901.9	12.185	7.866	7419	70.58

TA Instruments CSA

AM02V

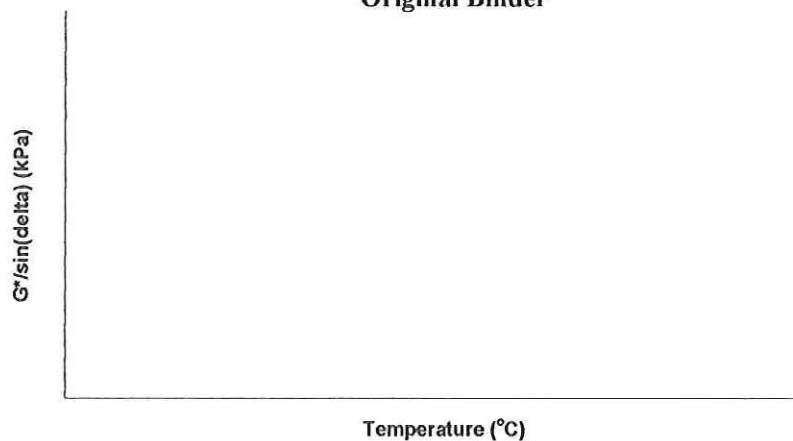
Operator: Sandra Geometry name: 25.0mm steel plate 1.000mm gap
 Date and time: 28/06/2000 13:39:36 Notes: TA CSA
 Notes: Am02v Sample name: Original Binder

TA Instruments CSA

ORIGINAL

G*/sin(delta) kPa	Temperature °C	Analysed file and step
7.866	64.0	pass AM02V.01O-Original Binder

Original Binder



F3 - CISALHAMENTO DINÂMICO - APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT

TA Instruments CSA

AM04R

Operator: Sandra Geometry name: 25.0mm steel plate 1.000mm gap
 Date and time: 28/06/2000 14:41:24 Notes: TA CSA
 Notes: Am04r Sample name: RTFO Residue

AM04R.01O

RTFO

ang.frequency rad/sec	time s	temperature Deg C	osc.stress Pa	% strain	G*/sin(delta) kPa	G* Pa	delta degrees
9.987	63.48	64.0	564.2	10.023	5.854	5643	74.60

TA Instruments CSA

AM04R

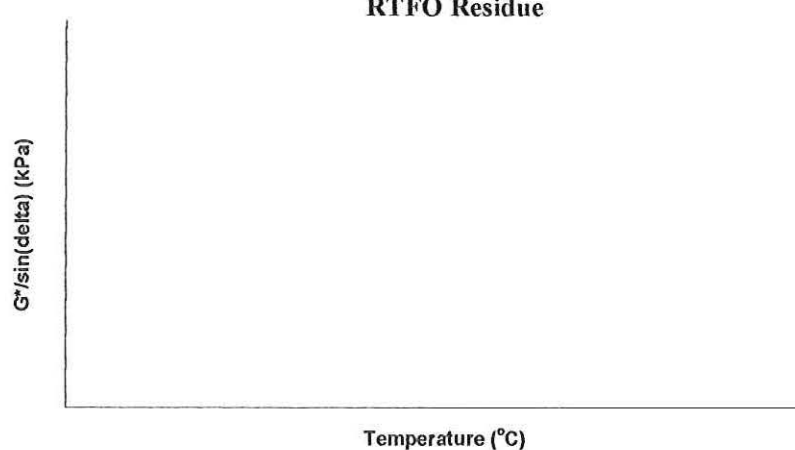
Operator: Sandra Geometry name: 25.0mm steel plate 1.000mm gap
 Date and time: 28/06/2000 14:41:24 Notes: TA CSA
 Notes: Am04r Sample name: RTFO Residue

TA Instruments CSA

RTFO

G*/sin(delta) kPa	Temperature °C	Analysed file and step
5.854	64.0	pass AM04R.01O-RTFO

RTFO Residue



F4 - CISALHAMENTO DINÂMICO - APÓS ENVELHECIMENTO NO PAV

TA Instruments CSA

AM14P

Operator: Sandra Geometry name: 8.0mm steel plate 2.000mm gap
 Date and time: 29/06/2000 16:05:28 Notes: TA CSA
 Notes: Am14p Sample name: PAV Residue

AM14P.01O

PAV

ang.frequency rad/sec	time s	temperature Deg C	osc.stress Pa	% strain	G*/sin(delta) kPa	G* Pa	delta degrees
9.987	79.11	31.0	45670	1.0039	3613	4555000	52.49

TA Instruments CSA

AM14P

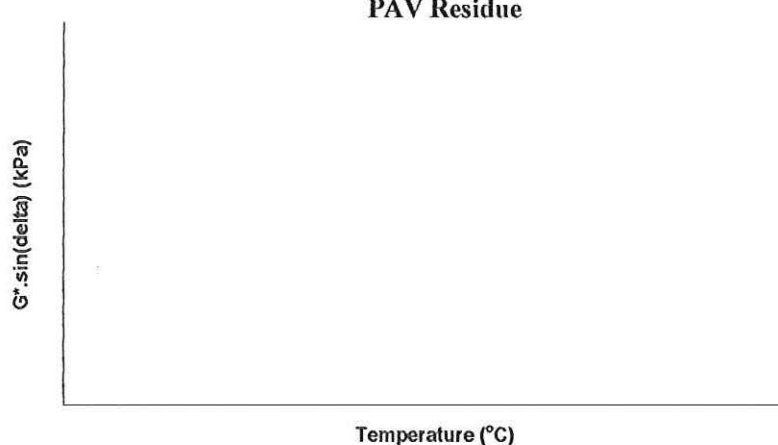
Operator: Sandra Geometry name: 8.0mm steel plate 2.000mm gap
 Date and time: 29/06/2000 16:05:28 Notes: TA CSA
 Notes: Am14p Sample name: PAV Residue

TA Instruments CSA

PAV

G*.sin(delta) kPa	Temperature °C	Analysed file and step
3613	31.0	pass AM14P.01O-PAV

PAV Residue



F5 – RIGIDEZ DE LIGANTES ASFALTO-BORRACHA À FLUÊNCIA NA FLEXÃO
BENDING BEAM RHEOMETER - BBR

TEST INFORMATION

Project : SANDRA Target Temp: -12.0 °C Conf. Test: 2.12e+005
 Operator: CLAUDIO Actual Temp: -13.5 °C Date: 06/30/00
 Specimen: AM.09 Soak time : 60.0 min Load Const: 0.248139
 Time : 15:44:16 Beam Width : 12.81 mm Defl Const: 0.002475
 Date : 06/30/00 Thickness : 6.38 mm Date: 06/30/00
 File : AM09.DAT

RESULTS

t Time (sec)	P Force (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8.0	962	0.091	834	830	0.45	0.379
15.0	962	0.118	643	649	-0.98	0.403
30.0	964	0.156	489	486	0.45	0.429
60.0	965	0.212	359	358	0.26	0.455
120.0	968	0.295	259	259	-0.14	0.481
240.0	967	0.415	184	184	-0.04	0.507

Regression Coefficients

A = 3.23 B = -0.301 C = -0.0433 R² = 0.999908
 - CANNON BENDING BEAM RHEOMETER - V 4.2 P to print - ESC to continue

**ANEXO G – TABELA COM PENEIRAS ABNT, ASTM E
TYLER**

ASTM/ASA/USS	TYLER/ MESH	ABNT - EB-22-R	aberturas em mm
4"	-	-	101,6
3 1/2"	-	-	88,9
3"	-	76	76,2
2 1/2"	-	-	63,5
2"	-	50	50,8
1 3/4"	-	-	44,4
1 1/2"	-	38	38,1
1 1/4"	-	-	31,7
1"	-	25	25,4
3/4"	-	19	19,1
5/8"	-	-	15,9
1/2"	-	-	12,7
3/8"	-	9,5	9,52
5/16"	-	-	7,93
1/4"	-	-	6,35
3,5	3,5	-	5,66
4	4	4,8	4,76
5	5	-	4,00
6	6	-	3,36
7	7	-	2,83
8	8	2,4	2,38
10	9	2	2,00
12	10	-	1,68
14	12	-	1,41
16	14	1,2	1,19
18	16	-	1,00
20	20	-	0,84
25	24	-	0,71
30	28	0,6	0,59
35	32	-	0,50
40	35	0,42	0,42
45	42	-	0,35
50	48	0,30	0,297
60	60	-	0,250
70	65	-	0,210
80	80	-	0,177
100	100	0,15	0,149
120	115	-	0,125
140	150	-	0,105
170	170	-	0,088
200	200	0,075	0,074
230	250	-	0,062
270	270	-	0,053
325	325	-	0,044
400	400	-	0,037
450	450	-	0,032
500	500	-	0,025
635	635	-	0,020