

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

EDUARDO CÉSAR ANTONELLI MENEGUINI

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE
BORRACHA RECICLADA DE PNEUS, TRATADA SUPERFICIALMENTE COM
HIDRÓXIDO DE SÓDIO COMERCIAL**

Tese apresentada à Comissão de Doutorado da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP



M524a Meneguini, Eduardo César Antonelli
Avaliação de concreto asfáltico com incorporação de pó de borracha reciclada de pneus, tratada superficialmente com hidróxido de sódio comercial / Eduardo César Antonelli Meneguini. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Vladimir Antonio Paulon.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Reciclagem. 2. Asfaltos modificados. 3. Asfalto. 4. Pavimentação de asfalto. 5. Concreto asfáltico. I. Paulon, Vladimir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of asphalt concrete with addition of ground rubber from second-hand tires, using superficial treatment with a sodium hydroxide commercial

Palavras-chave em Inglês: Recycling, Modified asphalts, Asphalt, Asphalt paving, Asphalt concrete

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Gilberto Dalfré Filho, José Marques Filho, Jefferson Benedicto Libardi Libório, Angela B. Monsuero

Data da defesa: 28-11-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

Avaliação de concreto asfáltico com incorporação de pó de borracha
reciclada de pneus, tratada superficialmente com hidróxido de sódio
comercial

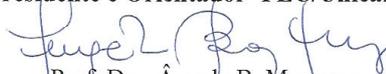
Eduardo César Antonelli Meneguini

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora constituída por:



Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Presidente e Orientador- FEC/Unicamp



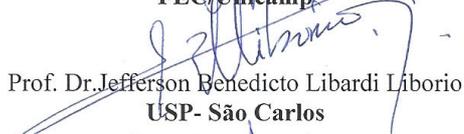
Prof. Dra. Ângela B. Masuero

UFRGS



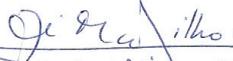
Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho

FEC/Unicamp



Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Liborio

USP- São Carlos



Prof. Dr. José Marques Filho

UFPR

Campinas, 28 de novembro de 2011

“Tudo posso naquele que me conforta.”

**S.Paulo, “Filipenses 2”,
Capítulo 4, versículo 13**

Dedicatória

À minha esposa Silmara, minhas filhas Amanda e Juliana e aos meus pais Benedicto e Neuza, pelo apoio, dedicação, amor e conforto.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon, meu orientador, pela sua amizade, confiança, incentivo e orientação em todos os momentos.

A Dra. Nádia Cristina Segre, pela sua preciosa ajuda, sempre com paciência e atenção.

Ao Mestre Emerson Rodrigues Maciel, químico da Ipiranga Asfaltos S.A., pela sua grande ajuda, disposição, amizade e colaboração neste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Saneamento e Ambiente, por me receberem com atenção e carinho.

Ao químico Marcos Alessandro Moreira e ao técnico Marcelo Roberto Ávila, do Laboratório de Desenvolvimento da Ipiranga Asfaltos S.A., pelo acompanhamento na etapa experimental do meu trabalho.

À Ipiranga Asfaltos S.A., pelo fornecimento dos materiais e laboratórios, para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, me ajudaram, na realização deste trabalho.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é a determinação das principais propriedades do asfalto-borracha e das propriedades mecânicas de um concreto asfáltico, tendo, como adição, o uso de borracha moída de pneus usados, tratada com solução de hidróxido de sódio comercial. Obtivemos, com o tratamento superficial da borracha de pneus usados, melhor interface entre a borracha e asfalto, assim como com o concreto asfáltico e a borracha, alcançando sensível aumento da durabilidade do asfalto-borracha. Realizamos, primeiramente, ensaios para caracterizar o asfalto-borracha tratado de acordo com as Normas vigentes, ensaios de durabilidade e, em seguida, ensaios mecânicos do concreto asfáltico. A recuperação elástica do asfalto-borracha utilizando pó de borracha tratada com hidróxido de sódio aumentou em 10% quando comparados com asfalto-borracha sem tratamento. Os resultados demonstraram melhora da estabilidade à estocagem em 42% nos ensaios realizados. Os ensaios de envelhecimento demonstraram que o tratamento do pó de borracha com hidróxido de sódio aumentou sensivelmente sua durabilidade. O ensaio de variação de massa, após o ensaio de envelhecimento, demonstrou que a perda de massa dos corpos de prova utilizando pó de borracha tratada com hidróxido de sódio foi 111% melhor quando comparados com os corpos de prova utilizando pó de borracha sem tratamento. Concluímos que há grande aplicabilidade deste asfalto-borracha na construção civil

Palavras-chave: Reciclagem, reuso, asfalto-borracha

ABSTRACT

The main objective of this study is to determine the main properties of the asphalt-rubber and the mechanical properties of an asphalt concrete, with the addition of ground rubber from second-hand tires, treated with a sodium hydroxide commercial solution. We obtained, with the superficial treatment of rubber from second-hand tires, a better interface between the rubber and the asphalt, as well as with the asphalt concrete and the rubber, achieving significant increase in the durability of the asphalt-rubber. We undertake tests to characterize the treated asphalt-rubber according to current standards, durability tests, and then mechanical tests of the asphalt concrete. The elastic recovery of the rubber asphalt with rubber powder treated with sodium hydroxide increased by 10% compared to the untreated rubber asphalt. The results showed an improved stability to storage in 42% in the tests. The aging tests showed that the treatment of the rubber powder with sodium hydroxide significantly increased their durability. The mass change test after the aging test showed that the mass loss of the specimens with rubber powder treated with sodium hydroxide was 111% better when compared to the specimens with rubber powder without treatment. We conclude that there is great use of this rubber asphalt in the construction industry.

Keywords: recycling, reuse, asphalt-rubber

SUMÁRIO

1. OBJETIVO.....	1
2. INTRODUÇÃO.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1. Borracha.....	7
3.1.1. Borracha Natural.....	8
3.1.2. Borracha de Pneu.....	10
3.1.3. Tratamento da Borracha.....	10
3.2. Asfalto-Borracha.....	20
3.2.1. Compatibilidade entre polímeros e CAP.....	25
3.2.2. Porcentagem de polímeros na mistura.....	26
3.3. Modificação do CAP por adição de borracha em pó (moída).....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1. Considerações iniciais.....	31
4.2. Pó de borracha.....	32
4.2.1. Ensaio de Granulometria do Pó de Borracha.....	35
4.2.2. Massa Específica Aparente do Pó de Borracha.....	36
4.3. Agregado.....	36
4.3.1. Ensaio de Densidade Real e Massa Específica dos Agregados.....	36
4.3.2. Ensaio de Granulometria da Pedra e do Pó de Pedra.....	36
4.3.3. Ensaio de Abrasão Los Angeles do Agregado.....	37
4.3.4. Ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso Agregado Graúdo.....	37

4.3.5. Ensaio de Equivalente de Areia.....	37
4.4. Asfalto.....	38
4.5. Óleo extensor (Óleo Extensor).....	39
4.6. Cal.....	39
4.7. LIGANTE ASFALTO-BORRACHA LIGANTE ASFÁLTICO BP (TIPO B).....	40
4.8. LIGANTE ASFALTO-BORRACHA LIGANTE ASFÁLTICO BPT TRATADO.....	41
4.8.1. Descrição dos Ensaios do Ligante Asfáltico.....	41
4.8.1.1. Ensaio Materiais betuminosos – Determinação do Ponto de Amolecimento (Método do anel e bola).....	41
4.8.1.2. Ensaio para Materiais Asfálticos – Determinação da Penetração.....	42
4.8.1.3. Ensaio para Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (Spindle 3).....	43
4.8.1.4. Ensaio Materiais - Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro.....	44
4.8.1.5. Asfalto Modificado – Ensaio de Separação de Fase (estabilidade à estocagem).....	45
4.8.1.6. Derivados de Petróleo – Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão em Vaso Aberto Cleveland.....	46
4.8.1.7. Materiais Asfálticos – Determinação do Efeito do Calor e do Ar, em Uma Película Delgada Rotacional (RTFOT).....	47
4.9. Confecção dos corpos de prova do CAP.....	49
5. RESULTADOS.....	52
5.1. Caracterização do pó de borracha.....	52
5.2. Caracterização dos agregados.....	54
5.3. Caracterização da mistura asfáltica.....	60

5.4. Resultados do ensaio MARSHALL.....	65
5.4.1. Resultados dos ensaios Marshall, utilizando pó de borracha sem tratamento.....	65
5.4.1.1. Densidade aparente.....	65
5.4.1.2. Estabilidade Marshall (kgf).....	67
5.4.1.3. Índice de vazios (%).....	68
5.4.1.4. Relação Betume vazios - R.B.V. (%).....	69
5.4.1.5. Fluência (1/100'').....	70
5.4.1.6. Vazios de agregado mineral - V.A.M. (%).....	71
5.4.1.7. Resultado Dosagem Marshall.....	71
5.4.2. Resultados dos ensaios Marshall, utilizando pó de borracha com tratamento.....	72
5.4.2.1. Densidade aparente.....	73
5.4.2.2. Estabilidade Marshall (kgf).....	74
5.4.2.3. Índice de vazios (%).....	75
5.4.2.4. Relação Betume vazios - R.B.V. (%).....	76
5.4.2.5. Fluência (1/100'').....	77
5.4.2.6. Vazios de agregado mineral - V.A.M. (%).....	78
5.4.2.7. Resultado Dosagem Marshall, com borracha tratada.....	79
5.5. Resultados dos ensaios à tração	80
5.6. Análise estatística dos resultados.....	80
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	83
6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE BORRACHA.....	83
6.2. ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGRAGADOS GRAÚDOS.....	86

6.3. ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE AGREGADOS E DA MISTURA ASFÁLTICA.....	87
6.3.1. Análise do Resultado do Ensaio de Ponto de Amolecimento da Mistura Asfáltica.....	88
6.3.2. Análise do Resultado do Ensaio de Penetração da Mistura Asfáltica.....	90
6.3.3. Análise do Resultado do Ensaio de Viscosidade Brookfield da Mistura Asfáltica.....	91
6.3.4. Análise do Resultado do Ensaio de Recuperação Elástica da Mistura Asfáltica.....	92
6.3.5. Análise do Resultado do Ensaio de Estabilidade à Estocagem da Mistura Asfáltica.....	94
6.3.6. Análise do Resultado do Ensaio de Ponto de Fulgor da Mistura Asfáltica.....	95
6.3.7. Análise do Resultado dos Ensaio de RTFOT da Mistura Asfáltica.....	97
6.3.8. Análise do Resultado dos Ensaio de RTFOT da Mistura Asfáltica (variação de massa).....	97
6.3.8.1. Análise do Resultado dos Ensaio de RTFOT da Mistura Asfáltica (ECA, % de penetração original).....	99
6.3.8.2. Análise do Resultado dos Ensaio de RTFOT da Mistura Asfáltica (% de recuperação elástica original).....	100
6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO CONCRETO ASFÁLTICO (MARSHALL).....	102
6.4.1. Análise dos Resultados dos Ensaio de Densidade Aparente.....	102
6.4.2. Análise dos Resultados dos Ensaio de Estabilidade Marshall.....	104
6.4.3. Análise dos Resultados dos Ensaio de Índice de Vazios.....	106
6.4.4. Análise dos Resultados dos Ensaio de Relação Betume-Vazios.....	107
6.4.5. Análise dos Resultados dos Ensaio de Vazios, Agregado Mineral.....	108
6.4.6. Análise dos Resultados dos Ensaio de Fluência.....	109
6.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	111

6.6. ANÁLISE FINANCEIRA.....	112
6.6.1. Viscosidade do material com pó de pneu sem tratamento (dosagem final).....	114
6.6.2. Viscosidade do material com pó de pneu tratado (dosagem final).....	115
7. PARA ESTUDOS FUTUROS: TEORIA DE SISTEMAS DE CAMADAS ELÁSTICAS.....	118
8. CONCLUSÕES.....	119
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Micrografia eletrônica de varredura de fratura de CP que mostra a aderência da pasta de cimento com a borracha tratada com hidróxido de sódio.....	13
Figura 3.2 – Micrografia eletrônica de varredura de fratura de CP que mostra a aderência da pasta de cimento com a borracha sem tratamento.....	14
Figura 4.2.1 – Processo em tratamento com solução saturada de NaOH.....	33
Figura 4.2.2 – Lavagem do pó de borracha.....	34
Figura 4.2.3 – Papel indicador de pH em contato com a água do pó de borracha após lavagem.....	34
Figura 4.2.1.1 – Pó de borracha após a secagem.....	35
Figura 4.7.1.1 - Equipamento de ensaio para determinação do ponto de amolecimento (método do anel e bola).....	42
Figura 4.7.1.2 - Equipamento para ensaio de penetração.....	43
Figura 4.7.1.3 - Equipamento viscosímetro rotacional Brookfield.....	44
Figura 4.7.1.4 - Ensaio de recuperação elástica <i>Ductilomêtro</i>	45
Figura 4.7.1.5 - Equipamento para ensaio de separação de fases (Estabilidade a estocagem)....	46
Figura 4.7.1.6 - Equipamento para determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.....	47
Figura 4.7.1.7 - Equipamento para determinação do efeito de calor e ar em uma película delgada rotacional (RTFOT).....	48
Figura 4.8.1 - Equipamento para ensaio Marshall (compactação).....	51
Figura 4.8.2 - Equipamento para ensaio Marshall (Prensa).....	51
Figura 6.1 - Desaglomeração do pó de borracha tratado com hidróxido de sódio.....	83
Figura 6.2 - Aglomeração do pó de borracha sem tratamento.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.4.1 - Caracterização do cimento asfáltico.....	38
Tabela 4.5.1 - Caracterização do aditivo Óleo extensor.....	39
Tabela 4.6.1 - Caracterização do produto Ligante asfáltico BP (tipo B).....	40
Tabela 5.1.1 - Ensaio granulométrico do pó de borracha sem tratamento.....	52
Tabela 5.1.2 - Ensaio granulométrico do pó de borracha com tratamento.....	53
Tabela 5.2.1 - Procedência e natureza mineralógica.....	54
Tabela 5.2.2 - Detalhes do ensaio de abrasão Los Angeles.....	55
Tabela 5.2.3 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles.....	55
Tabela 5.2.4 - Resultados ensaio agregados graúdos.....	56
Tabela 5.2.5 - Massa específica dos agregados.....	57
Tabela 5.2.6 - Composição da mistura.....	58
Tabela 5.2.7 - Ensaio da composição da mistura.....	59
Tabela 5.3.1 - Ligante asfáltico BPT, utilizando 18% de pó de borracha tratado e 4%, de Óleo extensor.....	61
Tabela 5.3.2 - Ligante asfáltico BPT, utilizando 18% de pó de borracha tratado e 2%, de Óleo extensor.....	62
Tabela 5.3.3 - Ligante asfáltico BPT, utilizando 16% de pó de borracha tratado e 1,78%, de Óleo extensor.....	63
Tabela 5.3.4 - Ensaio das misturas asfálticas.....	64
Tabela 5.4 - Estudo Marshall.....	65
Tabela 5.4.1.1 - Densidade Aparente (g/cm ³).....	66
Tabela 5.4.1.2 - Estabilidade Marshall (Kgf).....	67

Tabela 5.4.1.3 - Índice de vazios.....	68
Tabela 5.4.1.4 - Relação betume-vazios.....	69
Tabela 5.4.1.5 - Fluência.....	70
Tabela 5.4.1.6 - Vazios de agregado mineral.....	71
Tabela 5.4.1.7.1 - Resultado da dosagem dos ensaios Marshall.....	72
Tabela 5.4.1.7.2 - Resultado final dos ensaios Marshall sem tratamento da borracha.....	72
Tabela 5.4.2.1 - Densidade Aparente com borracha tratada (g/cm ³).....	73
Tabela 5.4.2.2 - Estabilidade Marshall com borracha tratada (kgf).....	74
Tabela 5.4.2.3 - Índice de vazios com borracha tratada.....	74
Tabela 5.4.2.4 - Relação betume-vazios com borracha tratada.....	76
Tabela 5.4.2.5 - Fluência com borracha tratada.....	77
Tabela 5.4.2.6 - Vazios de agregado mineral com borracha tratada.....	78
Tabela 5.4.2.7.1 - Resultado da dosagem dos ensaios Marshall com borracha tratada.....	79
Tabela 5.4.2.7.2 - Resultado final dos ensaios Marshall com tratamento da borracha.....	79
Tabela 5.5.1 - Ensaio de tração dos concretos asfálticos.....	80
Tabela 5.5.2 - Controle Estatístico dos Ensaio Marshall (concreto asfáltico com pó de borracha sem tratamento).....	80
Tabela 5.5.3 - Controle Estatístico dos Ensaio Marshall (concreto asfáltico com pó de borracha com tratamento).....	81
Tabela 5.5.4 - Controle Estatístico dos Ensaio de Tração (concreto asfáltico com pó de borracha sem tratamento).....	81
Tabela 5.5.5 - Controle Estatístico dos Ensaio de Tração (concreto asfáltico com pó de borracha com tratamento).....	82

Tabela 5.5.6 - Controle Estatístico dos Ensaios do Asfalto (asfalto com pó de borracha sem e com tratamento).....	82
Tabela 6.6.1 Viscosidade do material com pó de pneu sem tratamento.....	114
Tabela 6.6.2 - Viscosidade do material com pó de pneu tratado.....	115
Tabela 6.6.3 Cálculo de produção de asfalto-borracha (sem tratamento).....	116
Tabela 6.6.4 Cálculo de produção de asfalto-borracha (com tratamento).....	116

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.3 - Ensaio de desgaste por abrasão.....	17
Gráfico 5.1.1 - Curva granulométrica do pó de borracha sem tratamento.....	53
Gráfico 5.1.2 - Curva granulométrica do pó de borracha com tratamento.....	54
Gráfico 5.2.1 - Análise granulométrica dos agregados.....	58
Gráfico 5.2.2 - Faixas de tolerância dos traços DNIT.....	59
Gráfico 5.4.1.1 - Densidade aparente x Teor de ligante.....	66
Gráfico 5.4.1.2 - Estabilidade Marshall x Teor de ligante.....	67
Gráfico 5.4.1.3 - Índice de vazios x Teor de ligante.....	68
Gráfico 5.4.1.4 - Relação betume-vazios x Teor de ligante.....	69
Gráfico 5.4.1.5 - Fluência x Teor de ligante.....	70
Gráfico 5.4.1.6 - Vazios de agregado mineral x Teor de ligante.....	71
Gráfico 5.4.2.1 - Densidade aparente x Teor de ligante com borracha tratada.....	73
Gráfico 5.4.2.2 - Estabilidade Marshall x Teor de ligante com borracha tratada.....	74
Gráfico 5.4.2.3 - Índice de vazios x Teor de ligante com borracha tratada.....	75
Gráfico 5.4.2.4 - Relação betume-vazios x Teor de ligante com borracha tratada.....	76
Gráfico 5.4.2.5 - Fluência x Teor de ligante, com borracha tratada.....	77
Gráfico 5.4.2.6 - Vazios de agregado mineral x Teor de ligante com borracha tratada.....	78
Gráfico 6.1 - Módulo de finura para pó de borracha tratada e não tratada.....	85
Gráfico 6.3.1 - Ponto de amolecimento da borracha, com e sem tratamento.....	89
Gráfico 6.3.2 - Ensaio de penetração da mistura asfáltica, com borracha com e sem tratamento.....	90

Gráfico 6.3.3 - Ensaio de Viscosidade Brookfield da mistura asfáltica, com borracha com e sem tratamento.....	91
Gráfico 6.3.4 - Ensaio de Recuperação elástica da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	93
Gráfico 6.3.5 - Ensaio de Estabilidade à estocagem da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	94
Gráfico 6.3.6 - Ensaio de Ponto de fulgor da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	96
Gráfico 6.3.7.1 - Ensaio de RTFOT, quanto à perda de massa da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	99
Gráfico 6.3.7.2 - Ensaio de RTFOT, quanto à % de penetração original da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	100
Gráfico 6.3.7.3 - Ensaio de RTFOT, quanto à % de recuperação elástica original da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	101
Gráfico 6.4.1 - Ensaio de densidade aparente da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	103
Gráfico 6.4.2 - Ensaio de estabilidade da mistura asfáltica, com borracha tratada não tratada.....	106
Gráfico 6.4.3 - Ensaio de Estabilidade da mistura asfáltica com borracha tratada e não tratada.....	107
Gráfico 6.4.4 - Ensaio de relação betume-vazios da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	108
Gráfico 6.4.5 - Ensaio de vazios agregado mineral da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada.....	109
Gráfico 6.4.6 - Ensaio de fluência da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada....	110

Gráfico 6.5 - Ensaio de tração das misturas asfálticas, com borracha tratada e não tratada.....	111
Gráfico 6.6.1 - Das temperaturas de usinagem e compactação Ligante asfáltico BP, com borracha sem tratamento.....	114
Gráfico 6.6.2 - Das temperaturas de usinagem e compactação Ligante asfáltico BP, com borracha tratada.....	115

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
BP	Borracha de pneu sem tratamento
BPT	Borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CPA	Camada Porosa de Atrito
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
EVA	Etil-vinil-acetato
PA	Ponto de amolecimento
PAV	Vaso de pressão de envelhecimento
PEN	Penetração
RTFOT	Teste de filme fino rotativo em estufa
SBR	Borracha de estireno-butadieno
SBS	Estireno-butadieno-estireno

1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é reaproveitar o pó de borracha de pneus moído tratado superficialmente com hidróxido de sódio na construção civil e melhorar as características dos materiais. A melhora na qualidade do asfalto adicionando-se pó de borracha reciclada é sensível. Também é uma questão de cidadania, pois melhora a qualidade do meio ambiente, com menor lançamento de resíduos na natureza, assim como gera mais empregos necessários na reciclagem dos pneus usados. A reciclagem torna-se mais interessante quando melhora as características do asfalto tradicional, garantindo economia e durabilidade.

A redução da demanda de petróleo para a construção de asfaltos, se dá pela própria adição do pó de borracha no asfalto, fazendo com que se utilize menos asfalto e com aumento na vida útil do pavimento asfáltico. A resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 1999, determina prazos para que as empresas fabricantes e importadoras de pneus fiquem obrigadas a coletar e dar destinação final aos pneus inservíveis em todo o território nacional, proporcionalmente às quantidades fabricadas ou importadas. Sabemos que o asfalto é uma fonte esgotável e temos o dever de utilizá-lo da melhor forma possível, respeitando as próximas gerações. Os revestimentos asfálticos têm sido empregados em diferentes tipos de pavimentos, sob diferentes solicitações: desde em vias de baixo volume de tráfego até naquelas de tráfego intenso e pesado, como nas auto-estradas, corredores de ônibus, entre outros. Os revestimentos asfálticos são soluções que podem ser aplicadas em qualquer região brasileira, pois existem equipamentos e usinas disponíveis, tanto de órgãos públicos quanto em empresas privadas. Existem refinarias de petróleo, possibilitando uma boa distribuição de ligante asfáltico; paralelamente, diversas empresas privadas e estatais produzem emulsão asfáltica em diversos locais no Brasil, para as imprimações, os tratamentos superficiais e para misturas asfálticas a frio.

Em geral, as regiões brasileiras contam com as facilidades para as soluções mais simples, envolvendo tratamentos superficiais de penetração invertida, equipamentos para aplicação de lama-asfáltica, usinas de pré-misturado a frio e de misturas asfálticas a quente, além de equipamentos de distribuição e de compactação. A disponibilidade de fresadoras, recicladoras, usinas preparadas para produzirem misturas asfálticas modificadas com polímeros ou com adição de fibras, é ainda rara, estando presentes apenas em algumas regiões brasileiras. Porém, a disseminação de novas tecnologias é uma tendência, devendo estar, em futuro próximo, ao alcance de todas as regiões brasileiras. O problema brasileiro de desenvolvimento na área de misturas asfálticas para a pavimentação está relacionado em no MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO ASFALTICO (ANDRADE, MÁRIO HENRIQUE FURTADO, 2006) que atestam as necessidades de:

- melhorar a produção de agregados por britagem, atendendo, em algumas regiões, à disponibilidade de agregados na forma e em peneiras ou frações próprias para certas faixas granulométricas especiais;
- aproveitar de forma racional os agregados naturais, como areias, cascalhos e lateritas;
- especificar corretamente os ligantes, dependendo da região e da geometria da via;
- difundir o uso de ligantes modificados por polímeros;
- empregar as soluções condizentes com a solicitação de tráfego;
- usar novas tecnologias de misturas asfálticas;
- adequar os procedimentos de dosagem;
- melhorar as técnicas construtivas e de controle;
- aplicar corretamente e programar as técnicas de manutenção;
- reduzir custos;
- melhorar a durabilidade do asfalto-borracha;
- maior resistência á intempéries.

Enfim, para alcançar um adequado revestimento asfáltico, condizente com o conforto e a segurança necessários para os usuários, seja em pavimentos novos ou em restaurações, deve-se promover uma melhoria tecnológica no Brasil em todas as áreas correlatas. São estas o projeto, a dosagem, a construção e o controle, e a manutenção. Existem dois métodos de incorporação dos pneus às misturas asfálticas. No processo úmido, objeto deste estudo, são adicionadas partículas finas de borracha ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado *asfalto-borracha*. No processo seco, as partículas de borracha substituem parte dos agregados pétreos na mistura. Após a adição do ligante, formam um produto denominado *concreto* asfáltico modificado com adição de borracha. A utilização de pneus triturados, em obras de pavimentação no Brasil, já é realidade na cidade de Santos, Estado de São Paulo, onde raspas de pneus, provenientes do processo de recauchutagem, são incorporadas (processo seco) nas misturas asfálticas, utilizadas nas atividades de reabilitação e construção de pavimentos. Segundo informações da Prefeitura de Santos-SP, alguns trechos experimentais têm apresentado excelente desempenho, enquanto outros apresentam problemas de desagregação, o que evidencia a necessidade de pesquisas sobre a utilização de borracha reciclada de pneus, em obras de pavimentação asfáltica no Brasil.

Enquanto é indiscutível o benefício da reciclagem para esse tipo de resíduo, não existe consenso se a utilização de borracha triturada e não moída traz benefícios significativos às propriedades de engenharia, com a obtenção de um pavimento com melhor desempenho em longo prazo, superando os pavimentos tradicionais. Neste contexto, o presente trabalho descreve um estudo a respeito da adição de borracha de pneu moída, no asfalto, utilizando o processo úmido. Procurou-se analisar a influência da quantidade e do tamanho das partículas de borracha nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Busca-se, dessa forma, contribuir para a resolução do equacionamento do grave problema ambiental que é a disposição de resíduos sólidos, pois a reutilização de pneus em larga escala no Brasil depende do conhecimento profundo dos aspectos econômicos e técnicos relacionados ao ambiente e ao desempenho deste como material de construção. O reaproveitamento de pneus inservíveis se constitui, em todo o mundo, em um desafio muito difícil dadas as suas peculiaridades de

durabilidade, quantidade, volume e peso e, principalmente, grande dificuldade de lhes propiciar uma nova destinação ecológica e economicamente viável.

A verdadeira reutilização consiste em aproveitar determinado rejeito de forma útil e economicamente viável e, no caso do asfalto ecológico, melhorar as características do asfalto tradicional. No nosso caso, a borracha introduzida no asfalto não é apenas um produto a mais, inerte, colocado apenas para recheiar, preenchendo espaços; na realidade, a borracha é um grande melhorador do asfalto reconhecido mundialmente. O pneu usado é um resíduo indesejável. É um grande problema para a saúde, devido ao acúmulo de água dentro dos pneus, que favorece a proliferação de insetos; também, para o ambiente, pela queima de pneus ou pela disposição em aterros sanitários e lixões. Quanto à disposição das fibras de borracha, ela é bastante problemática, uma vez que são muito resistentes à deterioração pelo ambiente, que pode durar até 400 anos, sendo, assim, incompatíveis com aterros sanitários. No Brasil, os pneus inservíveis são reaproveitados de diversas formas, como combustível alternativo para as indústrias de cimento, na fabricação de solados de sapato, em borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais, asfalto-borracha e tapetes para automóveis. Entretanto, os pneus são combustíveis e queimam em altas temperaturas, produzindo grandes quantidades de fumaça negra e de óleo que penetra e contamina solos e lençóis d'água (ALBUQUERQUE, ANDRADE, IBRACON-2003).

Patenteado nos Estados Unidos nos anos 60, o asfalto-borracha é utilizado principalmente naquele país, além da África do Sul, Austrália, Canadá, China e Portugal. Alguns departamentos estaduais de rodagem brasileiros, como os do Paraná e São Paulo e o Deinfra, de Santa Catarina, já contemplam a utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação sob sua jurisdição. Pesquisas e estudos sobre o asfalto-borracha são realizados, no Brasil, há pelo menos uma década. Trabalhos que compararam pistas revestidas com asfalto-borracha e pistas revestidas com CAP confirmam as vantagens técnicas do produto. Apesar do beneficiamento da borracha crescer o custo do asfalto-borracha em 20 a 25%, no longo prazo o custo na manutenção do pavimento é reduzido, já que, segundo pesquisas realizadas por Universidades brasileiras, o asfalto-borracha resiste mais às variações de temperatura e de fluxo de carga (tráfego).

2. INTRODUÇÃO

O uso da borracha reciclada de pneumáticos inservíveis em pavimento é uma solução para diminuir o problema com a deposição desse resíduo. Cabe salientar que a inclusão desse material na construção civil leva a melhoria das propriedades dos materiais de pavimentação. Com os mesmos propósitos, pretendemos contribuir para uma melhor compreensão do uso da borracha de pneus inutilizáveis como insumo de pavimentação dentro da engenharia civil contribuindo para um melhor desempenho do asfalto convencional, além de dar um destino ambientalmente adequado aos pneus velhos.

A utilização de resíduo de borracha, na área da construção civil, tem proporcionado estudos com objetivo de contribuir para as possíveis vantagens no uso destes, como agregados no concreto, colaborando com a preservação do meio ambiente, bem como o desenvolvimento de novos materiais, com características físicas e mecânicas semelhantes ou melhoradas, se comparada aos materiais convencionais. A substituição de borracha de pneu como agregado no concreto, traz uma diminuição da resistência à compressão do concreto elaborado com esse material, em 85%, quando comparado ao concreto comum, mas notou-se que a resistência mecânica depende do tamanho de partícula de pneu utilizada. O concreto com borracha de pneu apresentou uma redução de 25 %, em relação ao seu peso de um concreto normal; dessa forma, quando a borracha foi substituída por agregados miúdos, houve uma menor perda da resistência à compressão, comparados com a substituição da borracha por agregados graúdos. (ELDIN, N. N; SENOUCI, A. B.1993)

O ligante asfáltico é um dos mais antigos materiais de construção utilizados pelo homem, possuindo relatos de mais de 8.000 anos, quando os Sumérios (6.000 anos AC) usavam-no na fabricação de embarcações. Devido às suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, foi usado largamente na Antiguidade, para a impermeabilização de telhados e banheiras públicas, a edificação de estruturas, a construção de estradas e até para a

mumificação de corpos no Egito Antigo (MANUAL DO ASFALTO, 1989). Naquela época, alguns ainda atribuíam ao petróleo propriedades laxantes, cicatrizantes e anti-sépticas. Citações bíblicas revelam o emprego do derivado de petróleo como impermeabilizante na Arca de Noé e como material aglutinante na Torre de Babel. Já a pavimentação asfáltica, com os conceitos atuais, data de 1829 em Lyon, França, quando se utilizou um mastique asfáltico para melhorar as condições de rodagem (MANUAL DO ASFALTO, 1989). A partir daí, o uso de asfalto na construção de estradas é crescente e está presente em mais de 97% das estradas pavimentadas no Brasil (CNT, 2003).

O homem, a fim de obter melhor acesso às áreas cultiváveis, às fontes de madeira, minérios e água, além do desejo de expandir sua área ou território de influência, criou o que chamamos de estrada, cuja lembrança mais remota provém da China – país que as inventou (BALBO, 2007). No Brasil, a grande maioria das estradas existentes é pavimentada com asfaltos. Os asfaltos ou cimentos asfálticos de Petróleo (normalmente designados por CAP) são obtidos a partir do petróleo, que provém de uma fonte material esgotável. Este material, refinado do petróleo cru, possui boa aderência aos agregados, atuando como material ligante. O conhecimento deste material, assim como das melhorias que possam ser alcançadas, fará com que os pavimentos de asfalto tenham maior durabilidade e, portanto, menor agressão à natureza. Mas o melhor uso do pavimento asfáltico é uma questão de cidadania. Podemos entender que as estradas, que dão acesso às escolas, aos hospitais, aos serviços públicos em geral, também são uma questão de cidadania, pois as verbas, que seriam destinadas à manutenção das estradas, poderiam ser direcionadas à construção de novas estradas ou à pavimentação de acessos precários de terra, dando acesso para todos. Inúmeros trabalhos foram realizados com asfalto-borracha, mas o estudo do asfalto-borracha tratado superficialmente com hidróxido de sódio é inédito.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abrange tópicos relacionados ao concreto asfáltico com adição de borrachas. Os conjuntos destas informações contribuíram para o estudo e desenvolvimento deste trabalho. O entendimento deste capítulo, através destas publicações apresentadas, possibilitará uma visão mais abrangente do assunto abordado.

3.1. Borracha

Os elastômeros, ou borrachas, ou, ainda, com propriedades físicas parecidas com as da borracha, são materiais poliméricos, que é um material formado por sucessivas ligações químicas de grande número de moléculas fundamentais, cujas dimensões podem variar bastante, quando submetidas a tensões mecânicas e que voltam às dimensões iniciais, ou quase, quando se retira a tensão responsável pela deformação. A borracha empregada, para utilização na modificação do ligante, deve possuir algumas características, tais como: o material deve ser uniforme, tanto física quanto quimicamente (facilita a mistura e torna o processo constante), ser livre de metais e conter baixos teores de fibras.

Tentativas de incorporação de borracha em asfalto, visando a melhoria de suas características, existem há mais de um século, quando pesquisadores franceses modificaram cimentos asfálticos com látex, KEITZMAN, et. al. (1992). O uso de borracha moída, oriunda de pneu em misturas asfálticas, tendo, a priori, o objetivo de resolver problemas ecológicos causados pelo descarte de pneumáticos na natureza, data dos anos 1960, nos Estados Unidos e Europa. No Arizona, esta experiência mostrou uma diminuição na susceptibilidade térmica e um aumento de ductibilidade, resiliência e ponto de amolecimento do ligante (CHOUBANE *et al.*, 1999).

3.1.1. Borracha Natural

A borracha natural ou sintética é resultado da coagulação do látex de determinadas plantas, sendo a *Hevea Brasiliensis*, nome científico dado a popular seringueira, a principal. Por acidente, Charles Goodyear descobriu, em 1840, o processo de vulcanização da borracha, que consistia no aquecimento do látex na presença de enxofre, formando ligações cruzadas nos polímeros e desenvolvendo uma estrutura tridimensional mais rígida e resistente. Essa descoberta alavancou o uso da borracha e processos melhorados de vulcanização, tornou a borracha um produto internacional de grande utilidade. Foi justamente nesta época que a Região Norte do país experimentou um momento de grande prosperidade, tornando-se a região econômica do país, no início do século XX. No entanto, as condições criadas, durante a Primeira Guerra Mundial, fizeram com que a Alemanha desenvolvesse um produto sintético com as propriedades da borracha natural, dando início à industrialização da borracha sintética (PETROFLEX, 2004).

Comercialmente, a borracha é produzida a partir do látex da árvore *Hevea brasiliensis*, sendo cultivada em plantações que se localizam em regiões tropicais do sudeste asiático, especialmente na Malásia e na Indonésia. A origem da borracha natural é um líquido leitoso, denominado látex, que é uma suspensão de partículas de borracha muito pequenas. O látex líquido é recolhido das árvores, sendo levado para um centro de processamento, para ser diluído até um teor de cerca de 15% de borracha e coagulado com ácido fórmico, que é um ácido orgânico. O material coagulado é, *incontinenti*, comprimido em rolos, com a finalidade de remover a água e a produzir uma folha de material. Essas folhas são secas, ou através de uma corrente de ar quente ou, ainda, pelo calor de uma chama com fumo, isto é, folhas de borracha defumadas. As folhas, bem como outros tipos de borracha em bruto, são laminadas, geralmente, entre cilindros pesados, em que a ação mecânica de corte provoca uma quebra de algumas das cadeias poliméricas longas, reduzindo, assim, o seu peso molecular médio. A produção da borracha natural, no ano de 1980, representou, aproximadamente, 30% da produção total mundial de borracha. Várias pesquisas têm demonstrado, nos últimos anos, que

a inclusão de polímeros aos ligantes asfálticos melhora, de maneira geral, as propriedades mecânicas e de envelhecimento da mistura. De forma semelhante, tem-se notado vários estudos sobre a incorporação de pedaços ou “farelos” de borracha, proveniente da reciclagem de pneus, em misturas asfálticas (BAHIA e DAVIES, 1995; FAGER, 1996; TAKALLOU et al., 1997; SOUZA et al., 1999; WAY, 2000).

A quantidade de resíduos sólidos provenientes de indústria de borracha e do descarte de pneumáticos inservíveis tem levado a vários estudos acerca da utilização destes materiais reciclados na indústria, motivados, principalmente, pelo grande volume de resíduos gerados e seu longo período de deterioração. Várias tentativas de reciclagem têm sido testadas, confecção de tapetes e solados de borracha, estabilização de taludes e controle de erosão com mantas de pneus, uso como combustível, etc. Entretanto, com o grande volume de material gerado, principalmente em países onde o transporte rodoviário é predominante, os pesquisadores têm vislumbrado, como uma das únicas alternativas, a utilização de farelo ou pó de pneu incorporado em pavimentos betuminosos. A utilização da borracha reciclada de pneus usados em pavimentos pode ser uma solução para atenuar o problema da disposição deste resíduo. Cabe salientar, no entanto, que o principal objetivo da inclusão de farelo de pneus em cimento asfáltico ou misturas modificadas é a melhoria das propriedades de serviço e desempenho do pavimento, principalmente no que se refere à fissuração térmica, fadiga ou envelhecimento.

ELDIN e SENOUCI (1992), em um de seus primeiros trabalhos com tiras de borracha de pneus, executaram uma base de pista de teste, misturaram as tiras de borracha com materiais da região, como solo e rochas. Concluíram que houve problemas de compressibilidade. Este trabalho parece apenas estudar uma forma de disposição de pneus, sem nenhuma vantagem técnica.

3.1.2. Borracha de Pneu

Os pneus são produzidos a partir de elastômeros vulcanizados, aço, fibras e cargas. Os polímeros mais utilizados são as borrachas naturais (NR), de butadieno (BR), de estireno-butadieno (SBR), cujas concentrações variam de acordo com o fabricante e com a utilização do pneu. Pneus de caminhão representam 20% do total da frota e carros, 80% (BILLITER, 1996). Os pneus inservíveis são materiais que vem chamando a atenção de ambientalistas e da comunidade acadêmica, há muito tempo. Somente nos EUA são produzidos 250 milhões de pneus inservíveis todos os anos, que, somados aos anos anteriores, alcança a casa de bilhões de unidades (BILLITER, 1996). No Brasil, o montante de pneus/ano, colocados no mercado, chega a 68 milhões (ANIP, 2000). Atualmente existem, espalhados no país, cerca de 900 milhões de pneus inservíveis, sendo que somente 50% do total estão descartados de forma adequada (ANIP, 2000).

3.1.3 Tratamento da Borracha

ROSTAMI et al (1993), executaram estudo com tratamentos superficiais de borracha de pneus adicionados em concretos, substituíram de 0 a 100% do agregado graúdo pela borracha. Os pesquisadores trataram a borracha com tetracloreto de carbono, com água e sem tratamento e concluíram que a adição de borracha, no concreto, diminuiria a resistência à compressão, mas com o tratamento superficial da borracha, a queda da resistência seria menor.

SMITH et al (1995) realizaram estudos com diversos materiais que poderiam ser reciclados e efetuaram pesquisa com tratamento superficial de partículas de pneu com gás cloro. Os pesquisadores concluíram que o grande sucesso comercial seria o tratamento superficial de materiais recicláveis, para se adaptarem às diversas necessidades técnicas e de mercado.

CHUNG WU et al (1996), num trabalho sobre controle de fissuração no concreto, com tiras de borracha provenientes de pneus usados, com interesse na aplicação em pavimentos, para diminuição das fissuras devido às retrações, fixou em 2%, em volume, a quantidade de borracha de pneu no concreto e tratou as superfícies das borrachas com gás de plasma. Constataram que nos corpos de prova com borracha, o concreto tornou-se mais dúctil, enquanto que nos outros concretos, o rompimento foi brusco. As fissuras nos concretos, com fibras de borracha tratada, diminuíram em 15%, em relação ao concreto com fibras de borracha não tratada.

BIGNOZZI et al (1999) estudando argamassas de cimento contendo descartáveis de polímeros, trabalhando com partículas de borracha de pneus, entre outros produtos; tratou-as com silano, nas superfícies dos polímeros, para obter maior aderência. Notaram que as resistências à compressão e à flexão diminuíram com o acréscimo de borracha na argamassa. Concluíram que, com aplicação de silano na borracha, houve maior aderência entre a borracha e a argamassa e a porosidade diminuiu, em relação à argamassa com borracha sem tratamento.

LEE et al (1993) realizaram ensaios com pasta de cimento com borracha; comparando estes resultados a uma pasta de cimento sem adição, constataram que, no ensaio a compressão, usando pó de borracha nas proporções de 0%, 2%, 4% e 6% com granulometria de 10 mesh, verificaram que, com o aumento da quantidade de borracha adicionada à pasta, a resistência à compressão diminuía linearmente, pois a cada adição de 2% em massa do pó de borracha, a resistência à compressão diminuía, em cerca de 16%.

Na resistência à tração da pasta de cimento, trataram superficialmente a borracha com ácido nítrico diluído, com proporção de 0%, 5% e 15% de borracha, e granulometria de 20 e 40 mesh, comparando os corpos de prova com outros corpos de prova com borracha sem tratamento. Constataram que, com a adição de borracha, a resistência à tração do material diminuía, independentemente do tamanho das partículas de borracha, mas, com o tratamento superficial da borracha, a resistência à tração do material foi praticamente a mesma, com 5 e

15% de adição. Notaram queda na resistência à flexão, quando submetidos a ciclos de gelo-degelo.

Finalmente, concluíram que a adição da borracha diminui a resistência da pasta de cimento, mas pode ser minimizada por um tratamento apropriado da superfície da borracha.

LEE et al (1998) estudaram as propriedades de concreto de cimento Portland, contendo partículas de borracha de pneus. Trataram as superfícies das borrachas com pasta de cimento e polímero obtido da celulose. Constataram perda de resistência à compressão e flexão, com a adição de borracha no concreto, mas ocorreu excelente flexibilidade, ductilidade e boa absorção de energia, quando comparados ao concreto convencional. Os autores notaram que o tratamento superficial da borracha teve melhor resultado com o polímero de celulose.

RAGHAVAN (1999), utilizando fibras de borrachas de pneus, estudou o comportamento das argamassas, quanto à resistência à compressão e a resistência à flexão. Para verificar a aderência entre a borracha e os compósitos, o autor fez ensaios com pasta de cimento. Raghavan usou produtos à base de silanos, que é a matéria-prima para a fabricação de silicones, como ponte de aderência, para tratamento das superfícies da borracha e ensaiou os corpos de prova curados, em temperatura ambiente e temperaturas variando de 150 a 180 C°. Constataram que o comportamento dos compósitos tornou-se dúctil, indicando maior aderência entre a borracha e a pasta de cimento.

BIGNOZZI et al (1999), realizando estudos com argamassas contendo partículas de borracha de pneus, entre outros produtos, tratou-as com silano, nas superfícies dos polímeros, para obter maior aderência. Eles constataram que as resistências à compressão e à flexão diminuía, com o acréscimo de borracha na argamassa, concluindo que, com aplicação de silano na borracha, houve maior aderência entre a borracha tratada e a argamassa.

SEGRE (1999) estudou a reutilização de borracha de pneus usados, como adição em pasta de cimento. A pesquisadora verificou a reutilização de borracha moída de pneus usados,

como adição em pasta de cimento, tratando as partículas de borracha com soluções aquosas de H₂SO₄ e NaOH, procurando aumentar a hidrofiliabilidade da superfície das mesmas, para compatibilizá-las com a matriz de cimento. A pesquisadora notou que, nas micrografias eletrônicas de varreduras, as partículas de borracha tratadas com solução saturada de NaOH aderiam quimicamente à matriz de cimento e concluiu-se que a utilização da borracha moída de pneus, como adição e não como agregado, tornaria promissor o seu uso como material de engenharia. Em suas conclusões, podemos destacar que o tratamento superficial da borracha de pneus com solução saturada de NaOH, aumentou significativamente a aderência entre as partículas e a matriz de cimento. A Microscopia eletrônica de varredura, determinação de resistência à abrasão e energia total de fatura, foram técnicas utilizadas, pela primeira vez, para caracterizar materiais à base de cimento e borracha de pneus, e se mostraram indispensáveis, na avaliação da adesão das partículas de borracha à matriz de cimento.

As figuras 3.1 e 3.2 apresentam a micrografia eletrônica de varredura de fratura de CP, que mostra a aderência da pasta de cimento com a borracha tratada com hidróxido de sódio e sem tratamento.

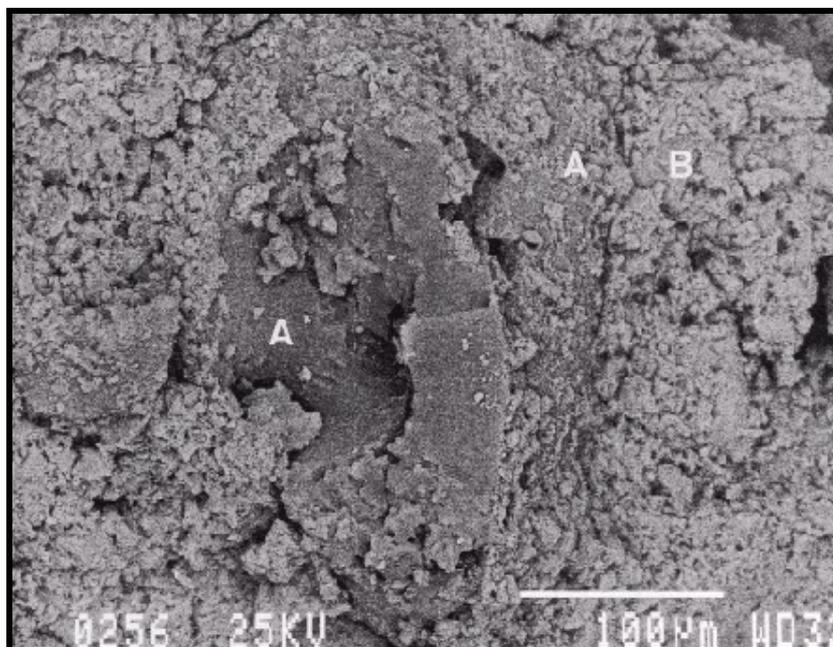


Figura 3.1 - Micrografia eletrônica de varredura de fratura de CP, que mostra a aderência da pasta de cimento com a borracha tratada com hidróxido de sódio (SEGRE-1999)

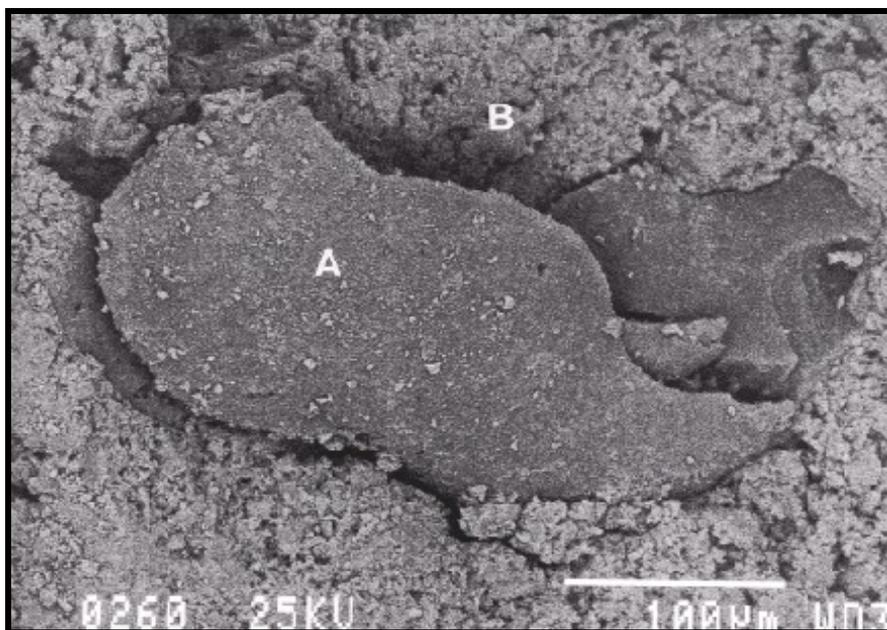


Figura 3.2 - Micrografia eletrônica de varredura de fratura de CP que mostra a aderência da pasta de cimento com a borracha sem tratamento (SEGRE-1999)

As verificações feitas relativas às propriedades do concreto com borracha sem tratamento mostraram uma redução nas propriedades mecânicas do compósito, sendo que o uso de borracha de maior granulometria diminui a resistência mecânica, quando comparados a um concreto usando granulometria menor de borracha. A adição da borracha de pneu, na formação do compósito, demonstrou que o mesmo apresenta um comportamento elástico, dando assim maior resistência a impactos. A reutilização de borracha de pneus usados, como adição em pasta de cimento, foi o objetivo do estudo realizado por Segre, sendo que as partículas de borracha foram tratadas com água (controle) e soluções aquosas de ácido sulfúrico e NaOH. Os resultados mostraram que a borracha tratada com solução saturada de NaOH apresentou o melhor desempenho, sendo que ocorreu uma melhor aderência entre as partículas e a matriz de cimento.

A perda de massa por abrasão dos corpos de prova contendo 10% de borracha tratada com NaOH foi equivalente ao controle (pasta de cimento) e muito semelhante aos corpos de prova com borracha sem tratamento, comprovando que o tratamento superficial aplicado

melhorou a aderência química da borracha à matriz de cimento. A energia total de fratura obtida para os corpos de prova com borracha foi da ordem de 25J/m², quatro vezes superior ao obtido para o controle: nenhuma diferença significativa foi observada entre os corpos de prova com borracha tratada e sem tratamento.

O ensaio de resistência à abrasão foi o único ensaio mecânico cujos resultados revelaram o que foi observado por microscopia eletrônica. Obteve-se um material à base de cimento e borracha de pneu finamente granulada, com propriedades que permitem seu uso como material de engenharia, por exemplo, como pisos e revestimento. As demais conclusões deste trabalho podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- A resistência à flexão dos corpos de prova contendo 10% de borracha foi estatisticamente maior que o controle;
- A resistência à compressão dos corpos de prova, contendo 10% de borracha tratada com NaOH, foi reduzida em 34%, quando comparada com controle, enquanto que, na literatura, a redução foi de 41%, com a adição de 6% de borracha;
- A absorção de água para os corpos de prova com 10% de borracha tratada com NaOH foi estatisticamente menor, com relação às demais preparações e ao controle, indicando que a borracha tratada diminuiu a porosidade do material;
- O perfil das curvas de tensão em função da deformação indicou que os corpos de prova com borracha foram capazes de sustentar, por mais tempo, a carga aplicada;
- A perda de massa por ataque ácido diminuiu significativamente com a inclusão da borracha, sendo mais um indicativo de diminuição de porosidade;

- A exposição dos corpos de prova, à temperatura de $85^{\circ}\pm 5C$, levou a uma diminuição significativa da absorção de água por capilaridade. As micrografias eletrônicas desses corpos de prova mostraram que o aumento da temperatura fez com que a borracha se molde à matriz de cimento, melhorando ainda mais a adesão;
- A inclusão da borracha tratada com solução saturada de NaOH não alterou a densidade do material;
- A caracterização por micro-espectroscopia no infravermelho indicou que as partículas de borracha de pneus utilizadas são constituídas de uma mistura de borracha natural e SBR;
- Observou-se um aumento na retração por secagem dos corpos de prova contendo borracha.

MENEGUINI E PAULON (2003), estudando o comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha, determinaram as principais propriedades mecânicas de uma argamassa de cimento e areia, tendo, como adição, o uso de borracha moída de pneus usados, tratados com solução de hidróxido de sódio comercial, buscando obter, com o tratamento superficial da borracha de pneus usados, melhor interface entre a borracha e a argamassa de cimento e areia. Os resultados foram comparados a uma argamassa convencional de areia e cimento. Concluíram haver grande aplicabilidade desta argamassa, com adição de borracha, na construção civil.

Um dos melhores resultados desta pesquisa foi o ensaio de desgaste por abrasão. Este ensaio foi realizado para determinar o desgaste por abrasão, segundo a NBR 12042 de 1992, de materiais inorgânicos. O desgaste do corpo de prova deve-se dar, através do atrito entre sua superfície de uso e a superfície de um anel de ferro fundido, que é continuamente abastecido com um material abrasivo, onde o desgaste por abrasão é determinado pela perda de espessura do corpo de prova. O material abrasivo, neste caso, é a areia seca número 50 (0,3mm),

conforme NBR 7214. O equipamento é provido de contador automático do número de voltas da pista de desgaste. Os resultados dos ensaios de desgaste por abrasão são apresentados na figura 2.3.

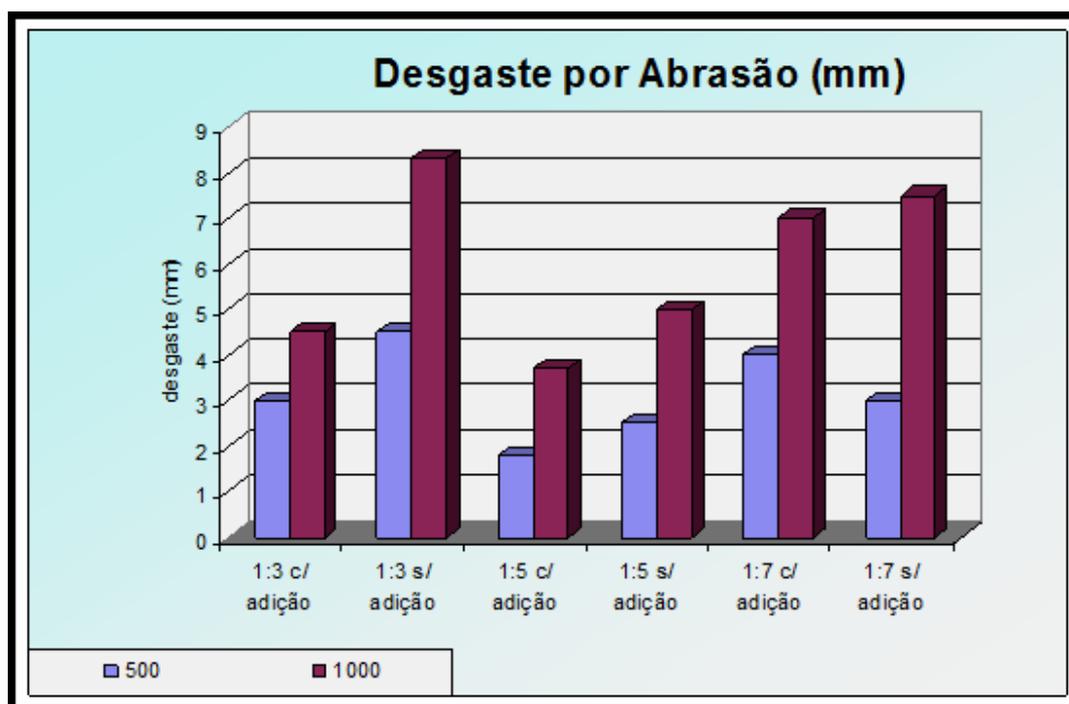


Gráfico 2.3 - Ensaios de desgaste por abrasão (MENEGUINI E PAULON-2003)

Para o traço 1:3, quando adicionamos pó de borracha na mistura, a perda de densidade foi de 9,49 %; enquanto que, para os traços 1:5 e 1:7, as perdas foram de 12,06% e 15,31%.

Os ensaios para determinação do desgaste por abrasão foram realizados no Laboratório da Empresa Falcão Bauer, através de ensaio normalizado, aos 28 dias, utilizando argamassas com pó de borracha tratadas com hidróxido de sódio comercial e argamassas de controle sem adição de borracha

MENEGUINI E PAULON (2003) constataram que, no ensaio dos corpos de prova com o traço 1:3, a resistência à abrasão aumenta, quando comparados ao controle. No traço 1:3, a argamassa sem adição do pó de borracha, teve desgaste 8,25 mm, em média, aos 1000 m de percurso e, enquanto que, com adição de borracha, obtivemos o valor de 4,75 mm de desgaste, aos 1000 m, obtendo-se, assim, um aumento de 45,78 % da resistência de desgaste à abrasão. Para os traços 1:5 e 1:7, aos 1000m de percurso, o aumento da resistência ao desgaste foi de 26,0% e 6,66%, respectivamente.

Para o percurso de 500m, os resultados do ensaio de desgaste foram proporcionais aos resultados do percurso de 1000m, exceto para o traço 1:7, tanto para a mistura com adição, quanto para a mistura sem adição de borracha, pois constatamos desagregação e grande quantidade de vazios dos corpos de prova aos 250 m de percurso. Este fato ocorreu porque a quantidade de cimento, na mistura, é menor, quando comparado às outras dosagens.

Com isso, concluíram que:

- O uso do pó de borracha de pneus usados, que foram utilizados neste trabalho, devido à sua finura, proporcionou uma argamassa mais coesa, fazendo com que o pacote granulométrico se apresente mais fechado;
- Com o tratamento superficial com hidróxido de sódio comercial, utilizado no pó de borracha, houve um aumento da adesão na interface, entre a argamassa e o pó de borracha, notados nos ensaios de absorção de água por capilaridade e no ensaio de desgaste por abrasão;
- A diminuição das partículas de borracha, nos leva ao melhor desempenho do comportamento dos materiais, conforme citado na literatura e comprovado por este estudo;

- A adição do pó de borracha de pneus usados, tratados com hidróxido de sódio comercial, melhora a trabalhabilidade de argamassas, talvez até substituindo, em alguns casos, o uso de aditivos;
- O aumento da quantidade de pó de borracha, tratada com hidróxido de sódio comercial nas argamassas, não compromete a absorção de água por capilaridade, mas devemos definir a quantidade ideal de borracha, como no traço 1:7, em que a adição nos proporcionou uma melhora significativa na absorção de água, quando comparados com os testemunhos;
- Com a adição de certa quantidade de pó de borracha à argamassa, a resistência à compressão não diminui, devendo-se, de certa forma, adicionar a quantidade suficiente e necessária para se obter resultados que, com sua adição, melhorem o desempenho da argamassa para determinados fins, verificando-se até que ponto o comprometimento da estrutura seja aceitável;
- Quanto maior a quantidade de pó de borracha adicionada à argamassa, a resistência à compressão diametral diminui, mas, esta diminuição é bem menor, do que quando comparados à resistência à compressão axial, notando-se que, com a adição de borracha tratada com hidróxido de sódio comercial, esta diminuição é menor, proporcionalmente aos concretos e argamassas convencionais, devido ao tratamento superficial do pó de borracha de pneus, que aumenta a aderência entre a borracha e a matriz, diminuindo sua porosidade;
- Os gráficos de tensão-deformação das argamassas nos apresentam uma curva, tanto nas misturas com adição ou sem adição de borracha, tendo praticamente o mesmo comportamento. Portanto, a adição de pó de borracha de pneus, não influencia na tenacidade das argamassas, mas, sim, somente no módulo de elasticidade;

- A adição do pó de borracha de pneus tratados com hidróxido de sódio comercial, na argamassa, aumenta a resistência ao desgaste por abrasão. Para um traço rico em cimento e pó de borracha, na argamassa, o aumento da resistência ao desgaste por abrasão foi considerável;
- A adição do pó de borracha de pneus na argamassa, como já era esperado, diminui a densidade aparente da argamassa, proporcionando economia para certas aplicações;
- O pó de borracha de pneus usados, tratados com hidróxido de sódio comercial, poderia ser utilizado na construção civil, como material inerte, com as vantagens inerentes ao fechamento do pacote granulométrico.

3.2. Asfalto-Borracha

As aplicações típicas do asfalto-borracha são tanto em pavimentos novos quanto em restaurações. O ligante é empregado em praticamente todas as utilizações comuns e ligantes asfálticos, entretanto seus benefícios são mais evidentes quando utilizados em SAN- Stress Absorbing Membrane, em SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) [estes processos constituem no espalhamento do ligante sobre o pavimento e posterior cobertura por um agregado pré-aquecido] ou em CBUQ, utilizado para recuperação de pavimentos com fissuração excessiva.

O desmonte dos pneus pode ser feito de várias maneiras, incluindo o cisalhamento mecânico da borracha à temperatura ambiente, o congelamento do material e posterior cisalhamento e o processo de extrusão com o uso de aditivos (BAHIA E DAVIS, 1995). Outra maneira de se obter borracha granulada é o reaproveitamento da raspa proveniente da preparação dos pneumáticos para recauchutagem.

Além dos processos, úmido e seco, existe um terceiro, denominado processo misto, no qual a mistura é feita de forma semelhante ao da via seca, porém com o uso do ligante modificado com borracha. A melhor interação entre os ligantes modificados e os grânulos de borracha leva a concretos asfálticos de boa qualidade e um grande consumo de borracha, o que torna o processo misto bastante atrativo, do ponto de visto ambiental.

Para a mistura úmida, a pesquisa tem o efeito de percentual da granulometria de borracha, do tempo e da temperatura de mistura e suas interações e efeitos nas propriedades do ligante, segundo ensaios tradicionais e da metodologia SUPERPAVE, verificando a mistura de níveis médios, o efeito da rotulação do cisalhador durante o processo de mistura do ligante com a borracha.

As propriedades de separações de fases asfalto/borracha, durante a estocagem, são avaliadas de forma a conhecer o efeito da adição de grânulos de borracha, via úmida, sob vários aspectos que condicionem o bom desempenho de uma mistura volumétrica, estável, deformabilidade elástica, resistente a tração com propriedades a fadiga e deformação permanente, com adesividade, etc.

O asfalto-borracha é um asfalto modificado por borracha moída de pneus. Além de ser uma forma nobre de dar destino aos pneus inservíveis, resolvendo um grande problema ecológico, o uso de borracha moída de pneus, no asfalto, melhora, em muito, as propriedades e o desempenho do revestimento asfáltico. O asfalto-borracha é aplicado por equipamentos convencionais de pavimentação. É recomendado para aplicações que requeiram do ligante asfáltico um desempenho superior, alta elasticidade e resistência ao envelhecimento, tais como revestimentos drenantes, SMA (Stone Mastic Asphalt), camadas intermediárias de absorção de tensões, camadas anti-reflexão de trincas e outras.

Podemos citar as seguintes vantagens do asfalto-borracha, quanto à sua utilização:

- Alta elasticidade;
- Alta resistência ao envelhecimento;

- Alta coesão;
- Excelente relação custo/benefício;
- Maior durabilidade (vida útil) do pavimento, com propagação de trincas e formação de trilhas de roda em velocidade menor que do CAP puro;
- Alta viscosidade, possibilitando maior recobrimento do pavimento, o que propicia redução da sensibilidade a variações térmicas;
- Aumento da elasticidade, que melhora a aderência do pneu ao pavimento, aumenta a resistência à ação química de óleos e combustíveis e reduz ruído (três a cinco decibéis);
- Maior resistência ao envelhecimento, que propicia o aumento da deformação de tração admissível e, assim, a redução da propagação de trincas e da formação de trilhas de roda.

O asfalto-borracha, constituído de 20% de pó de pneu usado, começa a ser aplicado em larga escala em algumas estradas brasileiras. A Concessionária Ecovias está aplicando o uso do também chamado asfalto “ecológico” em 146 dos 191 quilômetros que está recapeando no sistema Anchieta-Imigrantes, em São Paulo. Entre as capitais, Curitiba (PR) foi a primeira a usar o novo tipo de asfalto. A Prefeitura pretende executar sete quilômetros de ruas urbanas pavimentadas com esse produto. Em São Paulo, a Prefeitura começou a usar o asfalto-borracha e já tem vários quilômetros de ruas asfaltadas.

As informações variam um pouco de uma fonte para outra, mas todas confirmam que, mesmo mais caro, o asfalto-borracha é mais resistente e compensa o custo elevado. O diretor-superintendente da Ecovias, João Lúcio Donnard, diz que, o novo tipo de asfalto é 30% mais caro e 40% mais resistente do que o convencional. A diferença pode parecer pequena, mas ele garante que é vantajosa, no longo prazo. Tanto que a Ecovias pretende chegar a 2010 com todo o sistema formado pelas rodovias Anchieta e Imigrantes pavimentados com o novo produto. O asfalto-borracha, constituído de 20% de pó de pneu usado, começa a ser aplicado em larga escala em algumas estradas brasileiras.

Todo pneu, em algum momento, se transformará em um resíduo potencialmente danoso à saúde pública e ao meio ambiente. Para acabar com isto, uma solução à sua destinação final deverá ser adotada (BERTOLLO, et. al: 2000).

A recuperação de energia e a recauchutagem foram as primeiras formas de reciclagem de pneus. Com o avanço tecnológico, surgiram novas aplicações, como o asfalto ecológico, apontada hoje para o mundo como uma das soluções para o problema. O pó gerado pela recauchutagem e os restos de pneus moídos podem ser misturados ao asfalto, aumentando sua elasticidade e durabilidade. (BERTOLLO, et. al: 2000).

A mistura do asfalto com a borracha não é uma tecnologia nova, tem aproximadamente 40 anos de vida. Foi desenvolvida no Arizona, Estados Unidos, por um técnico chamado Charles Mac'Dowell, que registrou sua patente depois de 10 anos de experiências, estudos e análises experimentais. O pneu é reciclado e triturado, dando origem à borracha granulada, sendo necessário haver a fusão entre os dois materiais, ou seja, dar origem a um terceiro produto, que não é nem o primeiro, nem o segundo, consistindo numa tecnologia altamente avançada, embora tenha 40 anos de idade (BERTOLLO, et. al: 2000).

O asfalto que se usa para fazer a mistura asfáltica é chamado de CAP (cimento asfáltico de petróleo), exercendo a função de ligante, pois, quem suporta as cargas é a pedra (brita), mas é preciso envolver a pedra, e é por isto que se usa o CAP. O ligante não agüenta muito bem as cargas e envelhece com o tempo. Quando fabricado, apresenta tonalidade negra e vai ficando cinza até chegar ao cinza bem claro, e quanto mais velho, vai ficando mais duro e quebradiço (BERTOLLO, S.A.M; JUNIOR, J.K.F; VILLAVERDE, R.B; FILHO, D.M: ABPL, 2000).

Desta forma, verifica-se que todo asfalto tem uma vida útil determinada. Uma estrada não é construída para durar 50 anos. Ela é feita para durar cerca de 10 anos, porque existe o processo natural de envelhecimento do ligante asfáltico, que é um produto perecível. Mas quando se funde a borracha com o asfalto, sua vida útil passa a ser de 25 a 30 anos.

Através desta técnica, além do aumento na durabilidade, o custo de pavimentação é diminuído e se reduz pela metade a espessura do asfalto que está sendo aplicado, a brita que vai utilizar, energia elétrica, o transporte da massa e a compactação. Reduzem-se tudo, por isto há um ganho considerável nesta tecnologia ecologicamente correta. Outro benefício trazido por este pavimento ecológico é a redução do nível de ruído provocado pelo tráfego, sem contar que o pavimento asfalto-borracha, quando molhado, apresenta as mesmas condições para frenagem de um pavimento asfáltico convencional seco ((BERTOLLO, S.A.M; JUNIOR,J.K.F; VILLAVERDE,R.B;FILHO, D.M: ABPL, 2000).

Considerando todos estes benefícios econômicos e ecológicos para a redução do volume e para reutilização ou reciclagem, é necessário que fabricantes de pneus, órgãos reguladores e fiscalizadores, universidades e institutos de pesquisa trabalhem em parceria, para então aplicarem a técnica com mais frequência, e, com isto, solucionar o gravíssimo problema que é a disposição final de pneus usados no Brasil e no mundo (GONTIJO, Paulo; 2005).

A Resolução ANP nº 39, de 24 de dezembro de 2008, estabelece a primeira regulamentação, em âmbito nacional, da qualidade e uma classificação dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus, mistura denominada asfalto-borracha. Em geral, o asfalto-borracha contém de 15% a 25% de borracha de pneus. A medida visa propiciar ao mercado e ao usuário final um revestimento asfáltico de qualidade superior, melhorando as condições da pavimentação rodoviária no País e, ao mesmo tempo, incentivar a opção por uma destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis, em atendimento à Resolução Conama 258/1999. Estima-se que cerca de 15 milhões de pneus usados sejam descartados irregularmente, em depósitos e terrenos baldios do país, a cada ano (GONTIJO, Paulo, 2005).

A Resolução ANP N°39/2008 estabelece a obrigatoriedade da emissão do Certificado da Qualidade para o asfalto-borracha, a ser emitido pelo distribuidor de asfaltos, responsável pela mistura da borracha moída de pneus ao CAP (cimento asfáltico de petróleo) e legalmente

responsável pela garantia da qualidade do produto até o consumidor final (concessionárias de rodovias e empreiteiras de obras), conforme especificada no Regulamento Técnico nº 5/2008, anexo à Resolução. O regulamento classifica dois tipos de asfalto-borracha, segundo a viscosidade (AB8 e AB22).

Patenteado nos Estados Unidos, nos anos 60, o asfalto-borracha é utilizado principalmente naquele país, além da África do Sul, Austrália, Canadá, China e Portugal. Alguns departamentos estaduais de rodagem brasileiros, como os do Paraná e São Paulo, e o Deinfra, de Santa Catarina, já contemplam a utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação, sob sua jurisdição.

Pesquisas e estudos sobre o asfalto-borracha são realizados no Brasil há pelo menos uma década. Trabalhos que compararam pistas revestidas com asfalto-borracha e pistas revestidas com CAP confirmam as vantagens técnicas do produto. Apesar do beneficiamento da borracha crescer 20 a 25% o custo do asfalto-borracha, no longo prazo o custo na manutenção do pavimento é reduzido, já que, segundo pesquisas realizadas por Universidades brasileiras, o asfalto-borracha resiste mais às variações de temperatura e de fluxo de carga (tráfego).

3.2.1. Compatibilidade entre polímeros e CAP

Os polímeros aplicáveis, evidentemente, devem ser quimicamente compatíveis com o asfalto a ser modificado, para que, posteriormente não ocorra a separação de fases das misturas (asfaltos +polímeros). Dá-se o nome de aderência química ao processo de solidarização entre o asfalto e o modificador polimérico. A questão da compatibilidade entre o polímero e o CAP é fundamental nos processos de modificação, pois problemas de heterogeneidade, após mistura, incorrem em fases separadas dos materiais, e o CAP poderia ter comportamento pior que o CAP original. Por outro lado, a mistura será completamente homogênea quando os óleos do asfalto tenham digerido os polímeros por completo; assim, resulta a mistura em um ligante

estável, porém, sem alterar praticamente as propriedades do CAP, eventualmente apenas aumentando sua viscosidade.

A mistura, portanto, deverá ser do tipo heterogêneo, com duas fases finamente intertravadas, quando o polímero se expandirá, ao absorver parte das frações oleosas do CAP; nesta situação, o CAP é, de fato, modificado, sendo que nele existirá uma fase polimérica e uma fase asfáltica (parte pesada). O consumo de óleos do CAP, para a digestão das borrachas finamente moídas incorporadas ao material deve ser compensado pela introdução de óleos extensores na mistura.

3.2.2. Porcentagem de polímeros na mistura

O CAP é classificado de acordo com o teor de borracha, na mistura. As classificações são apresentadas a seguir:

- **Baixa (<4%)** - O CAP resulta na fase contínua e o polímero, na fase dispersa de aumento da coesão e da elasticidade do material. Com a temperatura de 60° C, o módulo resiliente do polímero é maior que do CAP; há aumento do módulo resiliente. Sob baixas temperaturas, a rigidez do polímero é menor que aquele do CAP, reduzindo sua fragilidade e, reduzindo, portanto, sua temperatura de vitrificação ou de cristalização;
- **Elevada (>7%)** Os polímeros tornam-se matriz, são plastificados pelos óleos aromáticos do CAP, e os asfaltos são dispersos. As propriedades do CAP alteram muito e dependem essencialmente daquelas dos polímeros. Resultaria em um adesivo termoplástico e não em um CAP modificado.
- **Média (~5%)** Poderá resultar numa estrutura com duas fases contínuas e intertravadas, na mistura de controle mais difícil e com possíveis problemas de estabilidade coloidal.

Até recentemente, um dos problemas relatados, em relação aos CAPs modificados, era a sua estabilidade durante a armazenagem, ou seja, sua capacidade de permanecer estável, em duas fases homoganeamente intertravadas, evitando, assim, sua separação e sedimentação. O

controle de tal estabilidade é realizado pela seleção de polímeros que possuam partículas de diâmetros bem pequenos e com densidade próxima àquela do CAP. Tais problemas de estabilidade seriam agravados pelo emprego de CAP menos viscoso.

3.3. Modificação do CAP por adição de Borracha em pó (moída)

Em face do apelo ambiental sobre a destinação final da borracha de pneus, as indústrias produtoras desse tipo de material devem, legalmente, dar uma destinação final ao material descartado após uso, que geralmente é a própria reciclagem da borracha. A trituração dos pneus pode resultar em dois tipos de materiais para incorporação ao asfalto, porém de forma muito distinta: como agregado ou como modificador de asfalto. Neste capítulo, trataremos do CAP modificado com borracha triturada.

A forma mais elaborada de incorporação da borracha é triturá-la finamente (com diâmetro reduzido a milímetros) e previamente incorporá-la ao CAP, o que é realizado a quente (temperatura próxima a 200° C) em tanques, com auxílio de elevado esforço mecânico de cisalhamento, sendo o tempo de reação da mistura entre 20min e 120min, dependendo de inúmeras condições.

Primeiramente, há que ter controle da homogeneidade microestrutura da borracha; há preferência, assim, do emprego de borracha proveniente diretamente da linha de produção de pneus (descarte) com características homogêneas. Emprego de borracha triturada heterogênea, com diferenças de proporções entre borracha natural e sintética, resulta em variações apreciáveis nas características do CAP modificado com borracha. Há que considerar que a borracha de pneumáticos de veículos de passeio usa muito mais insumos derivados de petróleo que a borracha de pneus de caminhões, que emprega mais borracha natural.

No processo de digestão da borracha finamente moída ao CAP, há necessidade de introdução de óleos aromáticos de maltenos (saturados) que atuem sobre as partículas de borracha, para auxílio na digestão da borracha. Note que, se não se introduzirem óleos

extensores, a borracha consumirá aromáticos dos maltenos disponíveis no CAP, que necessariamente deverão ser recompostos. A viscosidade da mistura, sem a adição de óleo extensor, poderá subir além do aceitável. Esses óleos extensores, ricos em maltenos, como os agentes de rejuvenescimento empregados na reciclagem a quente de misturas asfálticas, são aplicados em taxas de 5% a 20% do peso de CAP na mistura com borracha.

Geralmente, a borracha substitui até 15% do CAP, o que, de certa maneira, traz alguma vantagem na fabricação do material modificado, já que atualmente seu custo é da ordem de 60% do CAP. Convém ressaltar, no entanto, que os CAPs modificados com borracha, fabricados no Brasil em anos recentes, têm sido produtos híbridos, com incorporação simultânea de SBS. Esse procedimento está relacionado à baixa melhoria na recuperação elástica obtida pela incorporação exclusiva da borracha.

Quanto ao asfalto-borracha incorporado, a taxa de até 15% de borracha no ligante, geralmente é empregada para misturas asfálticas densas. Asfaltos modificados na faixa de 18% a 25% de borracha apresentam elevada viscosidade e são preferencialmente empregados na confecção de misturas asfálticas abertas ou descontínuas (FAXINA e SÓRIA, 2003).

MONEA (2006) e SEGRE (2000), considerando a dificuldade de se reciclar pneus, devido à dificuldade de se quebrar as ligações cruzadas da borracha, devido à adição do enxofre na mistura, utilizam o termo regeneração da borracha, que acreditamos seria o termo correto no meio acadêmico e neste nosso trabalho. Pois, a borracha não pode ser reciclada, em função da dificuldade da quebra molecular das ligações do enxofre.

A reutilização de borrachas vulcanizadas é, atualmente, um dos principais problemas na área de reciclagem (ADHIKARI, B; MAITI, D; 2000), por serem termorrígidas, como consequência de ligações químicas cruzadas entre as cadeias do polímero, que impedem a fusão e o reprocessamento. Dentre as alternativas para o reaproveitamento destes materiais estão a queima e utilização como fonte de energia e combustíveis, o uso como cargas em materiais para

construção civil, em polímeros termoplásticos ou termorrígidos e na produção de novos materiais. Neste último caso há necessidade de receber algum tipo de tratamento específico que permita a sua re-moldagem. Dentre estes tratamentos encontra-se, por exemplo, a quebra destas ligações cruzadas por processos químico e/ou físico. Esta técnica é chamada de desvulcanização (SHARMA, V.K; FORTUNA, F; MINCARINI, M; BERILLO, M; CORNACCHIA, G; 2000).

Ao contrário do que o nome pode sugerir a desvulcanização de uma borracha não é simplesmente a reversão do processo de vulcanização, responsável pela formação destas ligações cruzadas. Durante a desvulcanização, uma série de modificações é imposta ao material, o que lhe confere propriedades únicas, diferentes da composição de borracha antes da vulcanização. Dentre estas modificações pode-se citar: a quebra das ligações cruzadas, normalmente formadas por átomos de enxofre; a quebra de ligações C-C e C=C da cadeia principal do polímero; a formação de estruturas secundárias na cadeia do polímero, devido à quebra das ligações químicas e o conseqüente aparecimento de radicais livres; a formação de ramificações; e a diminuição da massa molar do polímero. As modificações na estrutura polimérica dos elastômeros têm um reflexo direto nas propriedades mecânicas e reológicas do material reciclado e ocorrem em maior ou menor grau dependendo do processo de desvulcanização utilizado (SHARMA, V.K; FORTUNA, F; MINCARINI, M; BERILLO, M; CORNACCHIA, G; 2000).

Devido ao surgimento de novas propriedades no material desvulcanizado torna-se necessário realizar uma caracterização completa destes materiais. Esta caracterização tem dois objetivos principais: i) permitir um conhecimento teórico dos processos que ocorrem durante a desvulcanização, possibilitando, assim, melhorias no processo; ii) ampliar a faixa de possíveis aplicações deste material, assim como ocorre com qualquer material novo.

CHEUNG et al (2010), desenvolveram pesquisas em Hong Kong, com vários tipos de pavimentos, e, entre eles, o asfalto-borracha. Executaram uma pista de asfalto-borracha e realizaram ensaios de laboratório. Os autores concluíram que a pista testada é melhor que o

asfalto convencional, de controle, tanto nos ensaios de desempenho como nos ensaios de laboratório. Constataram, também, alta resistência aos danos causados pela água.

Recentemente, JINGHUI LIU (2011) realizou testes de rompimento à flexão em laboratório, comparando um asfalto convencional, asfalto-borracha à quente e asfalto-borracha no processo seco.

O autor constatou que o asfalto borracha à quente teve o melhor desempenho, em cerca de 50% melhor que o asfalto convencional. O asfalto borracha a seco teve melhor desempenho que o asfalto convencional, mas seu desempenho foi inferior ao asfalto borracha à quente. Este asfalto à quente é sugerido nesta tese

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Considerações Iniciais

Este capítulo tem o objetivo de descrever os ensaios realizados para analisar o comportamento do concreto asfáltico de petróleo, com a incorporação de pó de borracha tratada com hidróxido de sódio, e não tratada superficialmente, obtendo-se, desta forma, as propriedades principais, tanto dos materiais constituintes, como dos concretos asfálticos de petróleo. Portanto, foram realizados ensaios, tendo, como referência, as normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou de normas internacionais.

Primeiramente, com o objetivo de caracterizar os componentes do concreto asfáltico utilizados nesta pesquisa, procuramos definir suas propriedades físicas e mecânicas. Realizamos os ensaios de granulometria do pó de borracha, do pó de borracha tratada superficialmente com hidróxido de sódio, da pedra e do pó de pedra; ensaio de massa específica unitária do pó de borracha, da pedra e do pó de pedra; ensaio de densidade aparente do pó de borracha tratada e não tratada, assim como a densidade aparente da pedra e pó de pedra; ensaio de equivalente de areia, ensaio de abrasão Los Angeles para a pedra e ensaio de definição de traço.

Os resultados dos ensaios de caracterização do asfalto foram fornecidos pela Ipiranga Asfaltos S.A. Posteriormente, foram confeccionados corpos de prova com o ligante asfalto-borracha tratada e sem tratamento; e ensaios do concreto asfáltico de petróleo, com a utilização de pó de borracha tratada e sem tratamento.

Para o ligante asfalto-borracha, foram realizados ensaios de recuperação elástica, ensaio de ponto de amolecimento, ensaio de penetração, ensaio de recuperação elástica na torção, ensaio de viscosidade Spindle, ensaio de recuperação elástica com ductilômetro e ensaio de envelhecimento. Após os ensaios de envelhecimento, foram realizadas, nestas amostras

envelhecidas os ensaios de ponto de amolecimento, penetração, viscosidade, recuperação elástica, ponto de fulgor, densidade relativa, ECA (variação de massa) e ECA (% de penetração original). Os ensaios com e sem envelhecimento são sempre comparados.

Os ensaios Marshall nos corpos de prova foram realizados para definição da porcentagem de vazios, relação betume/vazios, vazios de agregado mineral, densidade aparente dos corpos de prova, ensaio de estabilidade da mistura, fluência, definição do teor de asfalto, fluência e ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

4.2. Pó de Borracha

Toda a borracha utilizada como substituição na mistura foi obtida através da moagem de pneus usados de caminhões e automóveis pela empresa Ecobalbo Reciclagem de Pneus Ltda., localizada em Cravinhos – São Paulo.

O pó de borracha foi submetido a um tratamento de lavagem em uma solução saturada de hidróxido de sódio comercial com 95 a 100,5% de NaOH, para utilização na lavagem do pó de borracha. A solução utilizada era saturada, isto é, tinha corpo de fundo. Este processo também eliminou matérias orgânicas presentes neste material (óleos, graxas, etc.), devido à contaminação dos pneus usados.



Figura 4.2.1 - Processo de tratamento com solução saturada de NaOH

O pó de borracha ficou imerso na solução de hidróxido de sódio durante 2 horas, sendo misturada constantemente, num rotor, a velocidade de 180 rotações por minuto; atingindo, no final deste período, a temperatura da mistura de 55 °C. Depois, foi lavado com água corrente para retirada total do hidróxido de sódio (figuras 4.2.1 e 4.2.2). A água com hidróxido de sódio comercial foi neutralizada para posterior descarte.



Figura 4.2.2 - Lavagem do pó de borracha

Para garantir que todo NaOH tinha sido eliminado do pó de borracha, verificou-se o pH inicial da água (antes do tratamento) e então a borracha foi lavada até que o pH da água residual voltasse ao pH inicial. Isto foi obtido através de um papel indicador de pH (figura 4.2.3).



Figura 4.2.3 - Papel indicador de pH em contato com a água do pó de borracha após lavagem

Terminada esta etapa, a borracha foi colocada para secar no ambiente.

4.2.1. Ensaio de Granulometria do Pó de Borracha

Após a secagem do pó de borracha, determinamos as curvas granulométricas, através do ensaio de peneiramento, que consiste em um jogo de peneiras com abertura determinada pela norma DNER-ME 083/98. Deste material seco do pó de borracha tratada, assim como do pó de borracha sem tratamento, retiramos uma amostra de 1000 g de cada tipo de pó de borracha. O pó de borracha sem tratamento também foi secado no ambiente (figura 4.2.1.1).



Figura 4.2.1.1 - Pó de borracha após a secagem

4.2.2. Massa Específica Aparente do Pó de Borracha

Para determinar a massa específica aparente do pó de borracha foi realizado o ensaio de picnometria de hélio (ASTM D 6114).

4.3. Agregado

Os agregados de basalto, utilizados neste trabalho, são provenientes da empresa Serveng-Civilsan S.A., da cidade de Barueri, Estado de São Paulo. Utilizamos uma mistura de brita 1, pedrisco e pó de pedra. Realizamos ensaios de densidade aparente, granulometria da pedra e do pó de pedra, massa específica unitária e ensaio de Abrasão Los Angeles.

4.3.1. Ensaio de Densidade Real e Massa Específica dos Agregados

Utilizamos a Norma DNER-ME 084/95 para determinar a densidade real do agregado miúdo e a Norma DNER-ME 085/94 para determinar a massa específica dos materiais finos e de enchimento.

4.3.2. Ensaio de Granulometria da Pedra e do Pó de Pedra

As curvas granulométricas foram obtidas pelo ensaio de peneiramento que consiste em um jogo de peneiras com abertura determinada pela norma DNER-ME 083/98.

4.3.3. Ensaio de Abrasão Los Angeles do Agregado

O ensaio abrasão Los Angeles de agregado, segundo a norma DNER-ME 035/98, é o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina Los Angeles juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina, à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste é convencionalmente expresso em porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm.

4.3.4. Ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso Agregado Graúdo

A adesividade do agregado graúdo a ligante betuminoso, fixado pela Norma DNER-ME 078/94, é a propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso. É verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida a 40º C, à ação de água destilada, durante 72 horas. O resultado é anotado como satisfatório quando não houver nenhum deslocamento da película betuminosa, ao fim de 72 horas, e não satisfatório quando houver total ou parcial deslocamento da película betuminosa nesse mesmo tempo.

4.3.5. Ensaio de Equivalente de Areia

Este ensaio é definido pela Norma DNER-ME 054/97. O equivalente de areia é a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas.

4.4. Asfalto

O CAP é produzido especialmente para apresentar qualidade e consistência próprias para o uso na construção e manutenção de pavimentos asfálticos, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis. Este asfalto foi utilizado na produção do Ligante Asfáltico BP, produto comercial da Ipiranga Asfaltos SA, utilizado neste trabalho. O asfalto é designado como CAP 50-70, proveniente da Refinaria Planalto de Paulínia. Suas principais características estão apresentadas na tabela 4.4.1, com os dados fornecidos pela Ipiranga Asfaltos SA:

Tabela 4.4.1 - Caracterização do cimento asfáltico

PROPRIEDADES	MÉTODOS	CAP 50-70
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	NBR 6576	50-70
Ponto de amolecimento, °C, mín.	NBR 6560	46
Viscosidade Brookfield a: 135°C, cP, mín. 150°C, cP, mín. 177°C, Cp	NBR 15184	274 112 57-285
Índice de Suscetibilidade térmica	---	(-1,5) a (+0,7)
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	60
Ponto de Fulgor, ° C, mín.	NBR 11341	235
Solubilidade em tricloroetileno,% massa, mín	NBR 14855	99,5
RTFOT – Efeito do calor e do ar (163° C, 85 min) -Variação em massa, %, máx.	D2872	0,5
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	20
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	8
Penetração retida, %, mín.	NBR 6576	55

4.5. Óleo extensor (Óleo Extensor)

Produto da Ipiranga Asfaltos SA, o óleo extensor é um aditivo oleoso, rico em óleos minerais do tipo hidrocarbonetos, derivado de petróleo. É utilizado na adição ao cimento asfáltico de petróleo, para a modificação e/ou correção de algumas propriedades físico-químicas do material final obtido, atuando como estabilizante, peptizante e fluxante. Sua utilização está condicionada a execução prévia de projeto de dosagem, em laboratório. O óleo extensor tem a função de aumentar a dispersão da borracha no asfalto, através do inchamento da borracha. Este produto é fornecido a granel ou em tambor metálico de 200 kg. Este produto é adicionado ao cimento asfáltico.

Suas principais características estão apresentadas na tabela 4.5.1, com os dados fornecidos pela Ipiranga Asfaltos SA:

Tabela 4.5.1 - Caracterização do aditivo óleo extensor

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÕES	MÉTODOS
Viscosidade a 100°C, CST	26,10 – 32,78	MB-293
Ponto de Fulgor, °C	mín. - 204	NBR-11341
Densidade Relativa, 20/4°C	0,9861 – 1,0371	MB-104

4.6. Cal hidratado

A cal hidratada utilizada neste trabalho é da marca Minercal, CH-1. A cal é utilizada para melhorar a adesividade, melhora a trabalhabilidade, com a vantagem de fechar o pacote granulométrico.

4.7. Ligante Asfalto Borracha LIGANTE ASFÁLTICO BP (TIPO B)

O ligante-asfalto é um cimento asfáltico modificado com borracha de pneu moída e outros aditivos, produzidos na Ipiranga Asfaltos S.A. que, sob condições especiais de processo, apresentam características de desempenho, tais como aumento do ponto de amolecimento, resistência a tensões térmicas e mecânicas repetidas (elasticidade) e resistência ao envelhecimento e melhor adesividade sobre a pedra. Este produto é fornecido em caminhão-tanque isotérmico e em tambores metálicos de 200 litros. O ligante-asfalto BP é fabricado utilizando-se CAP50/70, com 18% de pó de borracha com o aditivo óleo extensor. Suas principais características estão apresentadas na tabela 4.6.1, com os dados fornecidos pela Ipiranga Asfaltos SA:

Tabela 4.6.1 – Caracterização do produto ligante asfáltico BP (tipo B)

PROPRIEDADES	NORMAS	LIGANTE ASFÁLTICO BP (ASFALTO ECOLÓGICO) TIPO B
Ponto de amolecimento (anel e bola), °C, mín.	NBR 6570	55
Penetração (100 g, 5s, 25°C), dmm	NBR 6576	30 – 70
Recuperação elástica a 25°C, ductilômetro, 10 cm,mín	NBR 15086	50
Ponto de Fulgor, °C, mín.	NBR11341	235
Viscosidade Brookfield a 175°C, 20 rpm, spindle 3, cP, Max	ASTM D 2196	800-2000
Perda em massa, após ensaio RTFOT, %, máx.	NBR 15235	1,0
Porcentagem da Penetração original, %, mín.	NBR 6576	55
Porcentagem da Recuperação elástica original, %, mín.	ASTM D 6084	

4.8. Ligante asfalto-Borracha LIGANTE ASFÁLTICO BPT TRATADO

Procuramos desenvolver novo ligante asfalto-borracha, com utilização de pó de borracha tratada com hidróxido de sódio comercial, para comparar com o ligante óleo extensor BP, fabricado nas instalações da Ipiranga Asfaltos S.A.. As amostras foram preparadas numa unidade da Ipiranga Asfaltos S.A., na cidade de Paulínia, SP, unidade Betel. Primeiramente, o asfalto foi colocado no reator e aquecido por duas horas, atingindo a temperatura de 200 °C; cada mistura era composta por 30 Kg de asfalto e determinada porcentagem de pó de borracha. O reator foi ajustado com a temperatura de 220 °C, com rotação das hélices de 22 rpm, durante 4 horas, seguindo padrões da empresa de asfalto Ipiranga S.A.

Apresentaremos os resultados dos testes no capítulo 4 para definição do traço do ligante asfalto-borracha com pó de borracha tratado com hidróxido de sódio comercial.

4.8.1. Descrição dos Ensaio do Ligante Asfáltico

Este item descreve os ensaios realizados nos Laboratórios da Ipiranga Asfaltos, para a caracterização do novo ligante, desenvolvido com o pó de borracha tratado com hidróxido de sódio.

4.8.1.1. Ensaio Materiais betuminosos – Determinação do Ponto de Amolecimento (Método do anel e bola)

Trata-se do método de ensaio conhecido por “anel e bola”, uma técnica arbitrária para a definição da temperatura na qual um CAP torna-se fluido. A técnica consiste na deposição de CAP fundido em um anel de latão que, após se solidificar, é disposto horizontalmente em um banho d’água, com uma bola de aço sobre seu centro. O banho é aquecido em taxa constante preestabelecida, sendo anotada a temperatura no momento em que, após atravessar o anel, a

bola tocar no fundo do vaso de vidro, sendo tal temperatura denominada ponto de amolecimento. Utilizamos a NBR 6560.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de ponto de amolecimento é apresentado na figura 4.7.1.1:



Figura 4.7.1.1 - Equipamento de ensaio para determinação do ponto de amolecimento (método do anel e bola)

4.8.1.2. Ensaio para Materiais Asfálticos – Determinação da Penetração

Este ensaio é realizado para a determinação da dureza ou consistência relativa de um CAP. No ensaio, é medida a profundidade de penetração de uma agulha sob carga total de 100 g, a uma temperatura de 25° C, durante 5 segundos. O valor medido é expresso em décimos de milímetros. Utilizamos a NBR 06576 (1998).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de penetração é apresentado na figura 4.7.1.2:



Figura 4.7.1.2 - Equipamento para ensaio de penetração

4.8.1.3. Ensaio para Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade, em temperaturas elevadas, usando um viscosímetro rotacional (Spindle 3)

O viscosímetro rotacional, conhecido popularmente nos EUA como Brookfield, consiste em um viscosímetro cilíndrico coaxial, acoplado a uma unidade de controle de temperatura, para testes com CAP novos. Em uma câmara com temperatura controlada, o asfalto é depositado, inserindo-se nela um eixo que tem rotação com velocidade angular específica. Com base no torque exigido para aquela rotação, é determinada a viscosidade do asfalto, na temperatura desejada.

Os ensaios são realizados com o método Spindle 3 para asfalto-borracha. Utilizamos a NBR 15184 (2004). Apesar de que o ensaio Spindle 3 é utilizado para o asfalto-borracha, a

Ipiranga Asfaltos desenvolveu programa computacional, que gera um gráfico das temperaturas de usinagem e compactação, em função da viscosidade e da temperatura, utilizando o ensaio Spindle 21. Este gráfico será apresentado no capítulo referente a resultados.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de determinação de viscosidade é apresentado na figura 4.7.1.3.



Figura 4.7.1.3 - Equipamento viscosímetro rotacional Brookfield

4.8.1.4. Ensaio Materiais - Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro

O ensaio de ductilidade é realizado por meio da extensão ou alongamento de pequenas amostras de CAP, moldadas em condições normalizadas, sob condições de velocidade de alongamento e temperatura especificada. A amostra é tracionada até um alongamento preestabelecido. Em seguida, é seccionado em seu ponto médio. A recuperação elástica é determinada a partir da medição do alongamento residual do corpo de prova, após a junção das extremidades. A recuperação elástica é dada em porcentagem. Utilizamos a NBR 15086 (2006).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro é apresentado na figura 4.7.1.4:



Figura 4.7.1.4 - Ensaio de recuperação elástica *Ductilomêtro*

4.8.1.5. Asfalto Modificado – Ensaio de Separação de Fase (estabilidade à estocagem)

Consiste num método para avaliação da estabilidade à estocagem a quente de asfalto, modificado por polímero em função de eventual separação de fases sob armazenamento em condições estáticas. O asfalto, modificado por polímero é colocado num tubo de alumínio, condicionado em estufa. Depois, são retiradas amostras de topo e de fundo para as quais são determinados os pontos de amolecimento. A diferença entre estes pontos de amolecimento permite uma avaliação da estabilidade à estocagem, em função de eventual separação de fases do asfalto modificado. Como resultado, obtemos a diferença entre os pontos de amolecimento das amostras superior e inferior de cada tubo, em graus Celsius. Utilizamos a norma 15166(2004).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de separação de fase é apresentado na figura 4.7.1.5:



Figura 4.7.1.5 - Equipamento para ensaio de separação de fases (estabilidade a estocagem)

4.8.1.6. Derivados de Petróleo – Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão em Vaso Aberto Cleveland

Consiste na determinação da temperatura máxima à qual pode ser aquecido o CAP sem risco de inflamação do material em presença de chama livre, como se exige no caso de seu uso em usinas misturadoras a quente. Conduzido por equipamentos bastante simples, o resultado obtido (temperatura) é razoavelmente inferior àquela temperatura na qual o CAP arderia completamente. O processo consiste no preenchimento de um recipiente aberto de latão (Vaso Aberto Cleveland) com o CAP, que é aquecido inferiormente, à taxa constante. Em períodos predeterminados de níveis de temperatura do CAP aquecidos a uma pequena chama. Quando os gases são desprendidos pelo aquecimento do CAP e são suficientes para causar uma labareda instantânea, a temperatura correspondente é chamada de ponto de fulgor. Utilizamos a NBR 11341 (2004). O equipamento, utilizado para a realização do ensaio de determinação dos pontos de fulgor e de combustão, em vaso aberto Cleveland, é apresentado na figura 4.7.1.6.



Figura 4.7.1.6 - Equipamento para determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland

4.8.1.7. Materiais Asfálticos – Determinação do Efeito do Calor e do Ar, em Uma Película Delgada Rotacional (RTFOT)

Neste ensaio, utiliza-se uma película delgada rotacional de material asfáltico, que é aquecida em estufa, durante 85 minutos, a 163 °C. O CAP é colocado em pequenas cápsulas, em um disco giratório que, dentro de uma estufa, é também submetido a jatos de ar quente, para acelerar sua oxidação. O ensaio permite verificar, em curto prazo, a alteração da consistência

por oxidação. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir das variações, nos valores dos ensaios físicos efetuados antes e após o tratamento na estufa. É indicado um procedimento para determinar a variação na massa da amostra e para obtenção de amostra para a realização de ensaios de caracterização no material envelhecido. Neste trabalho, realizaremos os ensaios de penetração com as amostras envelhecidas, comparando a porcentagem de penetração com a amostra original e o ensaio de recuperação elástica, comparando porcentagem da recuperação elástica com a amostra original. O resultado relata a porcentagem em relação à massa original da média da massa de material nos dois recipientes, antes e depois do ensaio. Utilizamos a NBR 15235 (2009).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de determinação do efeito do calor e ar em uma película delgada rotacional é apresentado na figura 4.7.1.7.



Figura 4.7.1.7 - Equipamento para determinação do efeito de calor e ar em uma película delgada rotacional (RTFOT)

4.9. Confecção dos corpos de prova do CAP

Foram escolhidos quatro traços experimentais com teores de ligante asfáltico BP e o novo ligante asfáltico BP tratado com hidróxido de sódio comercial (Ligante asfáltico BPT) com 5%; 5,5%; 6% e 6,5% de teor do ligante, para a determinação da estabilidade e da fluência, por meio da aparelhagem Marshall. O ensaio Marshall (DNER-ME 043/95) apresenta definições, o preparo de corpos de prova e os procedimentos para a obtenção dos resultados. Realizamos, também, ensaios de tração por compressão diametral, com os corpos de prova moldados para os Ensaio Marshall.

O engenheiro do *Bureau of Public Roads* dos EUA, Bruce M., propôs uma técnica de dosagem de misturas asfálticas a quente na década de 1940. Isto foi desenvolvido no Corpo de Engenheiro do Exército dos EUA (Usace) durante a Segunda Grande Guerra, consagrando tal método, ainda utilizado no Brasil (Balbo 2003). Balbo (2003) é quem melhor descreve o método, que consiste na aferição de algumas propriedades de misturas elaboradas em laboratórios (ou em campo), fixando-se sua distribuição granulométrica e variando-se o teor de betume, nos corpos de prova (em geral, de 3% a 7% de peso, em relação aos agregados). Tal método, a princípio, está limitado ao emprego com mistura asfálticas a quente.

Definida uma distribuição granulométrica que comporá os agregados da mistura asfáltica, as misturas são preparadas, de maneira a apresentar vazios internos preenchidos por ar entre 3% e 5%; tal critério, de um valor mínimo de vazios na mistura compactada, é tomado uma vez que, em pista, caso não existam vazios, os efeitos imediatamente posteriores do tráfego poderiam resultar em exsudação do ligante asfáltico, sendo necessário, portanto, espaço livre para o fluxo de ligante, em processo inicial de deformação plástica da mistura.

Durante o ensaio, são registrados os valores de força aplicada e de deformação sofrida diametralmente pela amostra de mistura asfáltica. Para cada corpo de prova ensaiado (em geral para pares com diferentes teores de betume), são extraídas duas propriedades mecânicas,

designadas por estabilidade e por fluência. Por estabilidade, entende-se o valor da força vertical máxima aplicada que leva a amostra (comprimida diametralmente) à ruptura, medida em quilos; por fluência, entende-se o valor da deformação vertical sofrida pela amostra imediatamente antes da ruptura, medida em centésimos de polegada ou em milímetros.

Outros três índices físicos da amostra compactada são empregados na dosagem Marshall: a densidade aparente do corpo de prova (relação entre sua massa e seu volume), a porcentagem de vazios (relação entre o volume de vazios e volume total da amostra compactada) e a relação betume/vazios (RBV), que é a relação entre o volume de vazios dos agregados preenchidos por betume, e o volume de vazios nos agregados. O processo de seleção do teor de betume ideal consiste em definir o teor de betume que conduz a uma RBV de 80%, definir o teor de betume que leva a uma porcentagem de vazios de 4%, definir o teor de betume que leva à maior estabilidade possível e definir o teor de betume que leva à maior densidade.

Com base nas quatro leituras de teor de betume, obtêm-se a média dos resultados devendo ser tomados os seguintes critérios:

- 1) Se o teor médio atende ao valor mínimo de estabilidade bem como aos limites de fluência estabelecidos, então tal valor médio é adotado como teor de dosagem;
- 2) Em caso negativo, será necessário ajustar o teor de asfalto até que tais condições sejam atendidas, o que poderá ser atingidos eventualmente apenas com recorrência de alteração da distribuição granulométrica da mistura.

Para a aplicação dos estudos de dosagem e produção do concreto asfáltico utilizamos a Norma DNER-ME 195/97, para obtermos a absorção e a massa específica nas condições seca e saturada na superfície seca do agregado graúdo natural.

As figuras 4.8.1 e 4.8.2, mostram os equipamentos utilizados para a Dosagem Marshall:



Figura 4.8.1 - Equipamento para ensaio Marshall (compactação)



Figura 4.8.2 - Equipamento para ensaio Marshall (prensa)

Com os resultados coletados pelo Ensaio Marshall, obteremos:

- A curva densidade / teor de ligante;
- A curva estabilidade Marshall/ teor de ligante;
- A curva Índice de vazios/ teor de ligante;
- A curva RBV/ teor de ligante;
- A curva Fluência/ teor de ligante;
- A curva vazios agregado mineral (VAM)/ teor de ligante;
- Massa específica aparente.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterização do pó de borracha

Para a caracterização do pó de borracha foram realizados ensaios de granulometria e massa específica aparente. O pó de borracha apresentou forma irregular, passando na malha 30. (No Brasil, segundo a ABNT NBR 6502/95, a classificação dos solos é feita de acordo com sua granulometria), Esta finura é especificada para a utilização do asfalto-borracha na Ipiranga Asfaltos S.A. A tabela 5.1.1 e a figura 5.1.1 apresentam os resultados do ensaio de granulometria do pó de borracha sem tratamento, com hidróxido de sódio comercial e a tabela 5.1.2 com a mesma figura 5.1.1 apresentam os resultados do pó de borracha com tratamento. Obtivemos a massa específica de 1,12 kg/dm³ pelo ensaio de picnometria de hélio (ASTM D 6114).

Tabela 5.1.1 – Ensaio granulométrico do pó de borracha sem tratamento

Material	Pó de Pneu
-	-
Peneiras	Material Passante (%)
1,2 mm : nº16	100.0
0,59 mm : nº30	99.4
0,42 mm : nº40	40.3
0,30 mm : nº50	27.6
0,18 mm : nº80	7.6
0,15 mm : nº100	3.7
0,074 mm : nº200	0.3

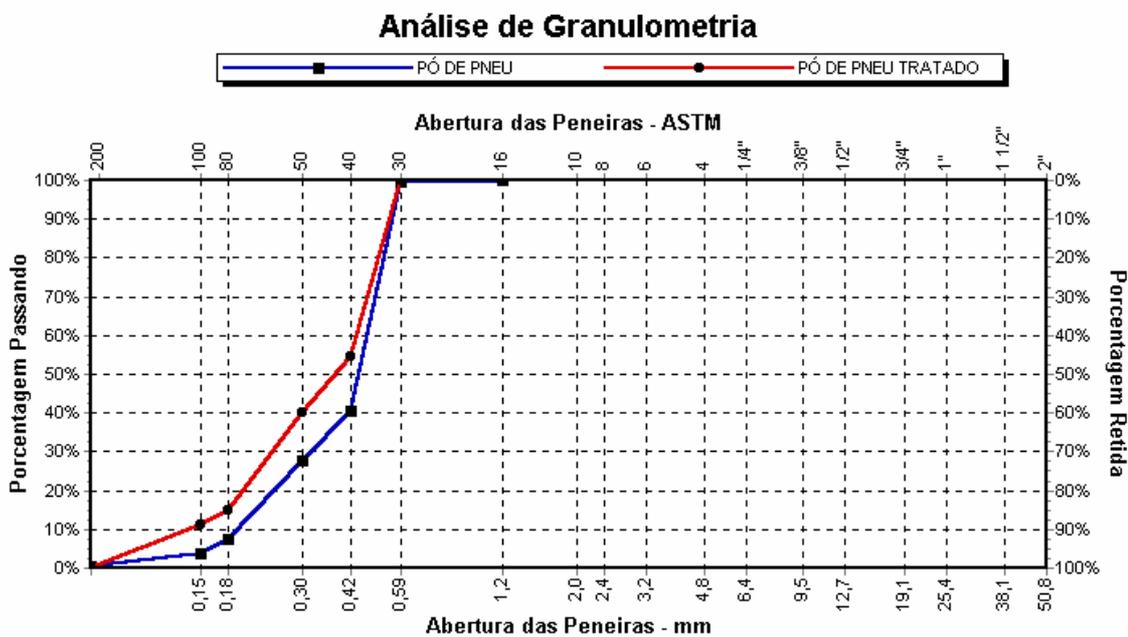


Gráfico 5.1.1 – Curva granulométrica do pó de borracha sem tratamento

Tabela 5.1.2 – Ensaio granulométrico do pó de borracha com tratamento

<i>Material</i>	<i>PÓ DE PNEU</i>	<i>PÓ DE PNEU TRATADO</i>
Peneiras e % de Material		
1,2mm : nº16	100.0	100.0
0,59mm : nº30	99.4	100.0
0,42mm : nº40	40.3	54.6
0,30mm : nº50	27.6	40.1
0,18mm : nº80	7.6	15.0
0,15mm : nº100	3.7	11.0
0,074mm : nº200	0.3	0.1

5.2. Caracterização dos agregados

Para a caracterização dos agregados neste trabalho, foram realizados os ensaios de densidade real e massa específica dos agregados, ensaio de granulometria da pedra e do pó de pedra, ensaio de Abrasão Los Angeles do agregado, ensaio de adesividade a ligante betuminoso-agregado gráudo e ensaio de equivalente de areia. Apresentamos, também, a massa específica da cal.

A tabela 5.2.1 apresenta a procedência e natureza mineralógica dos agregados, a tabela 5.2.2 apresenta os detalhes do ensaio Abrasão Los Angeles e a tabela 5.2.3 apresenta os resultados do ensaio Abrasão Los Angeles.

Tabela 5.2.1 – Procedência e natureza mineralógica

MATERIAL	PROCEDÊNCIA	NATUREZA MINERALÓGICA
BRITA 1	PEDREIRA BARUERI	BASALTO
PEDRISCO	PEDREIR BARUERI	BASALTO
PÓ DE PEDRA	PEDREIRA BARUERI	BASALTO
FILLER (CAL)	MINERCAL	-
LIGANTE ASFÁLTICO B P (TRATADO)	IPIRANGA ASFALTOS S/A	-

Tabela 5.2.2 - Detalhes do ensaio de abrasão Los Angeles

ENSAIO À ABRASÃO LOS ANGELES					
Procedência: Pedreira Barueri			Natureza Mineralógica: Basalto		
ABERTURA DAS PENEIRAS (mm)		1 - PESO DA AMOSTRA (GRAMAS)			
PASSANDO	RETIDO	GRADUAÇÃO A (12)	GRADUAÇÃO B (11)	GRADUAÇÃO C (8)	GRADUAÇÃO D (6)
38	25	-			
25	19	-			
19	12,5	-	2500		
12,5	9,5	-	2500		
9,5	6,3			-	-
6,3	4,8			-	-
4,8	2,4				
2 – Peso Total		-	5000	-	-
Especificação: (5000 +/- 10) g					

Tabela 5.2.3 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles

	3 DIAS APÓS ENSAIO	APÓS LAVADO E SECO A 170 +/- 15 °C
4 Material Retido na Peneira N° 12	4.040	4.040
Material Passando na Peneira N° 12	960	960
% de Desgaste	19,2	19,2
N° de Rotações da Máquina: 500 Ciclos	Duração do Ensaio: +/- 14 minutos	

Os ensaios de equivalente de areia, resultado final do ensaio de Abrasão Los Angeles e o ensaio de adesividade estão sendo apresentados na tabela 4.2.4, resultados dos ensaios agregados graúdos.

Tabela 5.2.4 - Resultados ensaio agregados graúdos

Ensaio	Método com base	Especificação		Resultado
		Mínimo	Máximo	
EQUIVALENTE DE AREIA (%)	DNER 054/97	55	-	78,5
ABRASÃO LOS ANGELES (%)	DNER 035/98	-	50	19,2
ADESIVIDADE	DNER 078/94	SATISF.	-	SATISF.

Os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados e os resultados do ensaio de granulometria são apresentados na tabela 5.2.5

Tabela 5.2.5 - Massa específica dos agregados

MATERIAL	BRITA 1	PEDRISCO	PÓ DE PEDRA	FILLER (CAL)
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	2.685	2.675	2.695	2.514
PENEIRAS E % DE MATERIAL PASSANTE				
3/4"	100	100	100	100
1/2"	31,6	100	100	100
3/8"	7,3	99,8	100	100
4,8 mm : n°4	0,1	27,1	98,5	100
2 mm : n°10	0,1	2,7	71	100
0,42 mm : n°40	0,1	1,8	28,9	100
0,18 mm : n°80	0,1	1,5	18,1	100
0,074 mm : n°200	0,1	1,1	10	94

A seguir apresentamos: na figura 5.2.1, as curvas granulométricas de todos os agregados; na tabela 5.2.6, a composição da mistura, seguindo dosagem usual adotada pela Ipiranga Asfaltos SA para este fornecedor de agregados; na tabela 5.2.7, o ensaio da composição da mistura, e na figura 5.2.2 as faixas de tolerância dos traços DNIT, para a dosagem utilizada neste trabalho.

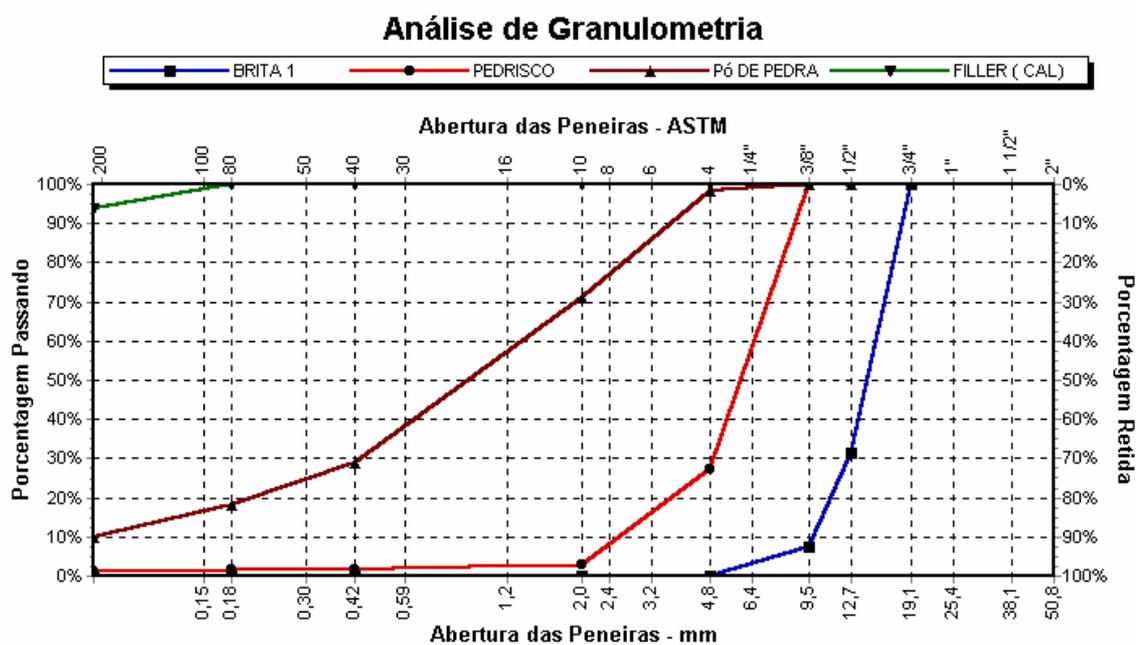


Gráfico 5.2.1 - Análise granulométrica dos agregados

Tabela 5.2.6 - Composição da mistura

MATERIAL	PORCENTAGEM
BRITA 1	19.0
PEDRISCO	30.0
PÓ DE PEDRA	50.0
FILLER (CAL)	1.0

Tabela 5.2.7 - Ensaio da composição da mistura

PENEIRAS	TRAÇO (%)	FAIXA "C" DNIT (%)		TOLERÂNCIA
		Limite Inferior	Limite Superior	
3/4"	100	100.0	100.0	-
1/2"	87.0	80.0	100.0	+/- 7
3/8"	82.3	70.0	90.0	+/- 7
4,8mm : nº4	58.4	44.0	72.0	+/- 5
2,0mm : nº10	37.3	22.0	50.0	+/- 5
0,42mm : nº40	16.0	8.0	26.0	+/- 5
0,18mm : nº80	10.5	4.0	16.0	+/- 3
0,074mm : nº200	6.2	2.0	10.0	+/- 2

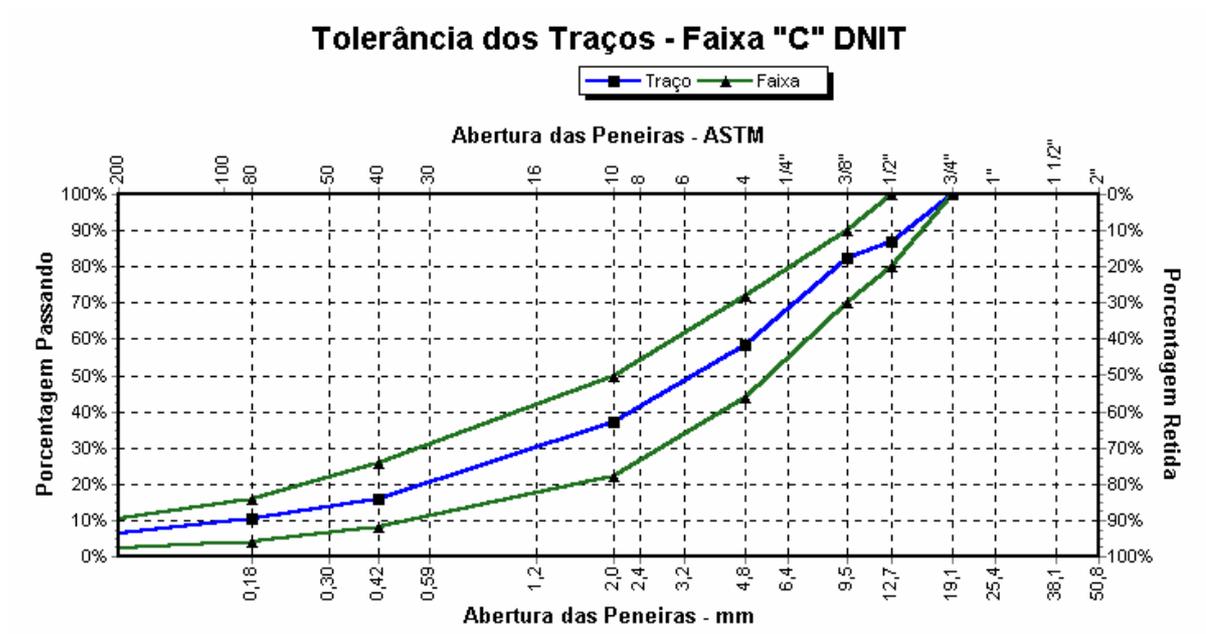


Gráfico 5.2.2 - Faixas de tolerância dos traços DNIT

5.3. Caracterização da mistura asfáltica

Neste trabalho, utilizamos o asfalto-borracha sem tratamento de ligante asfáltico BP, com 18% de pó de borracha e 4% de aditivo óleo extensor; mas, para a utilização do asfalto borracha, com adição de pó de borracha tratado com hidróxido de sódio comercial, aqui chamado de Ligante asfáltico BPT, realizamos várias dosagens, no sentido de adequar este novo asfalto às normas mínimas aceitáveis.

Realizamos três dosagens para a obtenção do asfalto-borracha tratado BPT, pois, com a adição do pó de borracha tratado, ocorreram modificações no comportamento do asfalto-borracha, quando comparado com o asfalto-borracha sem tratamento.

Podemos notar que utilizamos o ensaio Spindle 21, para definir as primeiras dosagens, pois o ensaio Spindle 21 é mais rápido, porém é empírico. Não existe especificação para o asfalto-borracha, utilizando o Spindle 21. Somente existe especificação utilizando o Spindle 3. Esta forma de tratamento é usual, para caracterização de asfaltos para dosagens.

A tabela 5.3.1. apresenta a primeira dosagem com Ligante asfáltico BPT, utilizando 18% de pó de borracha tratado e 4%, de óleo extensor:

Tabela 5.3.1 - Ligante asfáltico BPT, utilizando 18% de pó de borracha tratado e 4%, de Óleo extensor

ENSAIO (1ª Dosagem)	MÉTODO (C/ BASE EM)	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/00	°C	Mín. 55	54,5
Penetração (100g, 5s, 25°C)	DNER - ME 003/94	Dmm	30 - 70	63
Viscosidade brookfield (175°C, 20 rpm, spindle 3), Cp	ASTM D 2196	Cp	800 - 2000	
Recuperação Elástica ductilometro (25°C, 10cm) mín	NBR 15086	%	Mín. 50	63
Recuperação Elástica (Torção)		%		50,5
Viscosidade Spindle 21				
135°C a 20 rpm				1587
145°C a 50 rpm				983
175°C a 60 rpm				329,5

Nota-se, na tabela 5.3.1, que o ponto de amolecimento está abaixo das especificações e o ponto de penetração está dentro da norma padrão específica, pelos padrões das empresas que atuam com asfaltos, apesar de estar, ainda, na faixa aceitável pelas normas. Não realizamos o ensaio Spindle 3, em função dos resultados ruins do ponto de amolecimento e ponto de penetração.

Realizamos, então, a segunda dosagem, diminuindo a quantidade de óleo extensor, mas mantendo o teor de 18% de pó de borracha tratado com hidróxido de sódio comercial. Apresentamos os resultados na tabela 5.3.2:

Tabela 5.3.2 - Ligante asfáltico BPT, utilizando 18% de pó de borracha tratado e 2%, de Óleo extensor

ENSAIO (2ª Dosagem)	MÉTODO (C/ BASE EM)	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/00	°C	Mín. 55	60
Penetração (100g, 5s, 25°C)	DNER - ME 003/94	Dmm	30 - 70	53,2
Viscosidade brookfield (175°C, 20 rpm, spindle 3), Cp	ASTM D 2196	Cp	800 - 2000	1377
Recuperação Elástica ductilometro (25°C, 10cm) mín	NBR 15086	%	Mín. 50	80
Recuperação Elástica (Torção)		%		68
Viscosidade Spindle 21				
135°C a 20 rpm				3880
145°C a 50 rpm				2262
175°C a 60 rpm				704

Podemos constatar que, pela tabela 5.3.2, que o ponto de amolecimento e o ponto de penetração melhoraram bastante, em relação à primeira dosagem, assim como os resultados dos

ensaios de recuperação elástica, no ductilômetro e na torção. Apesar dos bons resultados, constatamos que a viscosidade estava de acordo com os padrões específicos, porém, apresentou-se alta para os padrões da empresa de asfalto.

Partimos, então, para a terceira dosagem, diminuindo a quantidade de pó de borracha tratado e a quantidade de óleo extensor, obtendo-se os resultados que consideramos como satisfatórios. A tabela 4.3.3 apresenta os resultados:

Tabela 5.3.3 – Ligante Asfalto-borracha Ligante asfáltico BPT utilizando 16% de pó de borracha tratado e 1,78%, de Óleo extensor

ENSAIO (3ª Dosagem)	MÉTODO (C/ BASE EM)	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/00	°C	Mín. 55	60,3
Penetração (100g, 5s, 25°C)	DNER - ME 003/94	Dmm	30 - 70	51
Viscosidade brookfield (175°C, 20 rpm, spindle 3), Cp	ASTM D 2196	cP	800 - 2000	850
Recuperação Elástica ductilometro (25°C, 10cm) mín	NBR 15086	%	Mín. 50	66,5
Recuperação Elástica (Torção)		%		65
Viscosidade Spindle 21				
135°C a 20 rpm				3245
145°C a 50 rpm				1357
175°C a 60 rpm				445

A Tabela 5.3.4 apresenta os resultados dos ensaios das misturas asfálticas, ou seja, os resultados do produto Ligante asfáltico BP, tanto com o asfalto modificado com pó de pneu moído, sem tratamento superficial, como com o Ligante asfáltico BPT tratado com hidróxido de sódio comercial, utilizando a terceira dosagem (amostra B):

Tabela 5.3.4 - Ensaio das misturas asfálticas

ENSAIO	MÉTODO (C/ BASE EM)	UNID.	ESPECIF.	RESULTADO	
				A	B
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/00	°C	Mín. 55	59	60,3
Penetração (100g, 5s, 25°C)	DNER - ME 003/94	Dmm	30 - 70	50	51
Viscosidade brookfield (175°C, 20 rpm, spindle 3), Cp	ASTM D 2196	Cp	800 - 2000	870	850
Recuperação Elástica ductilometro (25°C, 10cm) mín	NBR 15086	%	Mín. 50	60	66,5
Estabilidade à Estocagem	NBR 15166	°C	máx. 9	2	1,4
Ponto de Fulgor	DNER-ME 148/94	°C	mín. 235	290	298
ENSAIO DE RTFOT					
Varição em massa	NBR 15235	%	Máx. 1,0	0,19	0,09
ECA, % penetração original	NBR 14736	%	Mín. 50	68	78
% Recuperação elástica Original	ASTM D 6084	%	Mín. 110%	105	115

5.4. Resultados do ensaio MARSHALL

Definimos quatro dosagens para este estudo, utilizando o Método Marshall, para os ensaios. A tabela 4.4 apresenta os traços estudados, utilizando os asfaltos Ligante asfáltico BP e Ligante asfáltico BPT, na mistura, com as porcentagens de 5; 5.5;6 e 6.5, adequando-se a quantidade dos agregados, em função da quantidade de asfalto.

Tabela 5.4 - Estudo Marshall

COMPOSIÇÃO DA MISTURA	TRAÇOS ESTUDADOS			
	I	II	III	IV
BRITA 1	18.050	17.955	17.860	17.765
PEDRISCO	28.500	28.350	28.200	28.050
PÓ DE PEDRA	47.500	47.250	47.000	46.750
FILLER (CAL)	0.950	0.945	0.940	0.935
LIGANTE ASFÁLTICO B P	5.000	5.500	6.000	6.500
TOTAL	100.000	100.000	100.000	100.000

5.4.1. Resultados dos ensaios Marshall, utilizando pó de borracha sem tratamento:

5.4.1.1. Densidade aparente

A tabela 5.4.1.1 apresenta os resultados dos ensaios de densidade aparente das misturas, em função dos vários teores de asfalto, e o gráfico 4.4.1.1 apresenta a curva, em função da densidade aparente e o teor de ligante, na mistura:

Tabela 5.4.1.1 - Densidade Aparente (g/cm³)

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
2.294	2.329	2.359	2.357

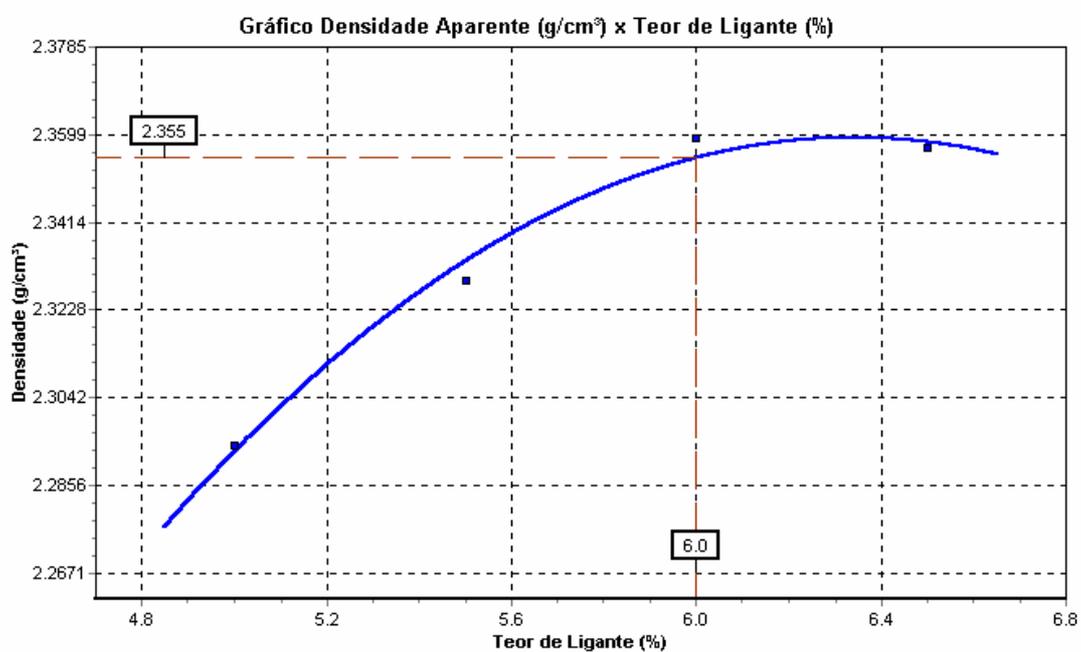


Gráfico 5.4.1.1 - Densidade aparente x Teor de ligante

5.4.1.2. Estabilidade Marshall (kgf)

A tabela 5.4.1.2 apresenta os resultados dos ensaios de estabilidade Marshall das misturas, em função dos vários teores de asfalto, e o gráfico 5.4.1.2 apresenta a curva, em função da estabilidade Marshall e o teor de ligantes na mistura:

Tabela 5.4.1.2 - Estabilidade Marshall (Kgf)

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
659	775	825	812

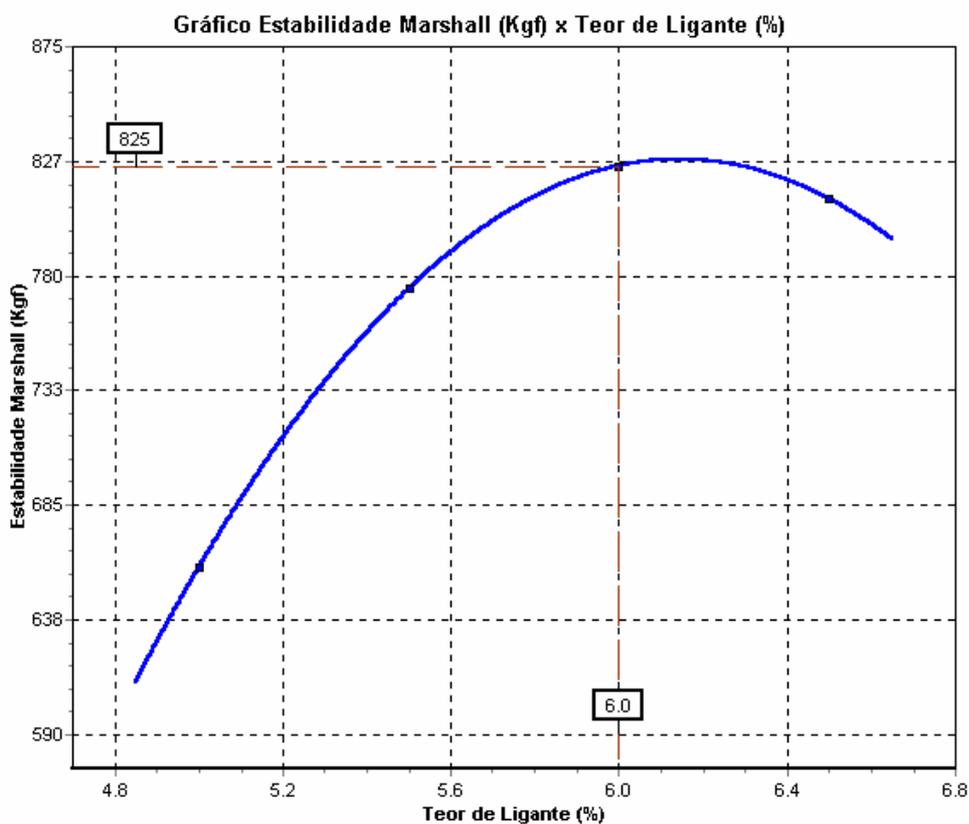


Gráfico 5.4.1.2 - Estabilidade Marshall x Teor de ligante

5.4.1.3. Índice de vazios (%)

A tabela 5.4.1.3.apresenta os resultados dos ensaios de índice de vazios das misturas, em função dos vários teores de asfalto, e o gráfico 5.4.1.3 apresenta a curva em função do índice de vazios e o teor de ligantes na mistura, obtendo-se teor de ligante para 4% de vazios:

Tabela 5.4.1.3 - Índice de vazios

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
8.8	5.6	3.7	3.1

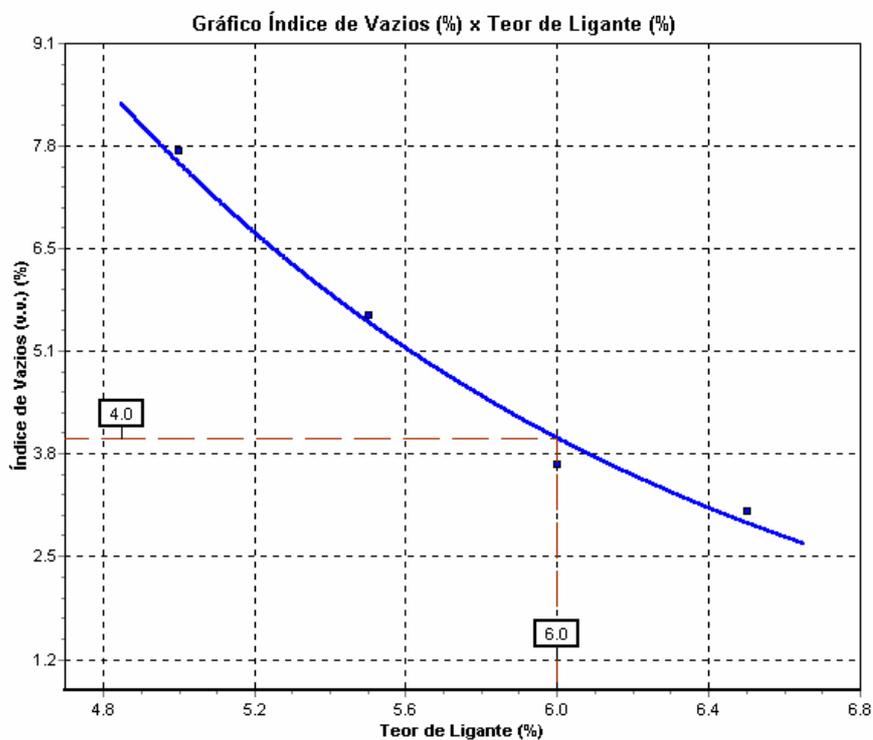


Gráfico 5.4.1.3 - Índice de vazios x Teor de ligante

5.4.1.4. Relação Betume-Vazios - R.B.V. (%)

A tabela 5.4.1.4 apresenta os resultados dos ensaios de relação betume-vazios das misturas, em função dos vários teores de asfalto e o gráfico 5.4.1.4 apresenta a curva em função da relação betume-vazios e o teor de ligantes na mistura, onde obteremos o teor de ligante em função de RBV de 80%, de acordo com a metodologia Marshall:

Tabela 5.4.1.4 - Relação betume-vazios

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
58.9	68.7	78.7	82.7

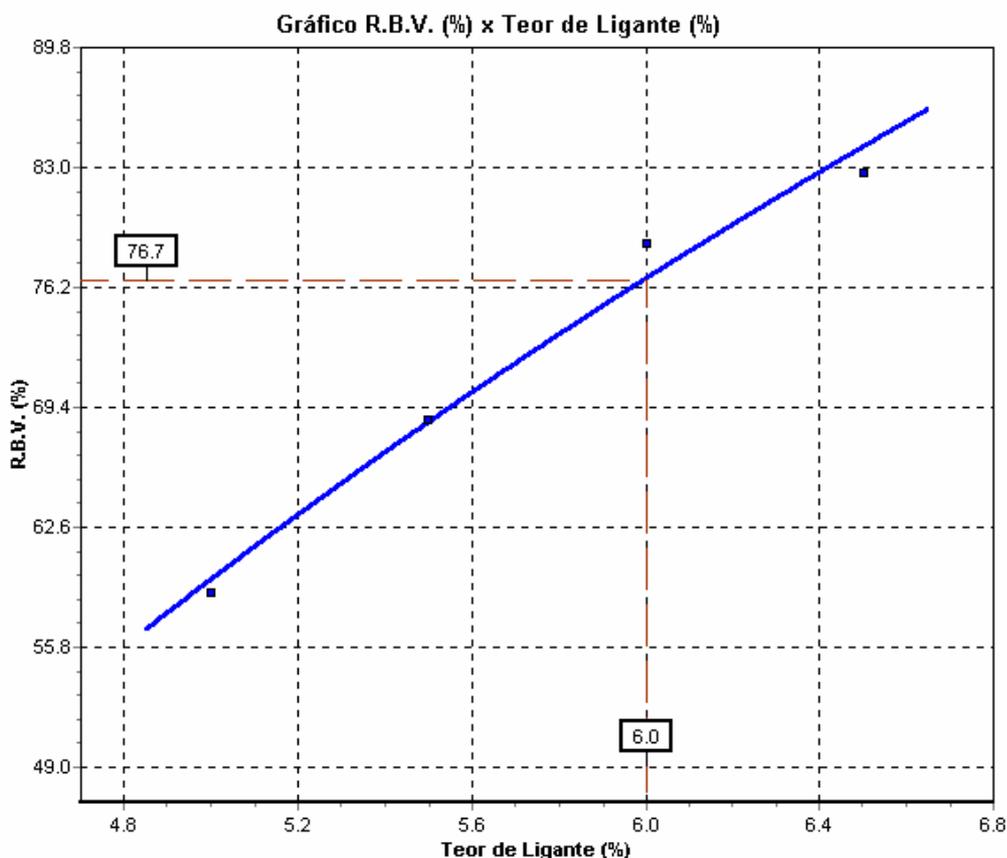


Gráfico 5.4.1.4 - Relação betume-vazios x Teor de ligante

5.4.1.5. Fluência (1/100")

A tabela 5.4.1.5 apresenta os resultados dos ensaios de fluência das misturas, em função dos vários teores de asfalto e o gráfico 5.4.1.5 apresenta a curva em função da fluência e o teor de ligantes na mistura, onde a fluência é medida em centésimos de polegada:

Tabela 5.4.1.5 - Fluência

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
12.2	13.5	14.5	15.9

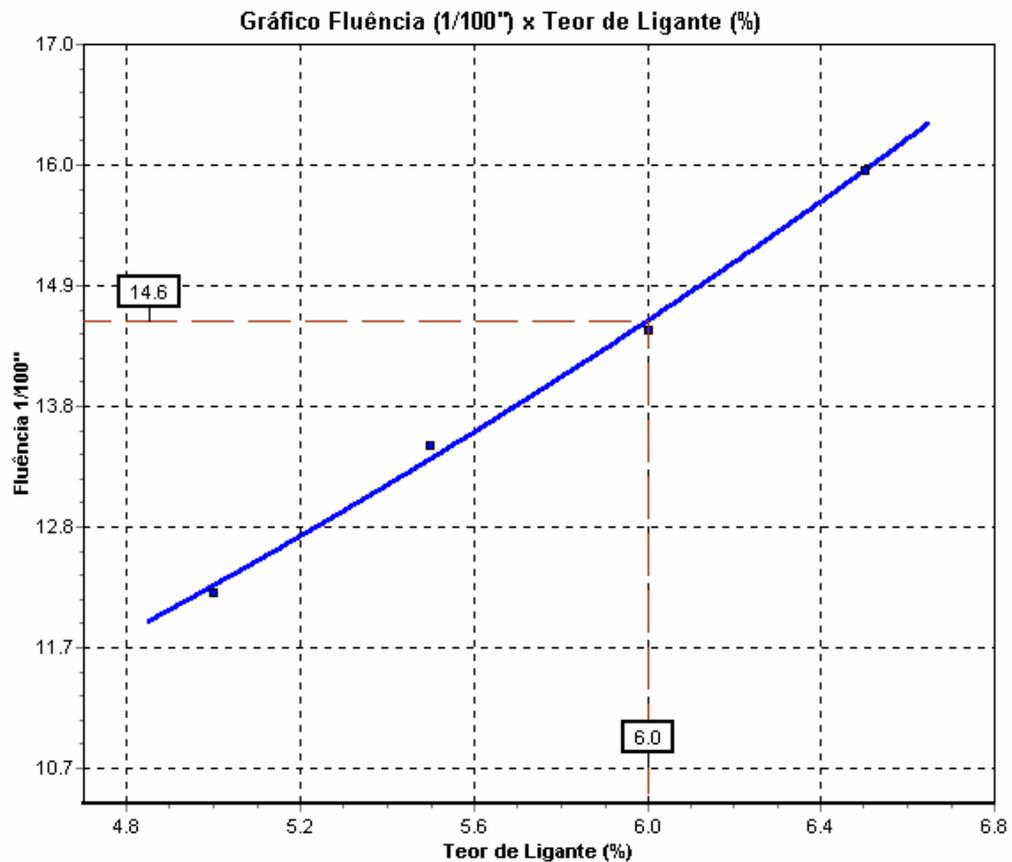


Gráfico 5.4.1.5 - Fluência x Teor de ligante

5.4.1.6. Vazios de agregado mineral - V.A.M. (%)

A tabela 5.4.1.6 apresenta os resultados dos ensaios de vazios de agregado mineral das misturas, em função dos vários teores de asfalto e o gráfico 5.4.1.6 apresenta a curva em função dos vazios de agregado mineral e o teor de ligantes na mistura:

Tabela 5.4.1.6 - Vazios de agregado mineral

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
18.9	18.1	17.5	18

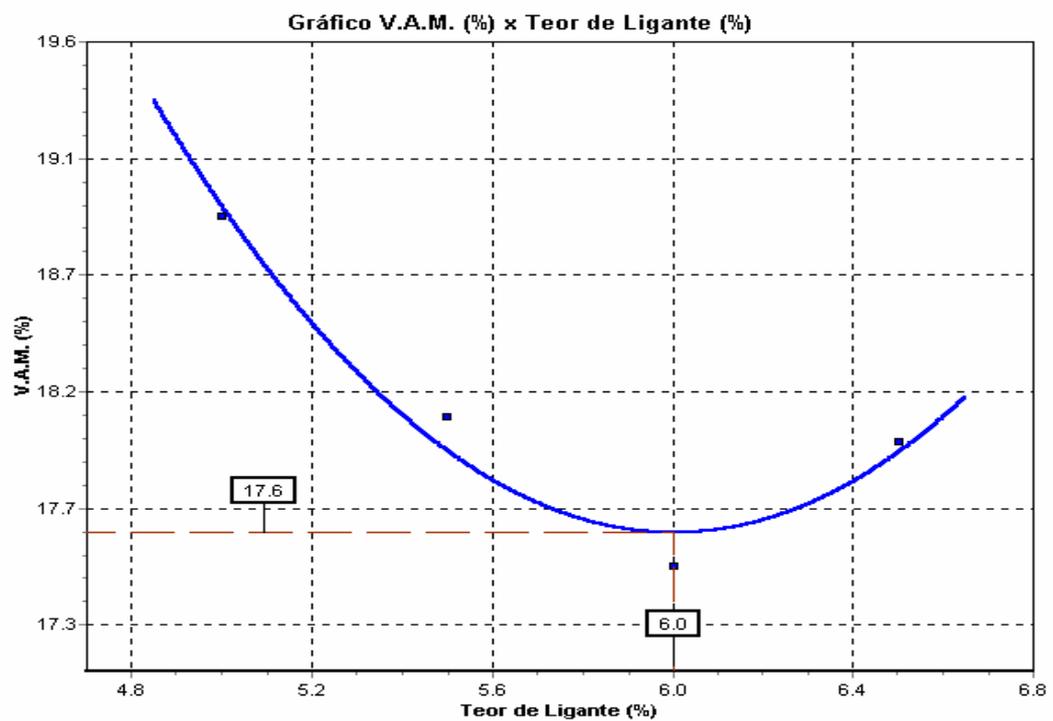


Gráfico 5.4.1.6 - Vazios de agregado mineral x Teor de ligante

5.4.1.7. Resultado Dosagem Marshall

A tabela 5.4.1.7.1, apresenta o resultado da dosagem dos ensaios Marshall, para o asfalto utilizando pó de borracha (conforme item 4.7, especificado no capítulo anterior) sem tratamento superficial com hidróxido de sódio comercial e a tabela 5.4.1.7.2.apresenta o resultado final dos ensaios Marshall, com seus respectivos limites de norma:

Tabela 5.4.1.7.1 - Resultado da dosagem dos ensaios Marshall

TRAÇO (%)	
BRITA 1	17.9
PEDRISCO	28.2
PÓ DE PEDRA	47.0
FILLER (CAL)	0.9
LIGANTE ASFÁLTICO BPT	6.0

Tabela 5.4.1.7.2 - Resultado final dos ensaios Marshall sem o tratamento da borracha

	Resultados Obtidos	Especificação	
		Mínimo	Máximo
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2.355	-	-
Estabilidade Marshall (kgf)	825	500	-
Resistência a Tração (MPa)	0,85	0,65	-
Fluência (1/100")	14,6	-	-
Vazios (%)	4,0	3	5
R.B.V. (%)	76,7	75	82
V.A.M. (%)	17,6	15	-

5.4.2. Resultados dos ensaios Marshall utilizando pó de borracha com tratamento

5.4.2.1. Densidade aparente

A tabela 5.4.2.1 apresenta os resultados dos ensaios da densidade aparente das misturas, em função dos vários teores de asfalto, utilizando borracha tratada. O gráfico 5.4.2.1 apresenta a curva em função da densidade aparente e o teor de ligante com borracha tratada na mistura.

Tabela 5.4.2.1 - Densidade Aparente com borracha tratada (g/cm³)

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
2.309	2.330	2.364	2.363

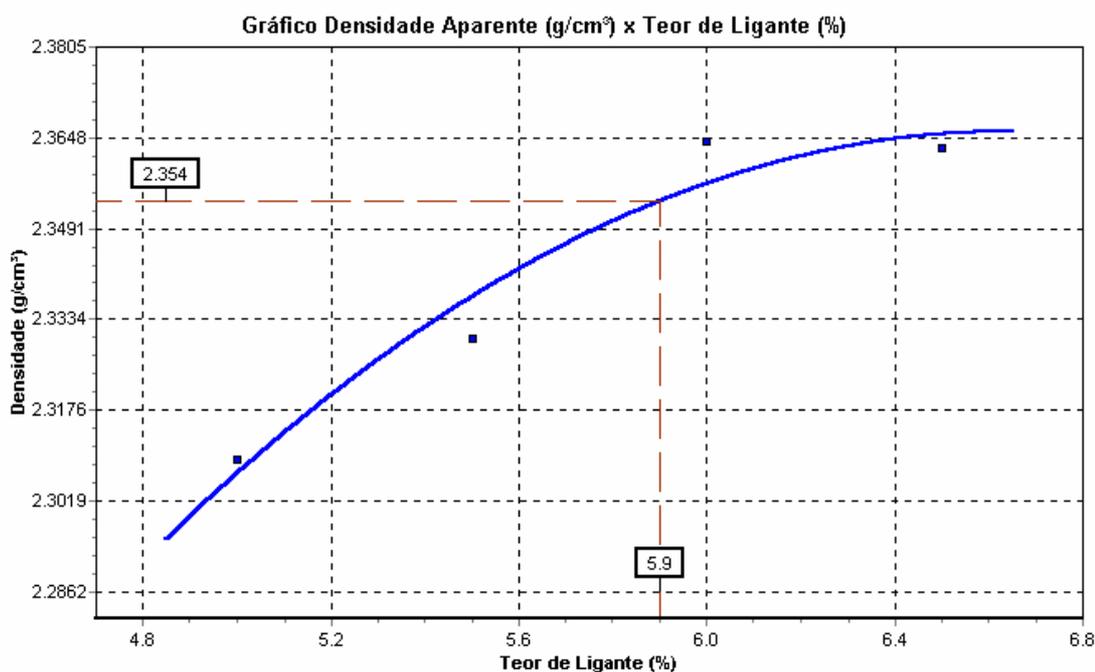


Gráfico 5.4.2.1 - Densidade aparente x Teor de ligante com borracha tratada

5.4.2.2. Estabilidade Marshall (kgf)

A tabela 5.4.2.2.apresenta os resultados dos ensaios de estabilidade Marshall das misturas, em função dos vários teores de asfalto com borracha tratada e o gráfico 5.4.2.2 apresenta a curva em função da estabilidade Marshall e o teor de ligante com borracha tratada na mistura:

Tabela 5.4.2.2 - Estabilidade Marshall com borracha tratada (Kgf)

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
729	859	949	819

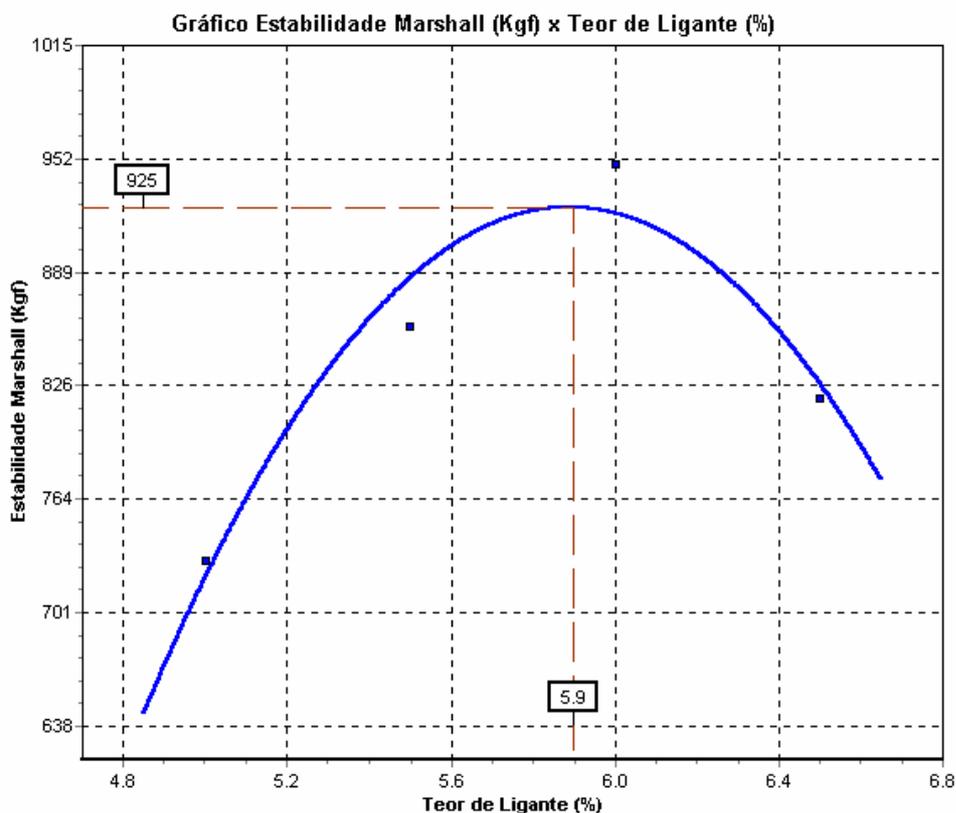


Gráfico 5.4.2.2 - Estabilidade Marshall x Teor de ligante com borracha tratada

5.4.2.3. Índice de vazios (%)

A tabela 5.4.2.3.apresenta os resultados dos ensaios de índice de vazios das misturas, em função dos vários teores de asfalto, com borracha tratada, e o gráfico 5.4.2.3 apresenta a curva em função do índice de vazios e o teor de ligante, com borracha tratada na mistura, obtendo-se teor de ligante para 4% de vazios:

Tabela 5.4.2.3 - Índice de vazios com borracha tratada

1.1.1 TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
7,2	5,6	3,5	2,8

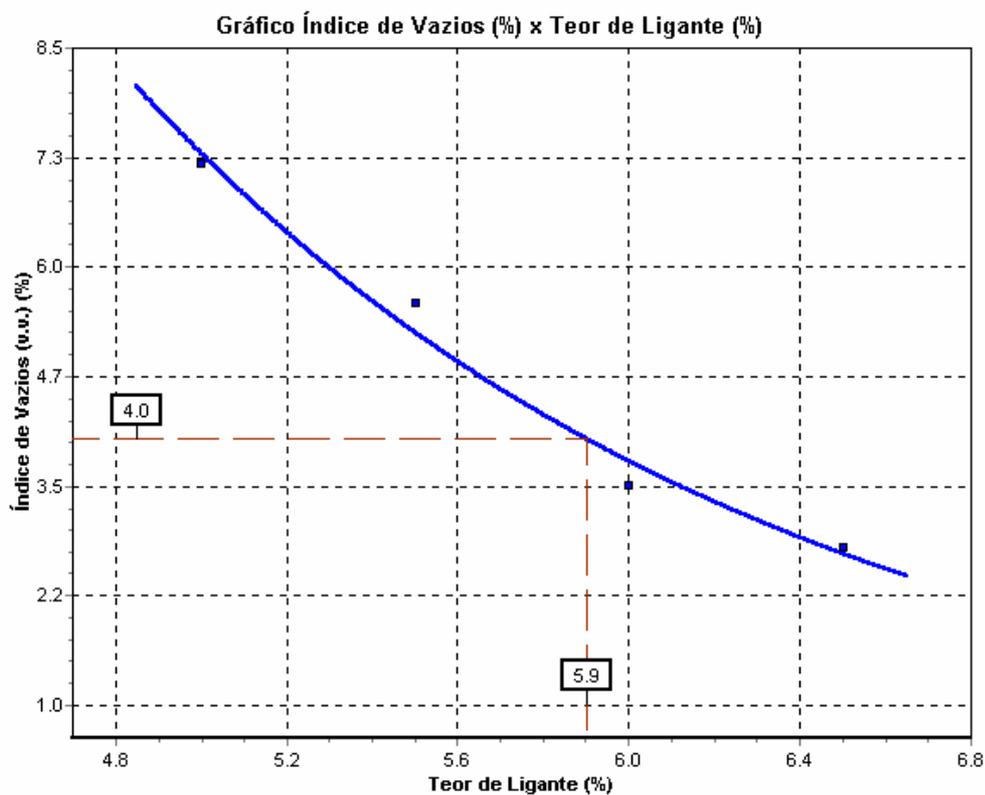


Gráfico 5.4.2.3 - Índice de vazios x Teor de ligante com borracha tratada

5.4.2.4. Relação Betume vazios - R.B.V. (%)

A tabela 5.4.2.4 apresenta os resultados dos ensaios de relação betume-vazios das misturas, em função dos vários teores de asfalto com borracha tratada, e o gráfico 5.4.2.4 apresenta a curva em função da relação betume-vazios e o teor de ligantes com borracha tratada, na mistura, onde obteremos o teor de ligante em função de RBV de 80%, de acordo com a metodologia Marshall.

Tabela 5.4.2.4 - Relação betume-vazios com borracha tratada

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
61	69	79,6	83,9

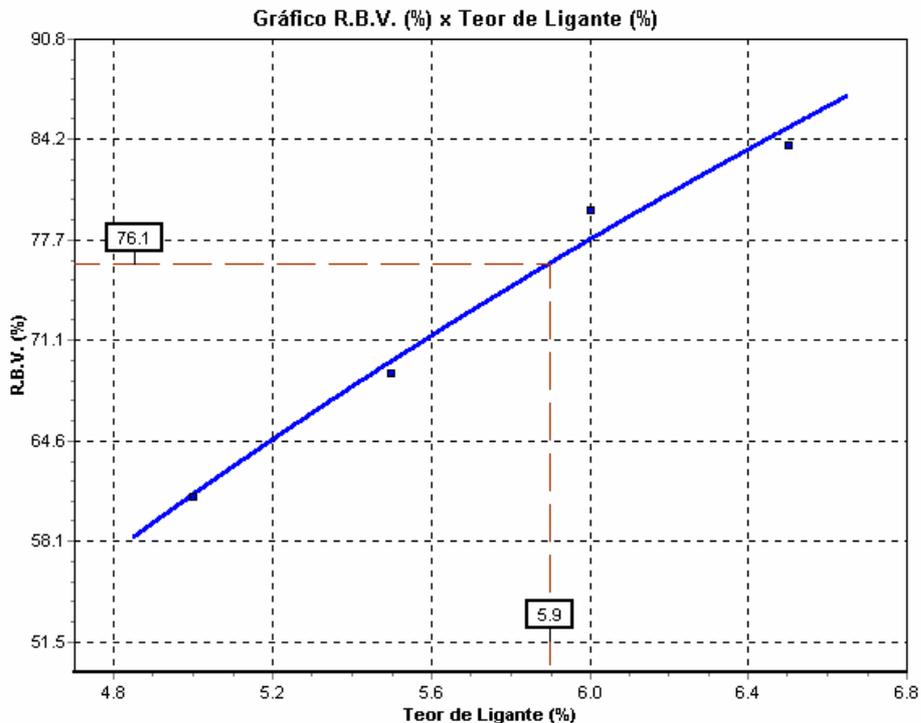


Gráfico 5.4.2.4 - Relação betume-vazios x Teor de ligante com borracha tratada

5.4.2.5. Fluência (1/100")

A tabela 5.4.2.5 apresenta os resultados dos ensaios de fluência das misturas, em função dos vários teores de asfalto, tratados com hidróxido de sódio e o gráfico 5.4.25 apresenta a curva em função da fluência e o teor de ligantes na mistura, também tratados com hidróxido de sódio. A fluência é medida em centésimos de polegada:

Tabela 5.4.2.5 - Fluência com borracha tratada

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
12,5	13,4	15	15,9

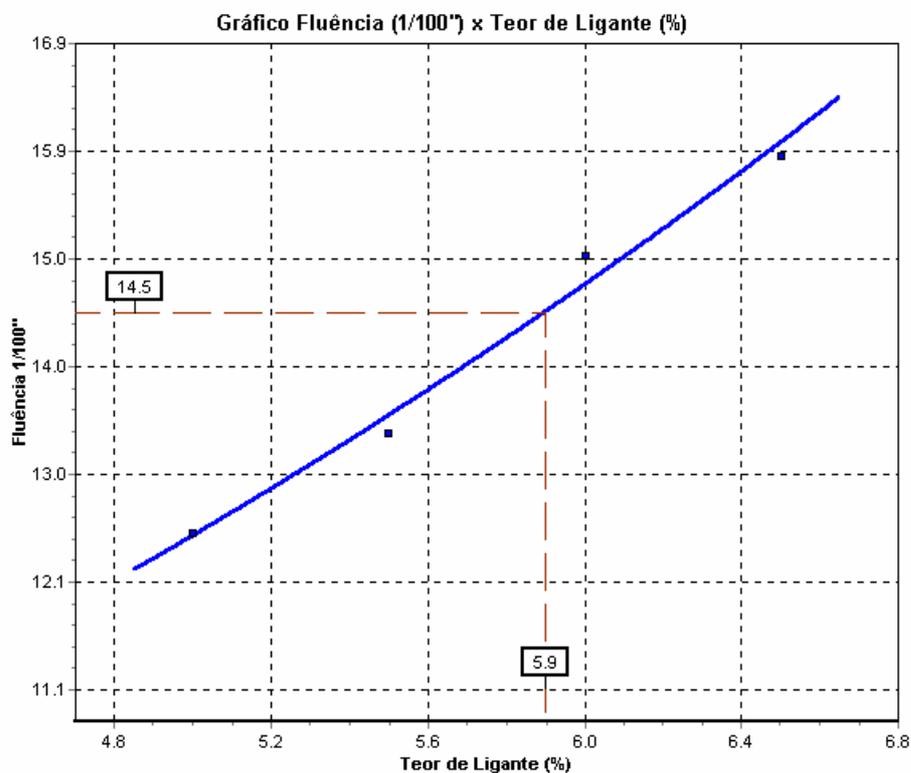


Gráfico 5.4.2.5 - Fluência x Teor de ligante, com borracha tratada

5.4.2.6. Vazios de agregado mineral - V.A.M. (%)

A tabela 5.4.2.6 apresenta os resultados dos ensaios de vazios de agregado mineral das misturas, em função dos vários teores de asfalto, e o gráfico 5.4.2.6 apresenta a curva, em função dos vazios de agregado mineral, e o teor de ligantes na mistura, ambos com borracha tratada, superficialmente, com hidróxido de sódio:

Tabela 5.4.2.6 - Vazios de agregado mineral com borracha tratada

TEORES (%)			
5.0	5.5	6.0	6.5
18.4	18.0	17.3	17.8

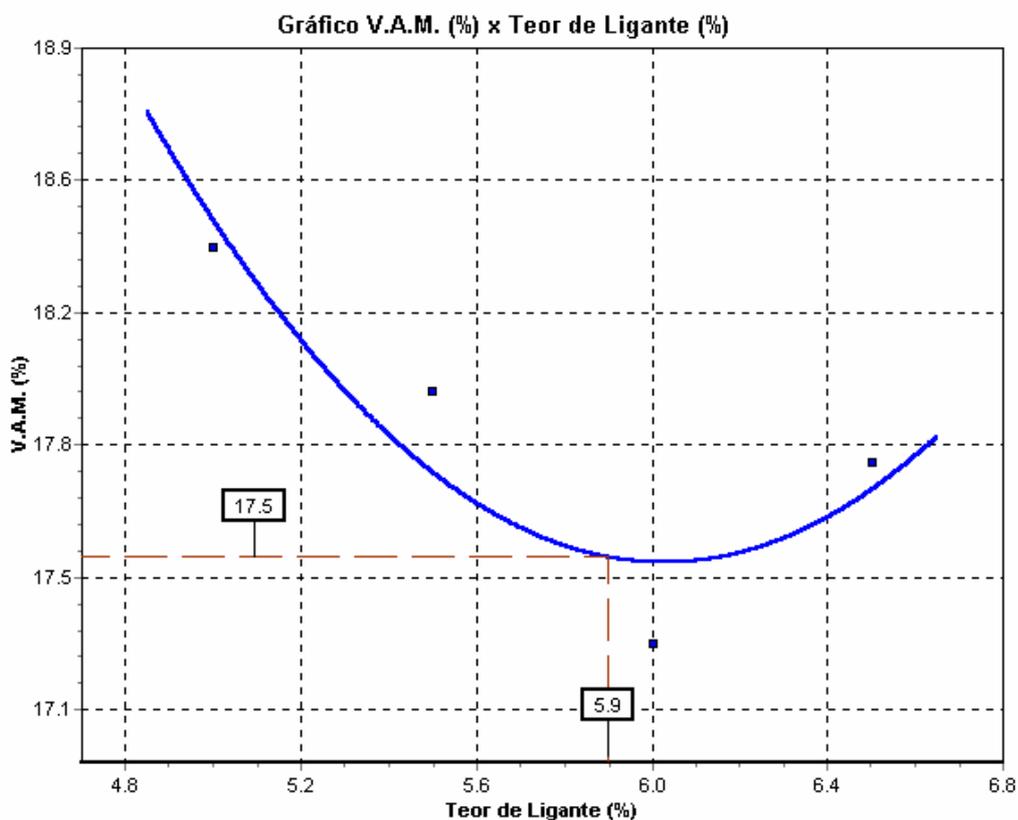


Gráfico 5.4.2.6 - Vazios de agregado mineral x Teor de ligante com borracha tratada

5.4.2.7. Resultado Dosagem Marshall, com Borracha Tratada

A tabela 5.4.2.7.1, apresenta o resultado da dosagem dos ensaios Marshall, para o asfalto utilizando pó de borracha tratado - BPT, (conforme o já descrito no item 4.1 da página 58 e nos resultados da tabela 5.3.3 da página 81) superficialmente, com hidróxido de sódio comercial, e a tabela 5.4.2.7.2. apresenta o resultado final dos ensaios Marshall, com seus respectivos limites de norma:

Tabela 5.4.2.7.1 - Resultado da dosagem dos ensaios Marshall com borracha tratada

TRAÇO (%)	
BRITA 1	17.9
PEDRISCO	28.2
PÓ DE PEDRA	47.0
FILLER (CAL)	0.9
LIGANTE ASFÁLTICO BPT	5.9

Tabela 5.4.2.7.2 - Resultado final dos ensaios Marshall com tratamento da borracha

	Resultados <i>Obtidos</i>	Especificação	
		Mínimo	Máximo
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2.354	-	-
Estabilidade Marshall (kgf)	780	500	-
Resistência à Tração (Mpa)	0,89	0,65	-
Fluência (1/100")	14,5	-	-
Vazios (%)	4,0	3,0	5,0
R.B.V. (%)	76,1	75	82
V.A.M. (%)	17,5	15	-

5.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS A TRAÇÃO

Apresentamos a seguir, na tabela 5.5.1, os resultados obtidos nos ensaios de tração do concreto asfáltico, utilizando o Ligante asfáltico BP e Ligante asfáltico BPT (tratado com hidróxido de sódio comercial). Este ensaio foi realizado com os equipamentos utilizados nos ensaios Marshall: Todos esses ensaios foram realizados seguindo as normas técnicas vigente.

Tabela 5.5.1 - Ensaio de tração dos concretos asfálticos

Teores (%)	Ensaio de Tração			
	5	5,5	6	6,5
Ligante asfáltico BP (MPa)	0,74	0,78	0,85	0,82
Ligante asfáltico BPT (MPa)	0,78	0,84	0,89	0,88

5.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

As tabelas 5.5.2; 5.5.3; 5.5.4; 5.5.5 e 5.5.6 apresentam as análises estatísticas dos ensaios
Tabela 5.5.2 - Controle Estatístico dos Ensaio Marshall (concreto asfáltico com pó de borracha sem tratamento)

Borracha de pneu sem tratamento	<i>Resultados</i>	<i>Desvio Padrão</i>
	<i>Obtidos</i>	
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2.355	5,77
Estabilidade Marshall (kgf)	825	1,53
Resistência a Tração (MPa)	0,85	1
Fluência (1/100")	14,6	4,04
Vazios (%)	4,0	0
R.B.V. (%)	76,7	0,20
V.A.M. (%)	17,6	0,25

Tabela 5.5.3 - Controle Estatístico dos Ensaio Marshall (concreto asfáltico com pó de borracha com tratamento)

Borracha de pneu tratada	Resultados	Desvio Padrão
	Obtidos	
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2.354	5,77
Estabilidade Marshall (kgf)	780	1,57
Resistência a Tração (MPa)	0,89	0
Fluência (1/100")	14,5	2,65
Vazios (%)	4,0	0
R.B.V. (%)	76,1	0,15
V.A.M. (%)	17,5	0,15

Tabela 5.5.4 - Controle Estatístico dos Ensaio de Tração (concreto asfáltico com pó de borracha sem tratamento)

	Ensaio de Tração			
	5	5,5	6	6,5
Teores (%)	5	5,5	6	6,5
Ligante asfáltico BP (Mpa)	0,74	0,78	0,85	0.82
Desvio Padrão	1,73	5,77	3,60	1,73

Tabela 5.5.5 - Controle Estatístico dos Ensaio de Tração (concreto asfáltico com pó de borracha com tratamento)

	Ensaio de Tração			
	5	5,5	6	6,5
Teores (%)	5	5,5	6	6,5
Ligante asfáltico BPT (Mpa)	0,78	0,84	0,89	0,88
Desvio Padrão	0,03	0	2,08	3,46

Tabela 5.5.6 - Controle Estatístico dos Ensaio do Asfalto (asfalto com pó de borracha sem e com tratamento)

ENSAIO	Resultado asfalto sem tratamento	Desvio Padrão	Resultado asfalto tratado	Desvio Padrão
Ponto de Amolecimento	59	0	60,3	0
Penetração (100g, 5s, 25°C)	50	0	51	0
Viscosidade brookfield (175°C, 20 rpm, spindle 3), Cp	870	0	850	0
Recuperação Elástica ductilometro (25°C, 10cm) mín	60	0	66,5	0
Estabilidade à Estocagem	2	0	1,4	0
Ponto de Fulgor	290	0	298	0
ENSAIO DE RTFOT				
Varição em massa	0,19	1,73	0,09	0
ECA, % penetração original	68	1,15	78	1,28
% Recuperação elástica Original	105	1	115	0

Em função da obtenção de dois resultados idênticos, obtivemos um desvio zero como resultado, e somente então partimos para os ensaios Marshall.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Análise dos resultados do ensaio de caracterização do pó de borracha

Podemos notar, através do ensaio de caracterização do pó de borracha, que, com o tratamento do pó de borracha com hidróxido de sódio, a granulometria diminuiu consideravelmente, devido à remoção de impurezas. O módulo de finura para o pó de borracha, sem tratamento, foi de 1,43, enquanto que o módulo de finura para o pó de borracha, com tratamento, foi de 0,47. (SEGRE,1999) constatou modificação na estrutura do pó de borracha, tratada com hidróxido de sódio, através de micrografia de varredura eletrônica. As fotos macro 6.1 e 6.2 demonstram, respectivamente, a desaglomeração com a borracha tratada (BT) quando comparadas com a borracha não tratada (B).



Figura 6.1 - Desaglomeração do pó de borracha tratado com hidróxido de sódio



Figura 6.2 - Aglomeração do pó de borracha sem tratamento

Quando aumentamos a granulometria, conseqüentemente o módulo de finura irá também ter um aumento proporcional do material aqui usado.

NAVARRO et al (2004), estudando o comportamento do asfalto modificado com borracha, concluiu que devemos limitar o tamanho das partículas do pó de borracha quanto à estabilidade a estocagem. Nesse trabalho, NAVARRO et al (2004), concluíram que devemos utilizar tamanhos de partículas menores que 0,35mm e, ainda, a estabilidade a estocagem diminui com o aumento das partículas.

Nosso trabalho utilizando pó de borracha tratada, tende à diminuição da granulometria devido ao tratamento com hidróxido de sódio e a sua desaglomeração, melhorando a dispersão da borracha no asfalto.

CHUI-TE e LI-CHENG LU (2007) realizaram estudos laboratoriais de asfalto com borracha de pneus, concluindo também que a diminuição da granulometria do pó de borracha melhora

consideravelmente o desempenho em relação ao asfalto-borracha com maior granulometria do asfalto, ratificando nossos resultados.

Estes trabalhos supra citados, quando analisados a granulometria, forma do agregado, e o asfalto-borracha provenientes de uma usina recicladora, concluíram que os agregados reciclados possuem percentual de contaminantes, demonstrando que alguns agregados não atendem às especificações, quanto à utilização em pavimentação ou construção civil. Este trabalho visa à eliminação das impurezas do pó de borracha, tratando superficialmente este pó com hidróxido de sódio. O gráfico a seguir apresenta os módulos de finura para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

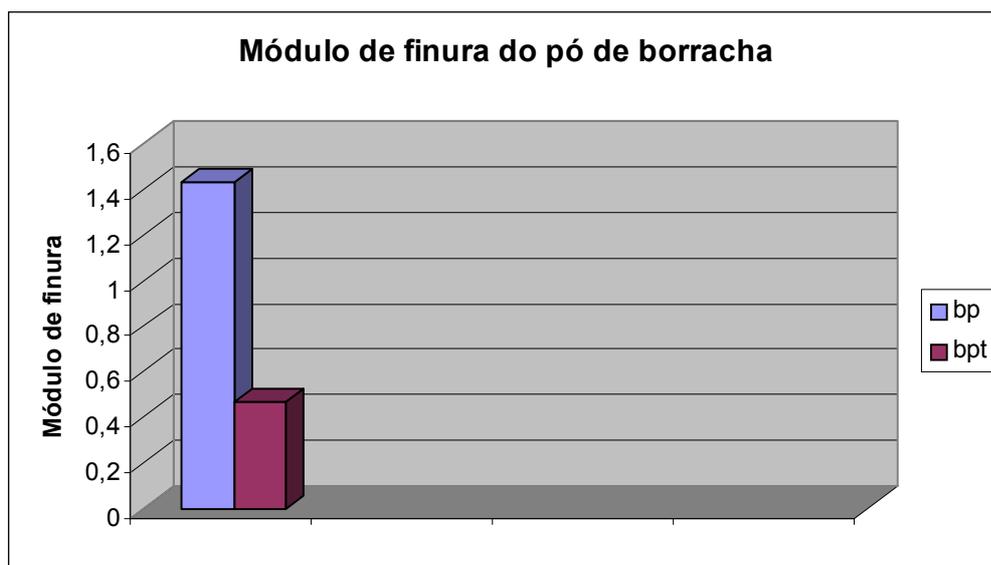


Gráfico 6.1 - Do módulo de finura para pó de borracha tratada e não tratada

ODA et al (2005), avaliando a modificação do asfalto produzido no Nordeste por borracha de diversas fontes, realizando ensaios de desempenho, conclui que asfalto-borracha utilizando menor granulometria apresentarão melhores resultados, ou seja, quanto menor o módulo de finura, melhor será seu desempenho

BALBO (2007), considera que a forma mais elaborada de incorporação de borracha e tritura-la finamente com diâmetro inferior a 2 mm e incorporá-la ao CAP, auxiliando assim, a digestão da borracha, ou seja, sua incorporação no CAP.

Podemos concluir que, com a desaglomeração do pó de borracha, ocorre também melhor dispersão no asfalto.

6.2. ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

O ensaio de equivalente de areia, segundo o método (DNER 054/97), apresentou resultado de 78,50%, onde, o mínimo resultado especificado é de 55%. Este ensaio é utilizado para identificar as partículas de argila em porcentagem na areia, pois a argila fica em suspensão. Diante disso, podemos concluir que a porcentagem de argila, na areia utilizada nos ensaios, atende às normas especificadas.

O ensaio Abrasão Los Angeles identifica agregados graúdos que devido à sua pouca resistência mecânica, não atendem às especificações quanto ao seu uso em concretos asfálticos. A norma (DNER 035/98) determina como limite máximo no ensaio, a abrasão em 50%. O resultado de nosso ensaio foi de 19,2% de abrasão, portanto o agregado pode ser considerado apropriado para a realização dos ensaios.

O ensaio de adesividade foi satisfatório, de acordo com a norma DNER 078/94, onde se estuda a adesividade entre o agregado graúdo e o asfalto. Tanto o basalto, como a areia, utilizados neste trabalho, foram aprovados pelos ensaios supra mencionados.

GAWEL et al (2006), estudaram a interação molecular entre a borracha e o asfalto. Constataram, através de ensaio, com espectrometria, que os componentes constituintes do asfalto migram para o interior da borracha aumentando a interação entre o asfalto e a borracha, ou seja, melhora sua adesividade.

CHUNG e HONG (2002) utilizaram produtos para aumentar a adesão dos agregados com o asfalto-borracha, encarecendo o produto final. Concluíram que utilizando 8 a 10% de borracha no asfalto, a resistência à compressão e a permeabilidade à água apresentaram melhores resultados.

6.3. ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE AGREGADOS E DA MISTURA ASFÁLTICA

A composição da mistura, de acordo com a tabela 5.2.6, está na faixa aceitável do intervalo prescrito pelo DNIT, atendendo às exigências quanto à variação de granulometria. A dosagem final da mistura asfáltica ocorreu com boa diminuição do teor de pó de borracha tratada, quando comparados com o pó de borracha sem tratamento, devido à diminuição da granulometria do pó de borracha. Após o tratamento, e devido à diminuição do módulo de finura, ocorre, também, aumento da viscosidade. Este aumento da viscosidade, apesar da diminuição do óleo extensor, influencia substancialmente no custo final da mistura asfáltica, gerando economia na produção. Como citado anteriormente, o óleo extensor tem a função de aumentar a dispersão do pó de borracha na mistura asfáltica, liberando as propriedades elásticas da borracha através do inchamento da borracha, onde pudemos notar diminuição da quantidade necessária para a produção da mistura asfáltica. Esta diminuição da quantidade necessária do óleo extensor se dá, provavelmente, em função do maior inchamento do pó de borracha tratada, pelo fato de que este pó está isento de impurezas.

Segundo SPECHET (2004), muitos materiais poliméricos com alto peso molecular (como as borrachas-polímeros hidrofóbicos) podem apresentar variação de volume quando imersos em materiais com baixo peso molecular. O que acontece é que as partículas de borracha aumentam 5 vezes de volume segundo RRL (1962). Isto porque absorvem pelas cadeias de polímeros certos óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, tornando-o mais dúctil, mais viscoso e com menor suscetibilidade térmica. Em contrapartida, são transferidas para o asfalto algumas características químicas das borrachas vulcanizadas, como inibidores de raios

ultravioletas e antioxidantes, produzindo, assim, um material mais resistente à fissuração, contribuindo para uma maior durabilidade do pavimento.

Este inchamento da borracha é uma difusão e não um processo químico (não há ligações livres nas borrachas vulcanizadas, para interação química com o asfalto). É resultado do movimento de líquidos em direção ao interior da matriz do polímero. Logo após sua imersão em meio oleoso, a superfície da borracha fica com alta concentração de líquidos; com o passar do tempo estes líquidos movem-se para o interior da partícula. Este movimento é controlado pela compatibilidade molecular da borracha e do líquido, do tempo de imersão e da viscosidade do líquido e do tempo de imersão. As fortes ligações nas cadeias da borracha previnem sua decomposição em meio oleoso, entretanto, pode haver casos de longa exposição em condições favoráveis a uma deterioração do polímero.

Ainda, segundo SPECHT (2004), enquanto a natureza química do líquido determina o equilíbrio do valor do inchamento, é a viscosidade do líquido que determina a velocidade. O grau de inchamento aumenta com decréscimo da viscosidade do líquido. Baseado nesta relação, uma maior velocidade de inchamento pode ser esperada, quando a borracha é adicionada com alta penetração (considerando o mesmo cru).

A interação entre o ligante e os polímeros podem ser avaliadas de várias maneiras, através de ensaios mecânicos e reológicos, da análise química ou da análise microscópica. BRULÉ e DRUON (1975) apresentaram metodologia que utiliza a microscopia ótica de fluorescência para avaliar a qualidade e interação de misturas asfalto-polímero, principalmente os fatores referentes à deterioração e homogeneidade.

Segundo NEWCOMB et al (1994) a presença de carga mineral pode inibir o inchamento das partículas de borracha. Com o aumento da quantidade de “negro de fumo”, há um redução linear no aumento de volume do polímero. Segundo EPPS (1997), o negro de fumo, um dos componentes da borracha, inibe o envelhecimento do ligante, aumentando sua durabilidade.

6.3.1. Análise do Resultado do Ensaio de Ponto de Amolecimento da Mistura Asfáltica

O asfalto amolece lentamente sob aquecimento e não possui ponto de fusão. Para se ter uma referência semelhante ao ponto de fusão, várias metodologias foram desenvolvidas a fim de medir a temperatura na qual o asfalto possui certa consistência, sendo o mais indicado o ensaio de ponto de amolecimento (SPECHELT - 2004). O gráfico a seguir apresenta os resultados do ensaio de ponto de amolecimento das misturas asfálticas para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

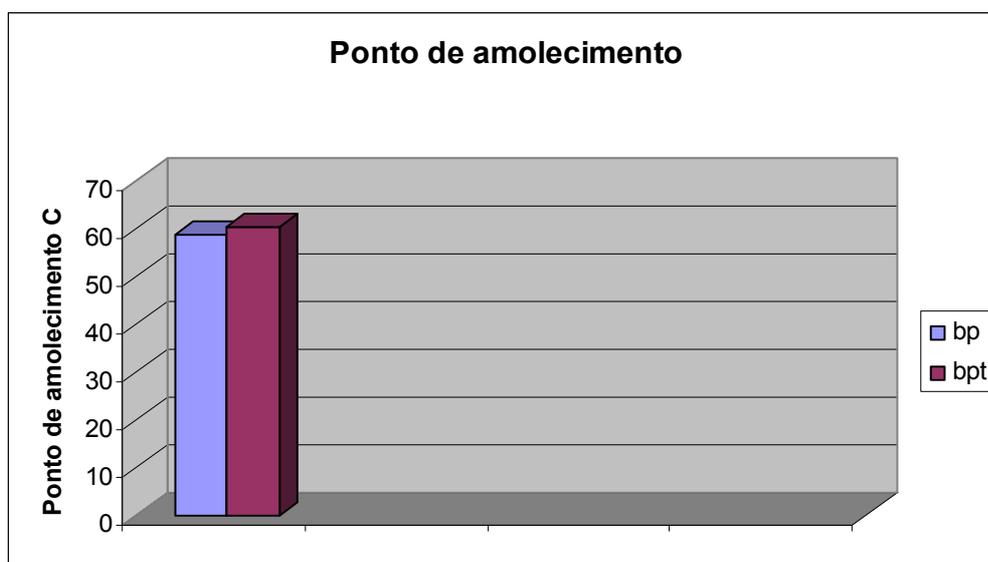


Gráfico 6.3.1 - Ponto de amolecimento da borracha, com e sem tratamento

O ensaio de ponto de amolecimento determina, em condições bem definidas, a mistura asfáltica para que possa ser reproduzida. O ponto de amolecimento é inversamente proporcional à penetração. Podemos notar que o ponto de amolecimento da borracha tratada (60,3 °C) aumentou em relação à não tratada (59 °C).

SANTOS et al (2003) observaram que, com o aumento da quantidade de borracha no asfalto, o ponto de amolecimento aumenta. Segundo a literatura, esperava-se um pequeno aumento no ponto de amolecimento visto que as propriedades ficam mais evidentes com a adição da borracha no asfalto. Contudo, os resultados obtidos apresentaram pouca diferença de valores entre o asfalto-borracha tratado e sem tratamento.

6.3.2. Análise do Resultado do Ensaio de Penetração da Mistura Asfáltica

O gráfico a seguir apresenta os ensaios de penetração das misturas asfálticas para os dois tipos de pó de borracha onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

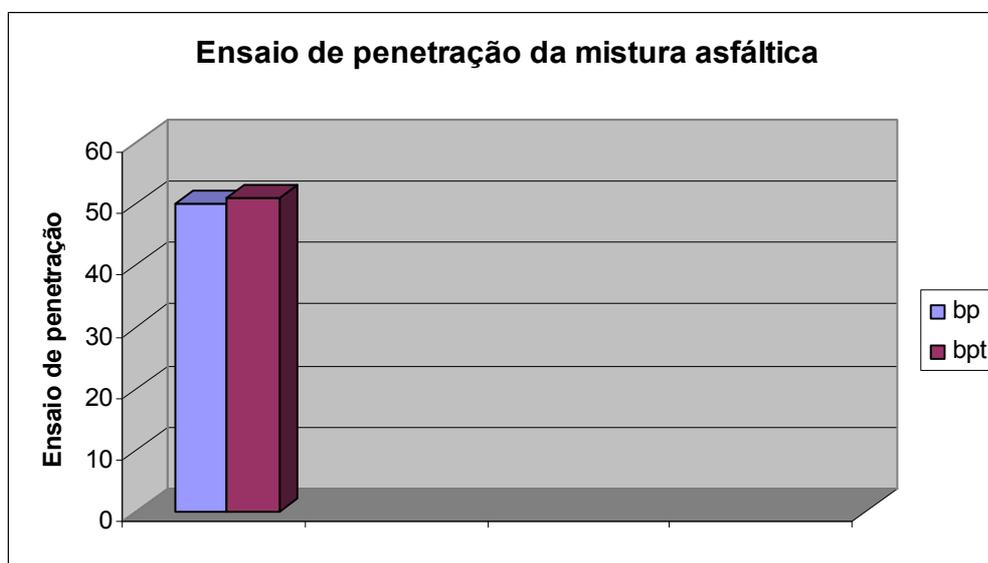


Gráfico 6.3.2 - Ensaio de penetração da mistura asfáltica, com borracha com e sem tratamento

Apesar de diminuirmos o teor de pó de borracha e do óleo extensor na mistura, quando utilizamos pó de borracha tratada, a penetração aumentou de 50 °C para 51 °C, fazendo com

que possamos produzir um asfalto com boa trabalhabilidade, ou seja, a trabalhabilidade não foi comprometida, embora ocorra melhora muito pequena ao se comparar o CAP tratado e não tratado.

Na literatura, SANTOS et al (2003) demonstraram que, com o aumento do teor de borracha no asfalto até 17% de borracha, a penetração diminui. Analisando o gráfico 5.3.2, correu aumento da penetração no asfalto como era esperado, pois o teor de 16% de borracha tratada é inferior aos 18% do teor de borracha sem tratamento utilizada nos ensaios.

6.3.3. Análise do Resultado do Ensaio de Viscosidade Brookfield da Mistura Asfáltica

O gráfico a seguir apresenta os ensaios de Viscosidade Brookfield das misturas asfálticas para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

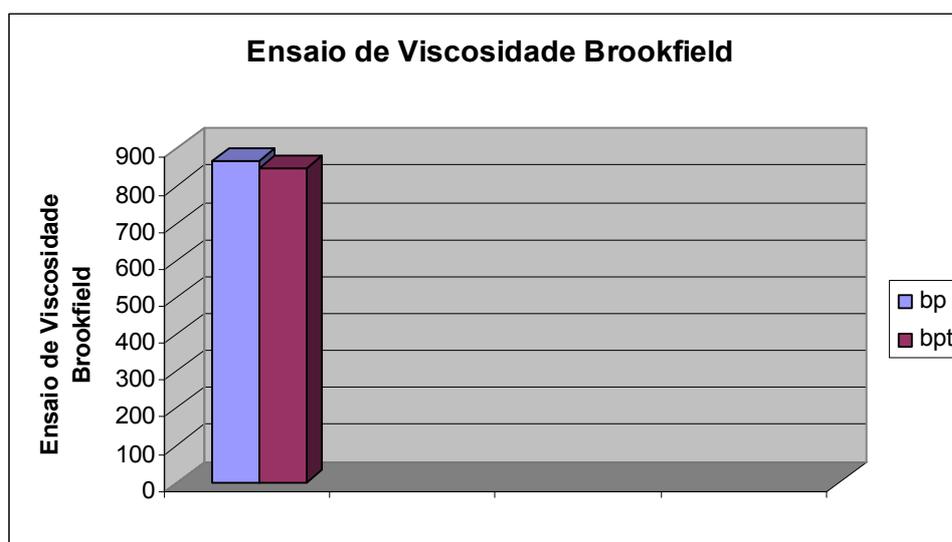


Gráfico 6.3.3 - Ensaio de Viscosidade Brookfield da mistura asfáltica, com borracha com e sem tratamento

A adição do pó de borracha, tratada ou não, com hidróxido de sódio não afetou a viscosidade da mistura asfáltica. Diante disso, tivemos que modificar a dosagem do pó de borracha e do óleo extensor, para adequar aos padrões dos asfaltos da empresa Ipiranga SA. Com a terceira dosagem obtida neste trabalho, a viscosidade manteve-se praticamente a mesma, não alterando sua trabalhabilidade. Com a adição de borracha tratada, a viscosidade atingiu o valor de 850, enquanto que, com a borracha sem tratamento, a viscosidade foi de 870.

O CAP com borracha tratada tornou-se menos viscoso, ou seja, mais fluído. Normalmente, a adição de borracha no CAP, aumenta a viscosidade do material. Os resultados obtidos demonstram que a borracha tratada compensou, em parte, o aumento da viscosidade, tornando-o um pouco mais trabalhável. O aumento da viscosidade causa o aumento da rigidez da mistura asfáltica, de tal maneira que um pavimento asfáltico sofrerá deformação permanente superior sob a ação da temperatura, ou seja, em situações extremas de clima.

LIMA et al (2006), estudando os efeitos da borracha de pneu na viscosidade do ligante asfáltico, observaram através de microscopia eletrônica de varredura, as características morfológicas do asfalto-borracha, que justificaram as modificações da interação entre o ligante e a borracha. Notaram melhora na elasticidade e na resistência à deformação. A borracha tratada melhora a viscosidade do asfalto-borracha, ou seja, as propriedades destacadas por pesquisadores como SPECHT, 2004, estão mais visíveis no asfalto-borracha tratado, ainda que este valor seja pequeno, pois, uma das principais vantagens do cimento asfalto emborrachado, segundo os autores, é que sua relação temperatura-viscosidade não é linear. Ele é mais viscoso que o ligante convencional, entretanto não perde a ductilidade e torna-se frágil a baixas temperaturas. Quando sujeito a altas temperaturas não reduz tanto sua consistência quanto os cimentos convencionais. Desta forma, diminui a possibilidade de trincamento a baixas temperaturas, bem como a possibilidade de afundamento de trilhas de roda em temperaturas elevadas.

Devemos, ainda, considerar a diferença na dosagem do pó de borracha tratada (16%) em relação com a não tratada (18%).

6.3.4. Análise do Resultado do Ensaio de Recuperação Elástica da Mistura Asfáltica

O gráfico a seguir apresenta os ensaios de recuperação elástica das misturas asfálticas, para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

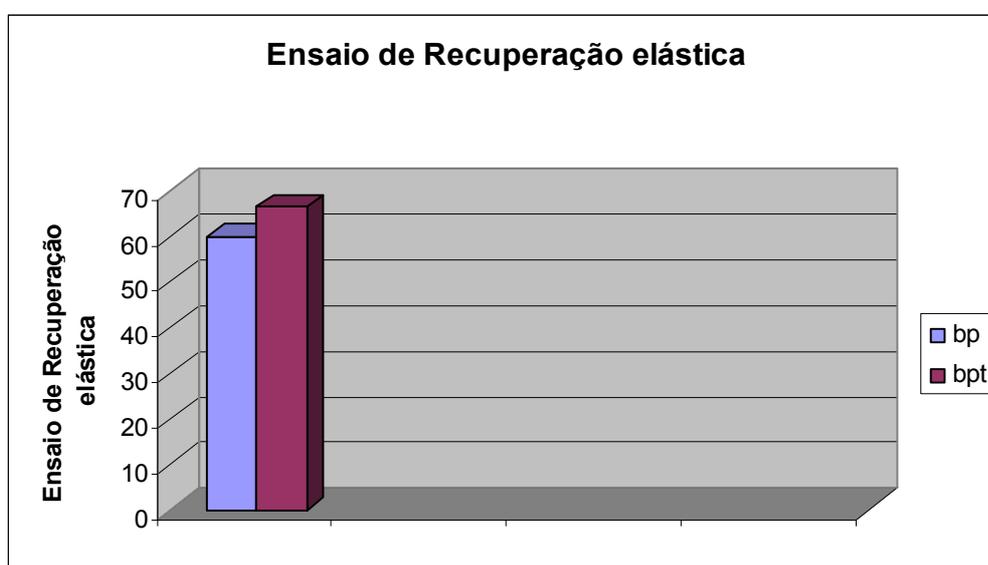


Gráfico 6.3.4 - Ensaio de Recuperação elástica da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

A recuperação elástica da mistura asfáltica com borracha tratada com hidróxido de sódio (66,5) aumentou em mais de 10% quando comparados com a mistura de asfalto-borracha sem tratamento (60). Este efeito demonstra que, quando a mistura sofre esforços e deformação, ela tem maior facilidade de recuperar sua deformação, influenciando diretamente na durabilidade do asfalto.

YETKIN YILDIRIM (2007), realizando estudos com asfalto modificados com diversos polímeros, constatou que a recuperação elástica é maior quando utilizamos borracha com

asfalto. Apesar do ótimo resultado no ensaio de recuperação elástica no gráfico 5.3.4, utilizando asfalto com borracha sem tratamento onde o valor mínimo é 50, o resultado da recuperação elástica, utilizando asfalto com borracha tratada, foi surpreendente.

BERTOLLO et al (2002) executaram ensaios em seu trabalho, utilizando diversas granulometrias, concluindo que a incorporação de menor granulometria de pó de borracha melhorou definitivamente a recuperação elástica, demonstrado através do ensaio de trilha de roda.

6.3.5. Análise do Resultado do Ensaio de Estabilidade à Estocagem da Mistura Asfáltica

O gráfico a seguir apresenta os ensaios de estabilidade à estocagem das misturas asfálticas, para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

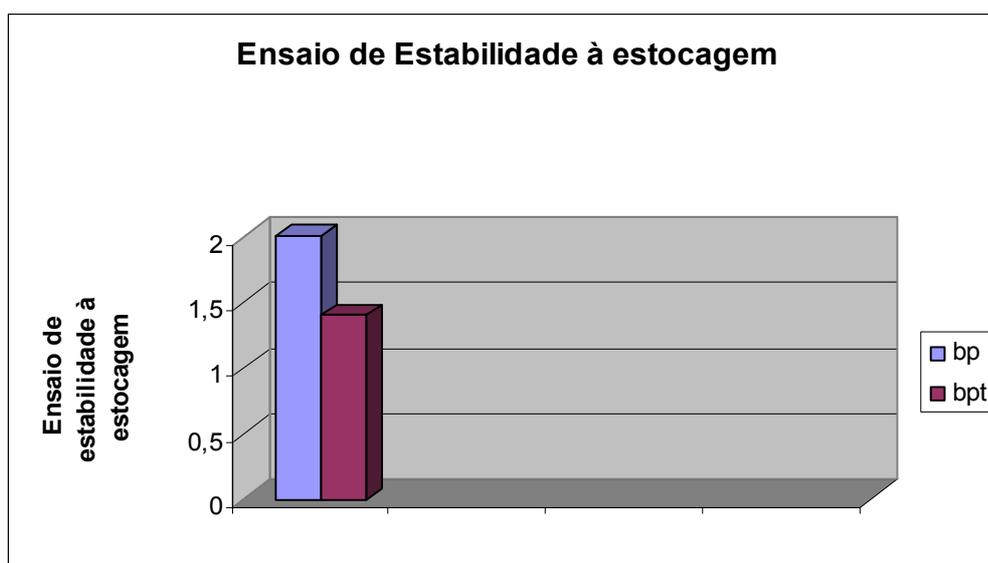


Gráfico 6.3.5 - Ensaio de Estabilidade à estocagem da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

Os ensaios de estabilidade à estocagem apresentaram resultados bastante consistentes quando comparamos as misturas asfálticas com pó de borracha tratada e não tratada. Os resultados indicam que, com o tratamento da borracha, a estabilidade é bem maior (1,4 °C), quando comparados com a borracha sem tratamento (2 °C). O valor máximo aceito para esta mistura asfáltica é de 9 °C.

Segundo LEITE et al (2006), os asfaltos modificados por borracha moída de pneus, na maioria das vezes, não se apresentam estocáveis. Desta forma, muitas empresas produzem o asfalto borracha, pouco antes da sua aplicação.

O tratamento do pó de borracha com hidróxido de sódio, neste trabalho, na tabela 6.3.5, melhorou bastante a estabilidade à estocagem, podendo minorar a dificuldade de se produzir asfalto-borracha "just in time". Cada empresa especifica seu limite de estabilidade, pois existe o limite máximo de 9º C, de acordo com as normas.

NAVARRO et al (2005), estudando a reologia do asfalto-borracha, observou que ocorre estabilidade à estocagem com temperaturas a 180 °C, sempre quando aumentamos a quantidade de borracha.

NAVARRO et al (2004), também observaram que a estabilidade à estocagem ocorreu com partículas de pó de borracha menores que 0,29mm.

Devemos dar grande destaque ao nosso trabalho com asfalto e borracha tratada, pois notamos que houve melhora da estabilidade à estocagem, mesmo com partículas maiores que 0,29mm, embora, os trabalhos referentes à nossa pesquisa afirmem disposição contrária, aqui obtivemos sucesso, permitindo o uso da borracha moída e sua granulometria disponível no mercado, podendo ser utilizados tornando-as mais estáveis.

6.3.6. Análise do Resultado do Ensaio de Ponto de Fulgor da Mistura Asfáltica

O gráfico a seguir apresenta os ensaios de ponto de fulgor das misturas asfálticas para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

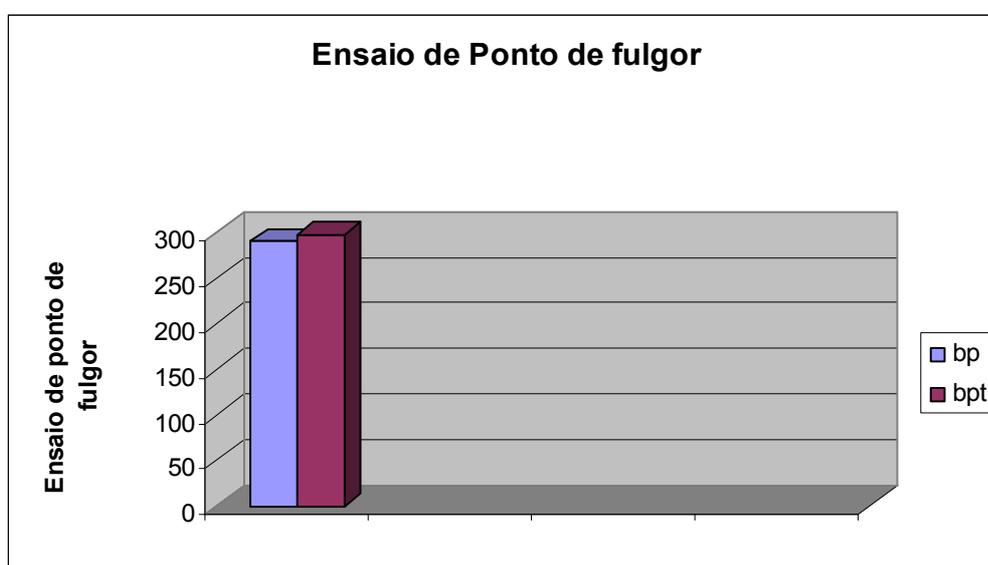


Gráfico 6.3.6 - Ensaio de Ponto de fulgor da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

O Ensaio de Ponto de Fulgor tem por finalidade evitar acidentes de trabalho e verificar possível contaminação do cimento asfáltico com solventes. O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material betuminoso, se inflamam. O ponto de fulgor, para a mistura asfáltica com borracha tratada foi de 298 °C, enquanto que com borracha não tratada foi de 290 °C, apresentando uma pequena melhora da mistura com borracha tratada, em relação a não tratada. O ponto de fulgor mínimo é de 235 °C.

SPECHT (2004), em sua tese de doutorado, demonstrou que a adição de borracha no asfalto é o fator mais importante dentre vários analisados para modificar o ponto de fulgor da

mistura. O asfalto, com borracha tratada melhorou a segurança quanto a acidentes de trabalho, no nosso caso.

6.3.7. Análise do Resultado dos Ensaios de RTFOT, da Mistura Asfáltica

Os gráficos a seguir apresentam os ensaios de RTFOT das misturas asfálticas, para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratado com hidróxido de sódio

O gráfico 6.3.7.1. apresenta os resultados do ensaio de envelhecimento quanto à perda de massa; o gráfico 6.3.7.2. apresenta os resultados do ensaio de envelhecimento quanto à penetração original, e o gráfico 6.3.7.3 apresenta os resultados do ensaio de recuperação elástica original.

Normalmente, segundo BALBO (2003), com o envelhecimento do ligante, ocorre aumento da consistência, aumento do ponto de amolecimento, decréscimo da suscetibilidade térmica e fragilidade do material.

GREGO (2004) constatou que a adição de borracha no asfalto melhora sua durabilidade. Podemos pensar que, com o tratamento superficial do pó de borracha, ocorre melhora acentuada do asfalto-borracha pois, em todos os resultados dos ensaios utilizando borracha tratada no asfalto, os resultados demonstraram aumento do efeito da borracha no asfalto.

6.3.7.1. Análise do Resultado dos Ensaio de RTFOT da Mistura Asfáltica (variação de massa)

Os resultados dos ensaios de variação de massa indicaram grande melhora do asfalto com borracha tratada. Enquanto os resultados do asfalto-borracha sem tratamento indicavam perda de massa de 0,19%, os resultados dos ensaios com borracha tratada apresentaram a perda de massa de apenas 0,09%, quando o valor máximo de perda de massa é de 1%.

SANTOS et al (2003) concluíram que a resistência térmica do asfalto utilizando borracha melhora sensivelmente, quando comparadas com asfalto sem borracha. Entretanto, os pesquisadores constataram que o asfalto-borracha contendo teor de 6 a 12% de borracha apresentava melhor resistência no ensaio de envelhecimento. Com maiores teores de borracha, os resultados não foram satisfatórios. Analisando os resultados do gráfico 6.3.7.1, notamos que a utilização de 16% de borracha tratada melhorou muito no ensaio de envelhecimento.

CHING e WING-GUN (2007) realizaram estudos com uso de borracha moída no asfalto, quanto à suscetibilidade térmica. Os pesquisadores analisaram diferentes tamanhos de borracha. Observaram que a resistência do asfalto, quanto à temperatura, aumentava, utilizando-se 10% de borracha na mistura. Tratando-se a borracha com hidróxido de sódio pudemos utilizar maior teor de borracha para atender necessidades técnicas e de mercado.

RUAN et al (2003) analisaram a oxidação de polímeros no asfalto. Concluíram que uso de polímeros, inclusive de borracha de pneus no asfalto, diminuem a oxidação do asfalto. Podemos notar no gráfico 6.3.7.1 a melhora do asfalto-borracha, tratado com hidróxido de sódio. O tratamento superficial da borracha melhora ainda mais a variação de massa no ensaio de envelhecimento.

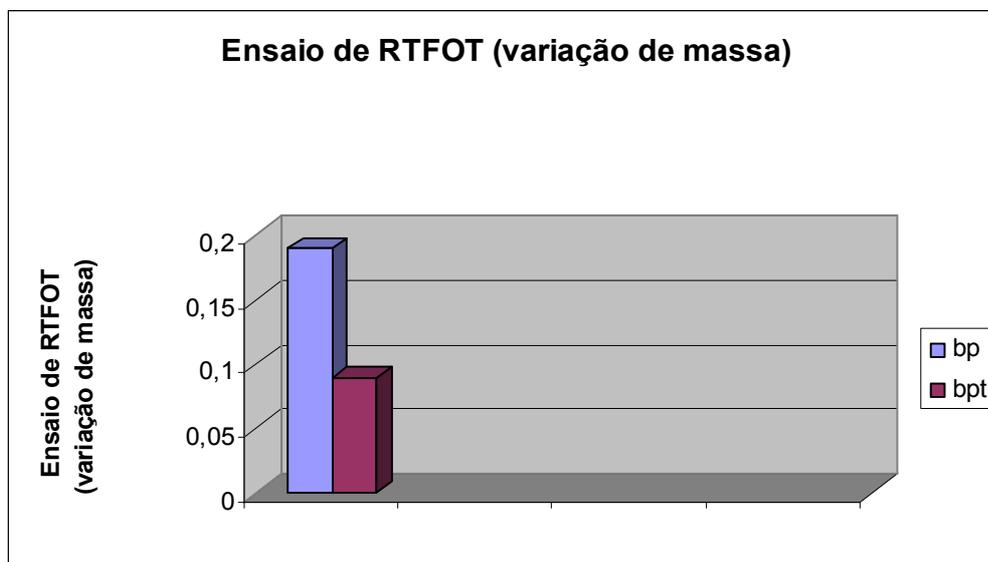


Gráfico 6.3.7.1 - Ensaio de RTFOT, quanto à perda de massa da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

6.3.7.2. ANÁLISE DO RESULTADO DOS ENSAIOS DE RTFOT, DA MISTURA ASFÁLTICA (ECA, % de penetração original)

Podemos observar que os ensaios de porcentagem de penetração original indicaram boa melhora do asfalto com borracha tratada. Enquanto os resultados do asfalto-borracha sem tratamento indicavam recuperação da porcentagem de penetração original, de 68%, os resultados dos ensaios, com borracha tratada, apresentaram maior recuperação com o valor de 78% , quando o valor mínimo é de 50%.

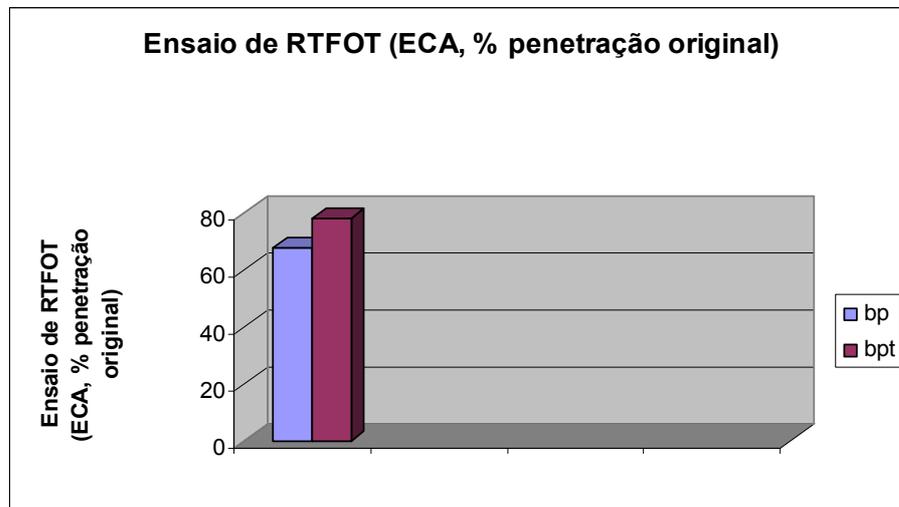


Gráfico 6.3.7.2 - Ensaio de RTFOT, quanto à % de penetração original da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

Segundo BALBO (2007), as resinas do asfalto que sofrem oxidação em suas frações mais pesadas, resultam em asfaltenos. O aumento da quantidade de asfaltenos e a redução das resinas determinam as novas características do asfalto envelhecido, tornando-o mais viscoso e frágil e ocasionando perda de elasticidade. Os resultados apresentados no gráfico 6.3.7.2 representam ótimos resultados, no ensaio de envelhecimento, quanto à penetração original.

6.3.7.3. ANÁLISE DO RESULTADO DOS ENSAIOS DE RTFOT DA MISTURA ASFÁLTICA (% de recuperação elástica original):

Observamos que os ensaios de porcentagem de recuperação elástica original indicaram melhora do asfalto com borracha tratada. Os resultados do asfalto-borracha, sem tratamento, indicavam recuperação da porcentagem de recuperação elástica original de 105%, enquanto que os resultados dos ensaios com borracha tratada apresentaram maior recuperação, com o valor de 115%.

PEREIRA et al (2010) avaliaram a deformação permanente das misturas de asfalto com borracha. Constataram que a adição de borracha no asfalto melhorou, em todos os ensaios em que a borracha foi adicionada, ficando a deformação permanente, quando os corpos de prova eram submetidos à temperatura.

RUAN et al (2003), utilizando ensaio RTFOT com asfalto-borracha, concluíram que, com o uso do asfalto- borracha houve melhora na recuperação elástica original.

CHIPPS et al (2001) estudaram o envelhecimento do asfalto através de ensaio de desempenho em asfalto-borracha. Constataram o melhor desempenho do asfalto-borracha, quando comparados com o asfalto convencional. Os autores aconselharam a utilização de, pelo menos, 10% de borracha no asfalto para diminuir o envelhecimento do mesmo.

Este trabalho demonstra melhora, ainda maior, do asfalto-borracha tratado, analisando o gráfico 6.3.7.3.

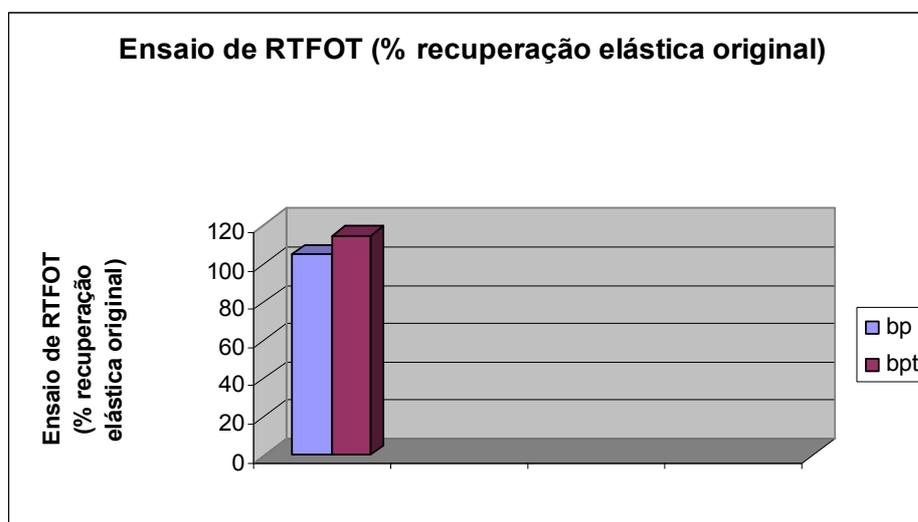


Gráfico 6.3.7.3 - Ensaio de RTFOT, quanto à % de recuperação elástica original da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO CONCRETO ASFÁLTICO (MARSHALL):

Os resultados obtidos pelo ensaio Marshall, fixando-se sua distribuição granulométrica e variando-se o teor de betume foram os esperados, pois a adição de pó de borracha tratada não comprometeu os resultados dos ensaios. A pequena perda na resistência à compressão foi compensada pelo grande aumento na durabilidade do asfalto e levando-se em consideração que a principal resistência para o dimensionamento dos pisos de asfalto é a resistência à tração. Estes resultados proporcionaram uma mistura trabalhável para lançamento e compactação do asfalto na obra; a mistura apresentou-se estável e durável, obtidas através do teor de asfalto e adequando-os com vazios de ar suficientes e não excessivos. O processo de seleção de betume ideal foi conduzido a uma RBV de 80%, levando a uma porcentagem de vazios de 4% e trazendo o teor de betume à maior estabilidade e à maior densidade possíveis, tal qual no ensaio Marshall.

6.4.1. Análise dos Resultados dos Ensaios de Densidade Aparente

O gráfico 6.4.1. apresenta os resultados dos ensaios da densidade aparente das misturas, em função dos teores de asfalto utilizando borracha tratada e não tratada, para os dois tipos de pó de borracha, onde

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

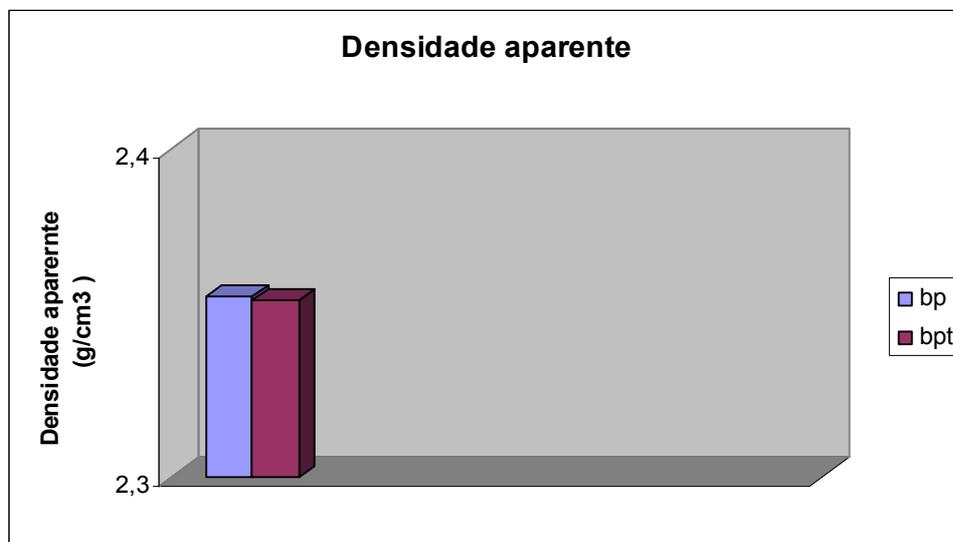


Gráfico 6.4.1 - Ensaio de densidade aparente da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

Segundo BALBO (2007), estudos do USACE na década de 1940 mostraram que as massas específicas atingidas em pistas de aeroportos, após cerca de 1.500 coberturas de aeronaves, eram aproximadamente equivalentes às massas específicas obtidas em laboratórios, quando fossem aplicados 50 golpes por face do corpo-de-prova, compactado como descrito. Posteriormente, verificou-se que o número de golpes, para pneus de pressão mais elevada, seria de 75 para a equivalência entre tais pesos específicos. No critério do USACE, a pressão de 0,69 MPa é o limite para dosagem entre 50 e 75 golpes, de tal forma que, com pressão de pneus vigentes na prática, atualmente de cerca de 0,65 MPa, não haveria razões para não se aplicar o critério de 75 golpes para pavimentos rodoviários.

Podemos notar, pelo gráfico 6.4.1, que a variação da densidade aparente do asfalto-borracha, com e sem tratamento, foram similares. Para o asfalto-borracha utilizando pó de borracha tratada, a densidade foi de 2,354 g/cm³, enquanto que a densidade do asfalto-borracha sem tratamento foi de 2,355 g/cm³.

6.4.2. Análise dos Resultados dos Ensaios de Estabilidade Marshall

Segundo a literatura, a queda da resistência do CAP com borracha tratada é esperada, mas, segundo BALBO (2003), o decréscimo do valor de resistência só faz sentido em uma análise de qualidade, se consideramos simultaneamente os valores de módulo de resiliência dos materiais, ou seja, sua elasticidade.

ELDIN e SENOUCI (1993) também substituíram a borracha de pneu por agregado, no concreto convencional. Constataram a diminuição da resistência à compressão do concreto elaborado com esse material em 85% quando comparado ao concreto comum, mas notaram que a resistência mecânica depende do tamanho de partícula de pneu utilizada. O concreto com borracha de pneu teve uma redução de 25%, em relação ao seu peso de um concreto normal. Os autores notaram que, quando a borracha foi substituída por agregados finos, houve uma menor perda de resistência à compressão, comparados com a substituição da borracha por agregados graúdos.

ALI et al (1993), ensaiando concretos de cimento Portland com adição de partículas de borracha, constataram que houve uma queda brusca na resistência à compressão e à tração. Os autores atribuem, também, à queda de resistência mecânica, o fato de que a borracha é incapaz de absorver cargas sem deformação excessiva.

Podemos notar que a substituição da borracha, com granulometrias maiores nos diversos materiais, afetam sua resistência à compressão.

OTHMAN (2006) realizou ensaios com asfalto-borracha utilizando 15% da borracha no asfalto, concluiu que a resistência no asfalto aumenta, inclusive com ensaios de solicitação cíclica com temperatura.

MOMM et al (2004) apresentam trabalho, avaliando desempenho, de misturas com asfaltos modificados por borracha. Os resultados no ensaio Marshall, quanto à estabilidade,

aumentaram, com uso de asfalto-borracha quando comparados ao asfalto convencional, mas este aumento ocorreu com o aumento simultâneo de teor de ligante asfáltico.

Podemos notar pelo gráfico 6.4.2 que a variação da resistência do asfalto-borracha, com e sem tratamento, foram pequenas. Para o asfalto- borracha utilizando pó de borracha tratada, a resistência foi de 780 Kgf, enquanto que a resistência do asfalto-borracha sem tratamento foi de 825 Kgf. Esta variação de 5,7%, interfere muito pouco na vida útil do asfalto, quando em uso, pelo fato de que sua durabilidade quanto ao envelhecimento, recuperação elástica e resistência à tração foram maiores quando comparados com asfalto-borracha sem tratamento. Estes fatores são de maior interesse para a execução de pistas. Devemos considerar a menor quantidade de asfalto-borracha, utilizada na dosagem com asfalto-borracha tratada.

Os ensaios de resistência demonstram pequena queda na resistência à compressão, quando utilizam asfalto-borracha, mas, segundo a literatura, quando envolvem conjuntamente envelhecimento ou temperatura, a utilização do asfalto-borracha é definitivamente melhor.

O gráfico 6.4.2. apresenta os resultados dos ensaios de estabilidade das misturas, em função dos teores de asfalto utilizando borracha tratada e não tratada, para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

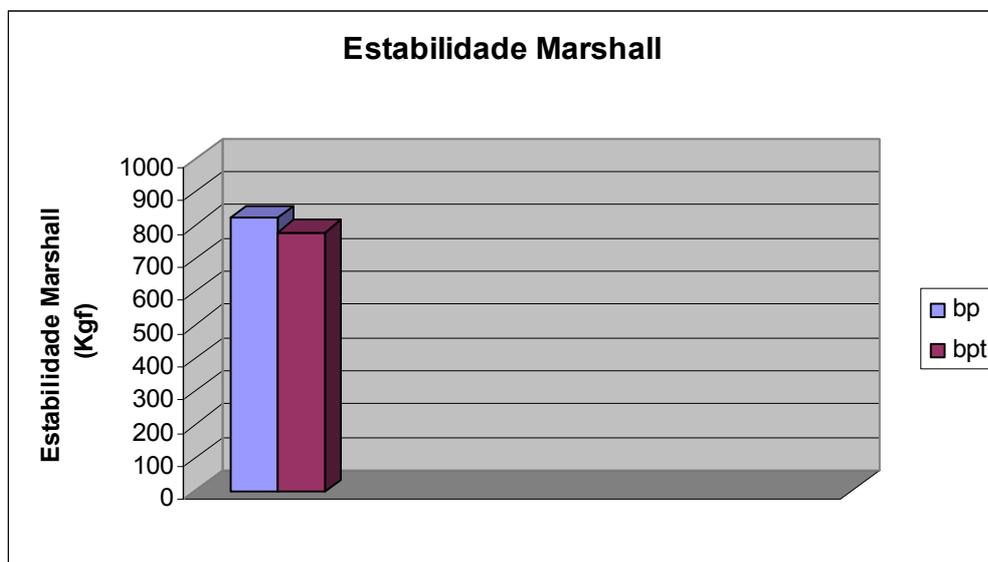


Gráfico 6.4.2 - Ensaio de estabilidade da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

6.4.3. Análise dos Resultados dos Ensaios de Índice de Vazios

Segundo Marshall, o método de dosagem consiste na aferição de algumas propriedades de misturas elaboradas em laboratórios (ou em campo), fixando-se sua distribuição granulométrica e variando-se o teor de betume, nos corpos de prova (em geral, de 3% a 7% de peso, em relação aos agregados). Tal método, a princípio, está limitado ao emprego com misturas asfálticas a quente.

Definida uma distribuição granulométrica, que comporá os agregados da mistura asfáltica, as misturas são preparadas de maneira a apresentar vazios internos, preenchidos por ar entre 3% e 5%; tal critério de um valor mínimo de vazios, na mistura compactada é tomado, uma vez que, em pista, caso não existam vazios, os efeitos imediatamente posteriores do tráfego poderiam resultar em exsudação do ligante asfáltico, sendo, portanto, necessário espaço livre para o fluxo de ligante, em processo inicial de deformação plástica da mistura.

O gráfico 6.4.3 apresenta os resultados dos ensaios de índice de vazios das misturas, em função dos teores de asfalto utilizando borracha tratada e não tratada, para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

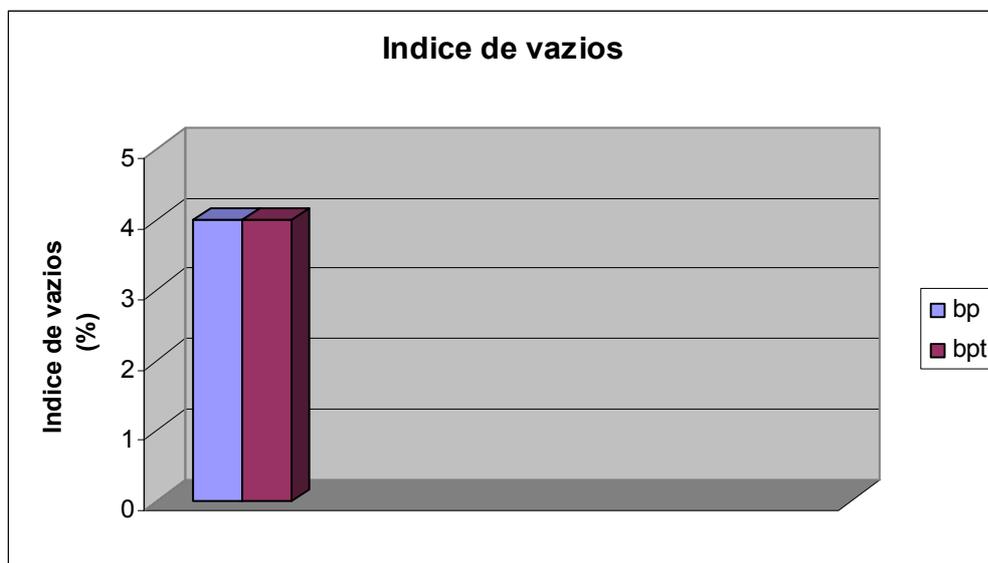


Gráfico 6.4.3 - Ensaio de estabilidade da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

Podemos notar, pelo gráfico 6.4.3, que não houve variação no ensaio de índice de vazios do asfalto borracha, com e sem tratamento, permanecendo em 4%.

6.4.4. Análise dos Resultados dos Ensaios de Relação Betume-Vazios

O gráfico 6.4.4 apresenta os resultados dos ensaios de relação betume-vazios, das misturas em função dos teores de asfalto, utilizando borracha tratada e não tratada para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratada com hidróxido de sódio

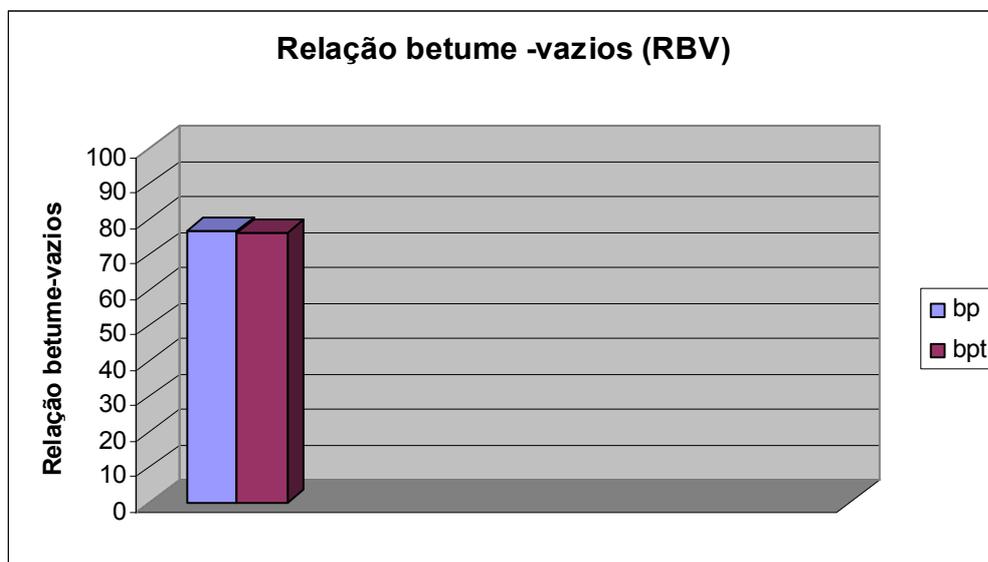


Gráfico 6.4.4 - Ensaio de relação betume-vazios da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

Podemos notar, pelo gráfico 6.4.4, que nos resultados dos ensaios de Relação betume-vazios do asfalto borracha, com e sem tratamento, não houve diferenças significativas. Para o asfalto-borracha, utilizando pó de borracha tratada, a relação foi de 76,1%, enquanto que a relação do asfalto-borracha, sem tratamento, foi de 76,7%. Este ensaio indica a porcentagem de vazios preenchidos com betume.

6.4.5. Análise dos Resultados dos Ensaios de Vazios, Agregado Mineral

O gráfico 6.4.5 apresenta os resultados dos ensaios de vazios, agregado mineral das misturas, em função dos teores de asfalto, utilizando borracha tratada e não tratada para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratado com hidróxido de sódio

Constatamos que, pelo gráfico 6.4.5, a variação dos resultados no ensaio de Vazios agregado mineral do asfalto-borracha, com e sem tratamento, foram praticamente iguais. Para o asfalto-borracha, utilizando pó de borracha tratada, a relação foi de 17,5%, enquanto que a relação do asfalto-borracha sem tratamento foi de 17,6%.

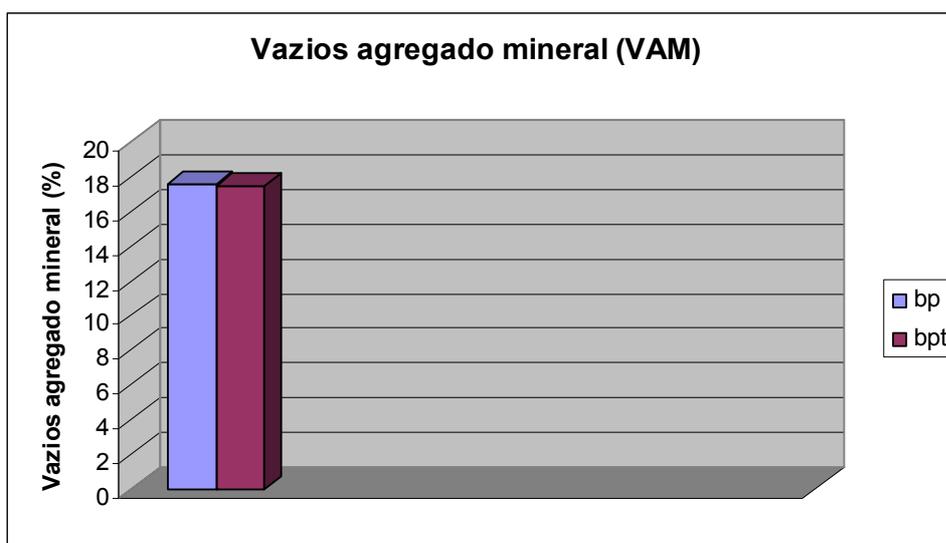


Gráfico 6.4.5 - Ensaio de vazios agregado mineral da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

Este ensaio apresenta a quantidade de vazios no corpo de prova.

6.4.6. Análise dos Resultados dos Ensaios de Fluência

Para cada corpo de prova ensaiado (em geral, para pares com diferentes teores de betume) são extraídas duas propriedades mecânicas, designadas por estabilidade e por fluência. Por estabilidade, o valor da força vertical máxima aplicada, que leva a amostra (comprimida diametralmente) à ruptura, medida em quilos; por fluência, entende-se o valor da deformação vertical sofrida pela amostra imediatamente antes da ruptura, medida em centésimos de polegada ou em milímetros.

O gráfico 6.4.6 apresenta os resultados dos ensaios de fluência das misturas, em função dos teores de asfalto, utilizando borracha tratada e não tratada, para os dois tipos de pó de borracha, onde:

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratado com hidróxido de sódio

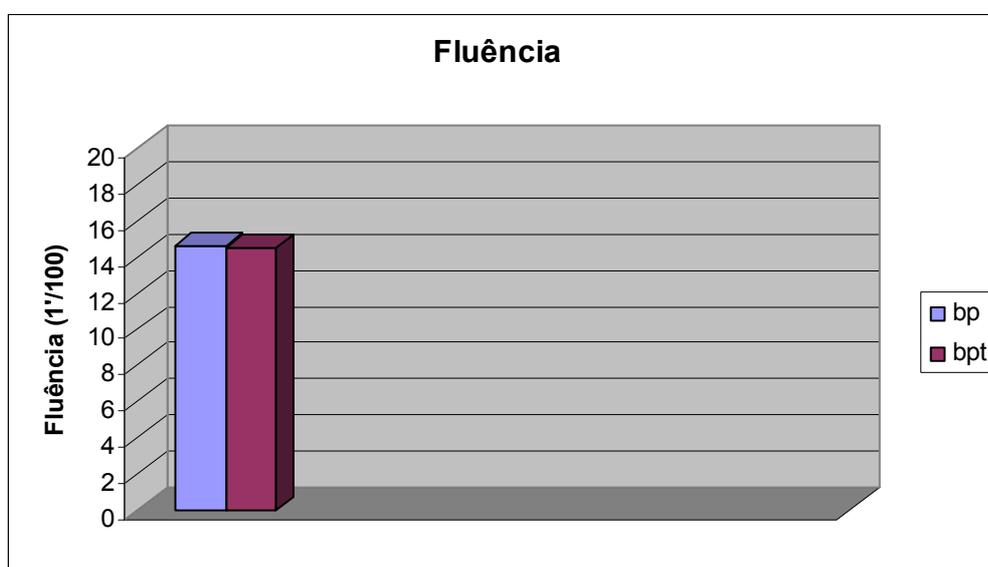


Gráfico 6.4.6 - Ensaio de fluência da mistura asfáltica, com borracha tratada e não tratada

O gráfico 6.4.6 apresenta a variação dos resultados no ensaio de relação fluência do asfalto-borracha, com e sem tratamento, constatando que não houve diferença significativa. Para o asfalto-borracha, utilizando pó de borracha tratada, a fluência foi de 14,5, enquanto que a relação do asfalto-borracha, sem tratamento, foi de 14,6.

6.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

O gráfico 6.5 apresenta os resultados dos ensaios de tração das diversas misturas, em função dos teores de asfalto, utilizando borracha tratada e não tratada, para os dois tipos de pó de borracha, onde

BP= borracha de pneu sem tratamento

BPT= borracha de pneu tratado com hidróxido de sódio

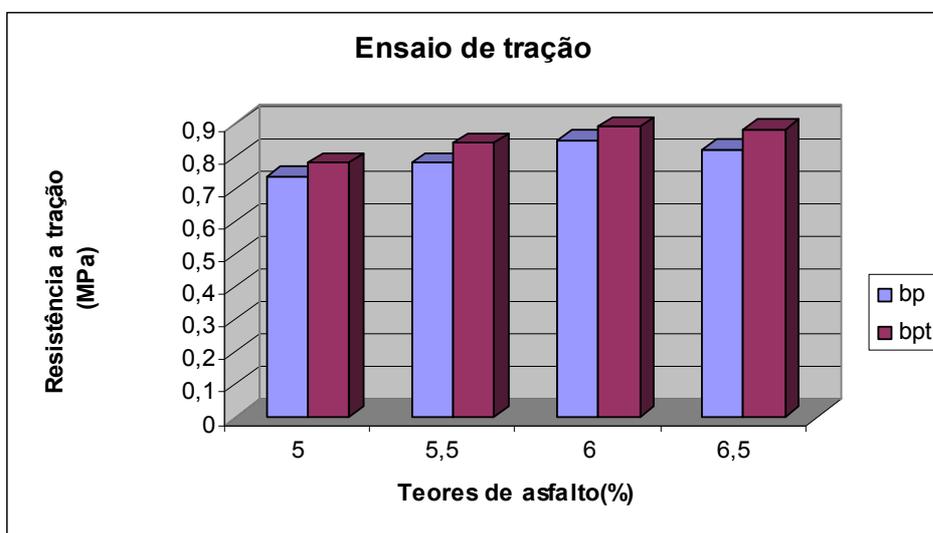


Gráfico 6.5 - Ensaio de tração das misturas asfálticas, com borracha tratada e não tratada

O gráfico 6.5 apresenta a variação dos resultados no ensaio de tração do asfalto-borracha, com e sem tratamento. Para o asfalto-borracha utilizando pó de borracha tratada, a resistência à tração foi maior em todos os casos. A resistência à tração é de suma importância para o dimensionamento do piso de asfalto. Este ensaio adicional foi desenvolvido com o intuito de demonstrar a melhora da resistência à tração em todos os casos, apesar de pequena, utilizando borracha tratada em comparação a não tratada.

Para a dosagem de 5,9 a 6% de teor de asfalto utilizado neste ensaio Marshall, a resistência à tração do asfalto-borracha tratada foi de 0,89 MPa, enquanto que a resistência à tração do asfalto-borracha sem tratamento foi de 0,85 MPa.

6.6. ANÁLISE CUSTO BENEFÍCIO

Segundo SPECH (2004), a razão de se combinar asfaltos com determinados polímeros, é prevenir a deterioração prematura do pavimento e, desta forma, estender sua vida útil. As propriedades que são esperadas com adição de polímeros são a redução de suscetibilidade térmica e aumento da ductilidade, levando a uma maior resistência a deformações plásticas, a altas temperaturas e suprimindo o aparecimento de fissuras de retração térmica e fadiga. Os polímeros também podem contribuir, para uma maior resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante-agregado.

Deve-se ressaltar que no Brasil, onde a fadiga é o fator predominante de deterioração das rodovias de grande importância, as utilizações de misturas asfálticas com borracha tornam-se especialmente atrativas. Os autores citam, ainda, que quanto maior a finura da granulometria do pó de borracha, maior será a área superficial e menor a temperatura e tempo de mistura para se obter um material homogêneo.

Concluem, ainda, que as vantagens técnicas e econômicas da adição de borracha ao ligante asfáltico seriam que elas proporcionam uma redução na espessura da camada asfáltica, tanto em recapeamento quanto em pavimentos novos; reduzem o nível de ruído provocado pelo atrito pneu/pavimento; possuem uma relação custo/benefício vantajosa sobre os ligantes convencionais, tendo em vista a baixa manutenção necessária com o passar dos anos; são ideais para utilização em restauração sobre pavimentos com níveis de trincamento severos, ligante com maior ductilidade; retardamento no tempo da reflexão de trincas; são indicados em camadas de rolamento devido à sua manutenção da elasticidade com o passar dos anos, ótima aderência e resistência ao envelhecimento.

WANG et al (2005) realizaram, através de simulações por elementos finitos, ensaios com asfalto-borracha. Os pesquisadores observaram que as misturas com borracha tinham maior absorção da vibração do tráfego, quando comparadas com asfaltos sem borracha.

CHIN et al (2007) realizaram estudos no sentido de conhecer o impacto ambiental utilizando asfalto convencional e asfalto-borracha. Concluíram que houve vantagem para o ambiente, considerando economia de energia em 16%, economia de recursos e menor poluição quando utilizaram asfalto-borracha, sempre comparando com o asfalto convencional. Os autores citam a utilização, em serviços do asfalto convencional de 6 anos e para o asfalto-borracha de 9 anos.

Estas condições de durabilidade do asfalto geram enorme economia, quando mensurados a médio ou longo prazo, e acreditamos que ocorram melhoras significativas com o asfalto-borracha tratado, mas, neste trabalho, pretendemos analisar a economia na produção do asfalto, sem considerar sua economia no dimensionamento e durabilidade, pois esta tese estuda o asfalto pela ótica da engenharia dos materiais.

O asfalto-borracha, tratado com hidróxido de sódio apresentou menor viscosidade, quando comparado com o asfalto-borracha sem tratamento. Podemos notar, através das tabelas 5.6.1 e 5.6.2, as menores viscosidades obtidas para as três temperaturas em estudo. Estas viscosidades, com suas respectivas temperaturas foram utilizadas no gráfico das temperaturas de usinagem e de compactação, com a finalidade de se obter as faixas de temperatura de usinagem e compactação na obra.

Este gráfico foi obtido através de programa de computador, desenvolvido da Ipiranga Asfaltos S.A. Os gráficos 5.6.1.e 5.6.2 apresentam valores menores de temperatura de usinagem e de compactação, gerando economia em energia e menor deterioração do asfalto-borracha, com relação à temperatura.

6.6.1. Viscosidade do material com pó de pneu sem tratamento (dosagem final)

Tabela 6.6.1 Viscosidade do material com pó de pneu sem tratamento

<i>TEMPERATURA (°C)</i>	<i>VISCOSIDADE (Cst)</i>
135	3400
145	2310
175	540

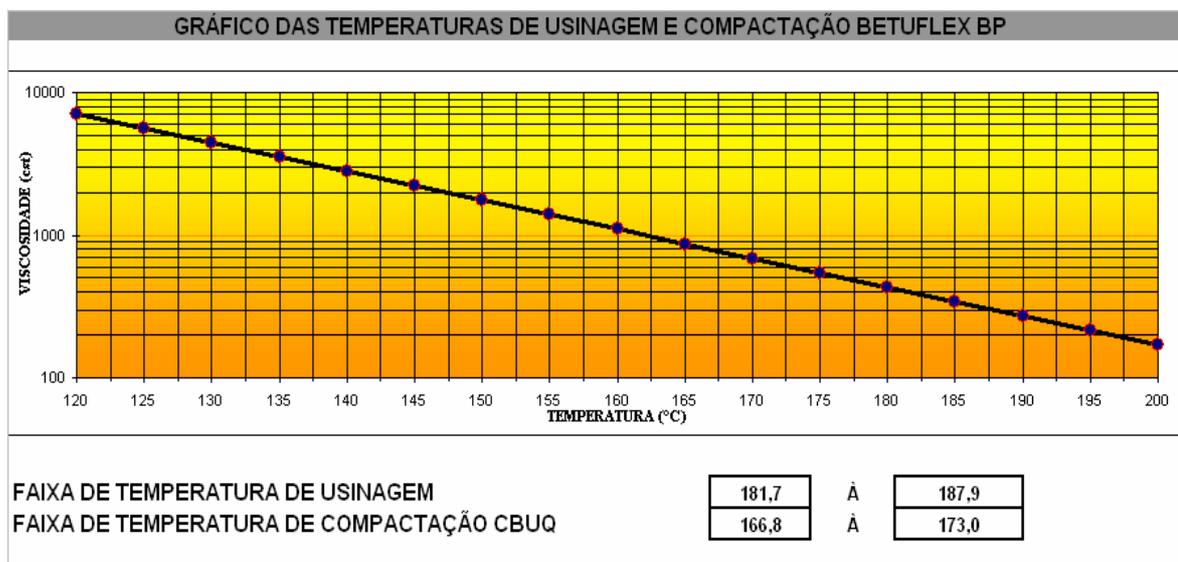


Gráfico 6.6.1 - Das temperaturas de usinagem e compactação Ligante asfáltico BP, com borracha sem tratamento

6.6.2. Viscosidade do material com pó de pneu tratado (dosagem final)

Tabela 6.6.2 - Viscosidade do material com pó de pneu tratado

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDADE (Cst)
135	3245
145	1357
175	445

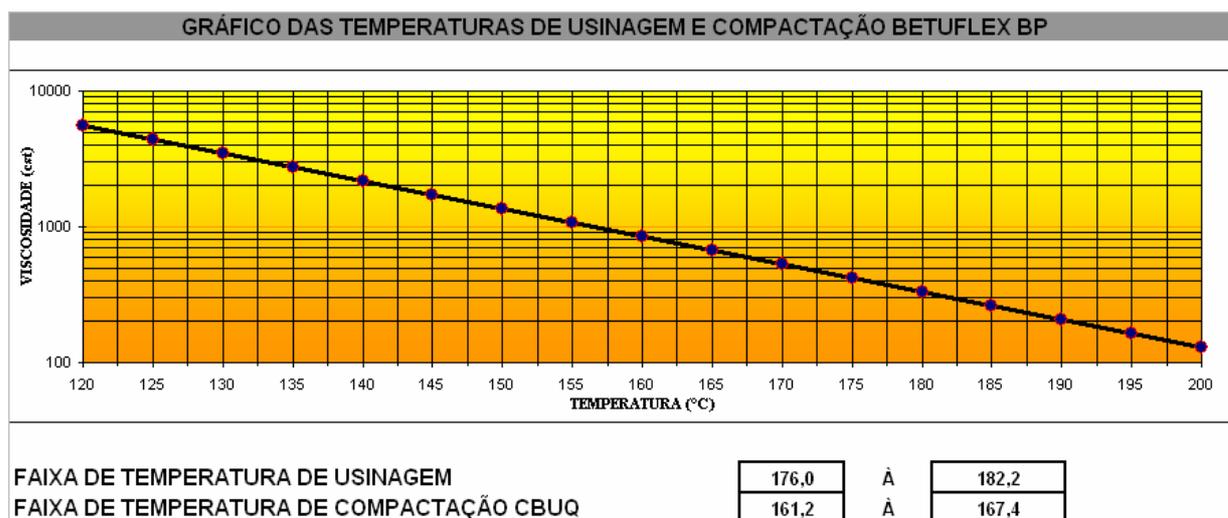


Gráfico 6.6.2 - Das temperaturas de usinagem e compactação Ligante asfáltico BPT com borracha tratada

As viscosidades acima se referem às leituras realizadas no Spindle 21, (usamos aqui uma forma simplificada de visualização e leitura rápida, mesmo não sendo esta a forma utilizada pela norma vigente), ao qual atende para uma leitura rápida, pois o que está especificado na norma é com o uso do Spindle 3.

As tabelas 6.6.3 e 6.6.4 apresentam os cálculos da produção de asfalto-borracha com e sem tratamento. Utilizamos os custos da empresa Ipiranga Asfaltos AS, para uma batelada de 25 toneladas pelo fato de que o reator da empresa supra possui esta capacidade. A economia gerada foi de 4,74%, quando utilizamos o asfalto-borracha tratado com hidróxido de sódio, comparando-se os mesmos custos com o asfalto-borracha sem tratamento.

Tabela 6.6.3 Cálculo de produção de asfalto-borracha (sem tratamento)

Cálculo de produção do asfalto - borracha (sem tratamento)				
Material/Insumos	Valor unitário	Dosagem	Quantidade	Total
Asfalto CAP 50/70	R\$ 776,00 / ton	78%	19.500 kg	R\$ 14.937,00
Pó de Pneu	R\$ 0,72 / kg	18%	4.500 kg	R\$ 3.240,00
Óleo Extensor	R\$ 1,70 / kg	4%	1.000 kg	R\$ 1.700,00
Custo Produção	R\$ 95,00 / ton	4 horas	2.375 kg	R\$ 2.375,00
			25 ton / Batelada	R\$ 22.252,00

Tabela 6.6.4 Cálculo de produção de asfalto-borracha (com tratamento)

Cálculo de produção do asfalto - borracha (tratada)				
Insumos	Valor unitário	Dosagem	Quantidade	Custo Total
Asfalto CAP 50/70	R\$ 776,00 / ton	82,22%	20.555 kg	R\$ 15.745,13
Pó de Pneu	R\$ 0,72 / kg	16%	4.000 kg	R\$ 2.880,00
Óleo Extensor	R\$ 1,70 / kg	1,78%	445 kg	R\$ 756,50
Produção	R\$ 95,00 / ton	3 horas	1.781,25 kg	R\$ 1.781,25
Tratamento do resíduo	R\$32,30	–	25.000 kg	R\$32,30
			25 ton / Batelada	R\$ 21.195,18

Devemos ainda considerar o descarte da solução de hidróxido de sódio, utilizado na produção do tratamento do pó de borracha. A cada 10 ciclos de tratamento, ou seja, a solução utilizada pôde ser reaproveitada 10 vezes para novos tratamentos. Consideramos filtrar o resíduo em filtro de areia e reutilizar a solução para novos tratamentos. O custo do tratamento, para cada dez ciclos é de R\$323,00, considerando-se funcionários e equipamentos, ou seja, o valor para cada ciclo é de R\$32,30.

7 PARA ESTUDOS FUTUROS:TEORIA DE SISTEMAS DE CAMADAS ELÁSTICAS

Balbo (2007) define que as misturas asfálticas, além de apresentarem comportamento elastoplástico (a deformação sofrida tem duas componentes; uma de natureza elástica e a outra, de natureza plástica), também possuem comportamento viscoelástico, isto é, apresentam deformações elásticas, dependendo do tempo de aplicação de carga.

As constantes elásticas empregadas habitualmente e mais pesquisadas para a formalização de análises de sistemas de camadas são o módulo de elasticidade ou o módulo de resiliência (a capacidade de o material não resguardar deformações, depois de cessada a ação da carga) dos materiais de pavimentação, bem como seus respectivos coeficientes de Poisson, este para consideração dos efeitos advindos da Lei de Hooke, generalizada.

Um ferramental básico para a análise mais completa das estruturas de pavimentos é a Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas que permite a determinação de estados de deformação e tensões, em vários pontos das camadas. Conhecidos tais esforços, eles podem, então, serem relacionados com modelos de deterioração por fadiga ou por deformação plástica dos materiais de pavimentação.

Diante do exposto sugerimos, para os próximos trabalhos, ensaios de comportamento de pistas de asfalto-borracha com tratamento do pó de borracha, considerando o comportamento de toda a estrutura que compõe uma pista de rolamento, definido como Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas.

8 CONCLUSÕES

Pelo levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e pela avaliação de sua utilização na indústria da construção civil e também a partir do estudo experimental com o intuito de testar as propriedades e a viabilidade econômica destes produtos é que tornamos possível concluir que:

- Com o tratamento superficial do pó de borracha com hidróxido de sódio, houve diminuição da granulometria do pó de borracha, melhorando suas propriedades mecânicas no asfalto.
- A recuperação elástica do asfalto-borracha utilizando pó de borracha tratada com hidróxido de sódio aumentou em 10% quando comparados com asfalto-borracha sem tratamento.
- Os resultados do ensaio de estabilidade à estocagem foram animadores pois, normalmente, os asfaltos-borracha têm problemas de estabilidade à estocagem. Os resultados demonstraram melhora da estabilidade em 42% nos ensaios realizados.
- Os ensaios de envelhecimento demonstraram que o tratamento do pó de borracha com hidróxido de sódio aumentou sensivelmente sua durabilidade.
- O ensaio de variação de massa após o ensaio de envelhecimento demonstrou que a perda de massa dos corpos de prova utilizando pó de borracha tratada com hidróxido de sódio foi 111% melhor quando comparados com os corpos de prova utilizando pó de borracha sem tratamento.
- O ensaio de penetração original após o ensaio de envelhecimento demonstrou boa melhora nos ensaios utilizando pó de borracha tratada com hidróxido de sódio em comparação com os corpos de prova utilizando pó de borracha sem tratamento. A melhora foi de cerca de 15%, ou seja, a perda foi menor.

- O ensaio de recuperação elástica original demonstrou que a utilização do pó de borracha tratada com hidróxido de sódio apresentou recuperação elástica de 115%, quando comparados com corpos de prova antes do ensaio de envelhecimento. Apesar dos bons resultados de 105%, apresentados com asfalto-borracha sem tratamento após o ensaio de envelhecimento, os resultados melhoraram com o tratamento em quase 10%.
- Os ensaios de Ponto de Amolecimento, Penetração, e Viscosidade Brookfield apresentaram pouca variação, quando comparamos o asfalto-borracha com e sem tratamento do pó de borracha, com hidróxido de sódio.
- Houve pequena variação do ponto de fulgor do asfalto-borracha utilizando borracha tratada com hidróxido de sódio quando comparados com o asfalto-borracha sem tratamento. A melhora de 8 °C, ou seja, o aumento do ponto de fulgor de 290 °C do asfalto-borracha sem tratamento para 298 °C do asfalto-borracha com tratamento aumenta a segurança na produção.
- O asfalto-borracha necessita de valores menores de temperatura de usinagem e de compactação, gerando economia em energia e menor deterioração do asfalto-borracha com relação à temperatura.
- A economia gerada na produção do asfalto borracha foi de 4,74% quando utilizamos o asfalto-borracha tratado com hidróxido de sódio, comparando- o com o asfalto-borracha sem tratamento.
- A pequena perda na resistência à compressão nos ensaios Marshall foi compensada pelo grande aumento na durabilidade do asfalto, levando-se em consideração que a principal resistência para o dimensionamento dos pisos de asfalto é a resistência à tração.
- A viscosidade do asfalto borracha tratado é menor quando comparado com o não tratado, gerando um custo de produção menor.
- Houve economia na produção do concreto asfáltico com pó de borracha tratado obtidos pelos ensaios Marshall. A economia foi de 1,67% de ligante asfáltico, porcentagem considerável, se pensarmos numa produção de usinas com milhares de toneladas de asfalto.

- A durabilidade do asfalto-borracha tratado é quatro vezes maior que a durabilidade do asfalto-borracha sem tratamento.
- Constando ainda que a aplicação é imediata, e pode ser aplicada em rodovias brasileiras com o intuito de diminuir os custos e reduzir o impacto ambiental.

O avanço científico desta obra contribui para a preservação do meio ambiente, pela utilização da borracha de pneu na indústria da construção asfáltica e civil, podendo gerar novas oportunidades econômicas, sociais e ajudar a preservar as matérias-primas não-renováveis ainda existentes em grande abundância no Brasil.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“**LANGE’ S HANDBOOK OF CHEMISTRY**”; Mc Graw- Hill, NY, 1979.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 11579** – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da Peneira nº 200 – julho de 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 12042** – Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão – dez. de 1990.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 6474** – Cimento Portland e outros Materiais em pó – Determinação da Massa Específica – outubro de 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão - dezembro de 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 7217** – Agregados - Determinação da Composição Granulométrica – agosto de 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 7271** – Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária – abril de 1982.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 7272** – Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos – março de 1994.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 8522** – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estatística e Diagrama Tensão - Deformação – maio de 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 9776** – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos, por meio de Frasco Chapman – março de 1987.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, RJ **NBR 9779** – Argamassa e Concreto Endurecido – Determinação da Absorção de Água por Capilaridade – Método de ensaio – março de 1987.

AZIZIAN M.F., NELSON P.O., THAYUMANAVAN P., WILLIAMSON K.J., **Environmental impact of highway construction and repair materials on surface and ground waters: Case study: crumb rubber asphalt concrete**, Waste Management, 23, (2003) 719-728.

BALBO J. T.; **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**, Editora Oficina de textos, 2007.

BERTOLLO S.M.; FERNANDES Júnior J.L.; SCHALCHA V.; **“Benefícios de incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos”** 23º Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México, 2002.

BIGNOZZI M. C., SACCANI A., SANDROLINI F.. **“-New Polymer Mortars Containig Polymeric Wastes”**, Part 1- Microstructure and Mechanical Properties”Composites, 2000, Part.A, 31, 97 – 106.

BRULÉ B.; DRUON M.; **La microscopie de fluorescence appliqué à l’observation de bitumes thermoplastiques**. Bulletin dès laboratoires dès Ponts et Chaussées, Paris, LCPC. P 11-14 (1975).

CAO W., **Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process**; Construction and Building Materials 21 (2007) 1011-1115.

CHEUNG, LW, WONG W.G.; LEUNG G.L.M; **“Recent Development of Pavement Engineering Research in Hong Kong”**, Traffic and Transportation Studies, 2010, págs. 1276-1285.

CHING W.C., WING-GUN.W., **Effect of crumb rubber modifiers on high temperature susceptibility of wearing course mixtures**; Construction and Building Materials 21 (2007) 1741-1745.

CHIPPS J.F., DAVISON R.R., GLOVER C.J., **A model for Oxidative aging of Rubber-Modified Asphalts and Implications to performance analysis**, Energy and Fuels (2001), 15; 637-647.

CHIU C.; Lu L.; **A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber**, Construction and Building Materials 21 (2007) 1027-1033.

CHIU T.C., HSU T.H., YANG.F.W., **Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements**, Resources, Conservation and Recycling 52(2008), 545-556.

CHUNG K., KONG Y, **Scrap Tire/Aggregate Composite; Composition and Primary Characterizations for Pavement Material**; Polymer Composites, (2002), 23; n.5.

ELDIN N.N e PIEKARSKI J.A. **“Scrap Tires: Management and economics”**. Journal of Environmental Engineering, 1993, 119(6), 1217-1232.

ELDIN N.N E SENOUCI A.B. **“-Dimensional Finite element Simulations USE OF SCRAP TIRES IN ROAD CONSTRUCTION “**, JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT, 1992, 118(3), 561-576.

ELDIN N.N. E. SENOUCI A .B. “ **Rubber – Tire Particles as Concrete Aggregate RUBBER –** ”.JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, 1993, 5(4), 478-496.

ELDIN N.N. E. SENOUCI A. B. “-**Observations on Rubberized Concrete Behavior**”. CEMENT, CONCRETE AND AGGREGATES, 1993, 15(1), 74-84.

EPPS A. L. **Thermal behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures**. Tese – Berkeley, (1997).

FIORITO J.S.I. A. “**modified Manual de Argamassas e Revestimentos Estudos e Procedimentos de Execução**”, Editora Pini, 1994, 1ª EDIÇÃO.

GAWEL I., STEPKOWSKI R., CZECHOWSKI F., **Molecular Interactions between rubber and asphalt**; Ind. Eng. Chem. Research (2006) 45, 3044-3049.

GRECO J.A.S.; “**Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários**”; tese de doutorado USP- São Carlos, 2004.

JINGHUI LIU, “**Fatigue Life Evaluation of Asphalt Rubber Mixtures Using Semi-Circular Bending Test**”; Advanced Materials Research, vols.255-260(2011), pág.3444-3449

LEE B.I., BURNETT L., MILLER T., POSTAGE B. E CUNEO J. “-**Tyre Rubber/ Cement Matrix Composites**” Journal of Materials Science Letters, 1993, 12(13), 967-968.

LI Z., LI F. E LI J. S. L. “- **Properties of Concrete Incorporating Rubber Tyre Particles**”, Magazine of Concrete Research, 1998, 50(4), 297-304.

LIMA C.S.; TOMÉ L.G.A.; SOARES J.B.; SOARES S.A.; “**Efeitos da borracha de pneu na viscosidade do ligante asfáltico**”, 18º Encontro do Asfalto, 2006.

MOMM L., DUMKE M.P., LEONETTI F.B., OTTO G.G., **Estudo do desempenho de Concreto Asfáltico drenante modificado com Asfalto-Borracha em sua composição**; 17º Encontro do Asfalto, Rio de Janeiro (2004).

MONEA R.M.J., **Estudo da viabilidade de incorporação de borracha moída de pneus em asfalto para impermeabilização na construção civil**, dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2006).

N. A. ALI, A. D. AMOS E M. ROBERTS. **“-Use of Ground Rubber Tyres In Portland cement Concrete”**, Concrete 2000_ Economic and Durable Construction Thorough Excellence, Proceedings of the International Conference, University of Dundee, Scotland, UK, 7-9 September, 1993, vol.2,379-390.

NAVARRO F.J.; Partal P.; MARTÍNEZ-Boza F.;GALLEGOS C.; **“Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen”**; Energy and Fuels, 19 (2005), 1984-1990.

NAVARRO F.J.; Partal P.; MARTÍNEZ-Boza F.;GALLEGOS C.; **Thermo –rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber modified bitumens**; Fuel, 83 (2004), 2041-2049.

NEWCOMB D.E.; STROUP-GARDINER M.; KIM J.R.; ALLEN B.; WATTEN HOFFER-SPRY J; **Polymerized crumb rubber modified mixtures in Minnesota**, p.181, (1994).

ODA S., NASCIMENTO L.A.H., EDEL G., **Aplicação de asfalto-borracha na Bahia**; 3º Congresso Brasileiro Petróleo e Gás (2005).

OTHMAN A. M., **Fracture Resistance of Rubber-modified Asphaltic Mixtures Exposed to High-Temperature Cyclic Aging**; Journal Of Elastomers and Plastics (2006); 38; 19.

PEREIRA,P.A..A : PAIS, J.C: TRICHÊS, G. ; FONTES, L. P. T. L, **“-Evaluating Permanent Deformation Evaluating Permanent Deformation in Asphalt Rubber Mixtures”**, Constrution.

RAGHAVAN D. **“- Study of Rubber – Filled Cementitious Composites”**, Journal of Applied Polymer Science, 2000, vol. 77,934-942.

Road Research Laboratory – RRL, **Bituminous materials in Road construction**, Department of scientific and industrial research, London (1962).

RUAN Y., DAVISION R. R., e GLOVER C.J. **The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts**. Fuel 82 (2003) 1763-1773.

RUAN Y., DAVISON R.R., GLOVER. C.J., **Oxidation and viscosity Hardening of Polymer-Modified Asphalts**, Energy and Fuels (2003), 17; 991-998.

SANTOS E.F.; FEITOSA J.P.A.; SOARES J.B.; LEITE L.F.M.; **“Caracterização de borracha de pneu moído e de asfalto modificado oriundo de petróleo brasileiro”**; 2º Congresso Brasileiro de P & D em petróleo & Gás; Rio de Janeiro, 2003.

SEGRE N., JOEKES I.; **“Use of tire rubber particles as addition to cement paste”**. Cement and Concrete Research 30, 2000, 1421-1425.

SEGRE N.. **“-Reutilização de Borracha de Pneus Usados, Como Adição em Pasta de Cimento”**, Tese de Doutorado, UNICAMP, 1999.

SPECHT L. P. **“Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borrachas recicladas de pneus”**. Tese de Doutorado Na UFRGS,2004.

SPECHT L.P.; **“Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus”**, tese de doutorado apresentado na UFRGS, 2004.

WANG J.C., ZENG X., MULLEN R.L., **Three-Dimensional Finite element Simulations of Ground Vibration Generated By High-Speed Trains And Engineering Countermeasures** , Journal of Vibration and Control 3005; 11; 1437 (2005).

WU H.C., LIM Y,M. E LI V.C.. **“-Application of Recycled Tyre cord in Concrete for Shirinkage Crack Control”**. Journal of materials Science Letters, 1996. 15, 1828-1831.

YELDIRIM, Y. **“Polymer Modified asphalt binders: Construction and Building Materials 21 (2007) 66-72**