



**FATEC-SP**

**Faculdade de Tecnologia de São Paulo**

**Departamento de Transporte e Obras de Terra**

**RENATA MAYUMI KUME**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM  
MARSHALL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM EMPREGO  
DE BORRACHA DE PNEU MOÍDA PELO PROCESSO ÚMIDO  
E SECO**

**São Paulo  
2013**

**RENATA MAYUMI KUME**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM  
MARSHALL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM EMPREGO  
DE BORRACHA DE PNEU MOÍDA PELO PROCESSO ÚMIDO  
E SECO**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de São Paulo como parte dos  
requisitos para a obtenção do grau de  
Tecnólogo em Movimento de Terra e  
Pavimentação

Orientador: Prof. Dr. Edson de Moura

**São Paulo  
2013**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada seria possível e não estaríamos aqui reunidos, desfrutando, juntos, destes momentos que nos são tão importantes.

Dedico à minha mãe que me deu a vida com amor, ao meu irmão, cunhada, ao meu namorado, madrinha, tio, tias, primos, primas e amigos pelo incentivo, cooperação e apoio, em especial, ao meu pai; que não está mais entre nós, mas acredito que está me ajudando muito, e ao meu lado sempre.

Dedico também ao professor e orientador, Edson de Moura, à professora Arisol Simone Yamamoto, e aos meus colegas, Deise e Bruno, pelo apoio, incentivo, ajuda, e orientação nesse trabalho de conclusão de curso.

E com a graça de Deus, esta etapa de minha vida está sendo vencida e terminarei este trabalho de conclusão de curso de tecnologia de construção civil com honra.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus,  
Pela força espiritual para a realização desse trabalho.

Aos meus pais Massaru e Jane, pelo eterno orgulho de nossa caminhada, pelo apoio, compreensão, ajuda, e, em especial, por todo carinho ao longo deste percurso, mesmo que espiritual.

Ao meu irmão e cunhada, Leonardo e Camila,  
Ao meu namorado Felipe,  
Pelo carinho, compreensão e pela grande ajuda.

Aos meus amigos e colegas de curso,  
Pela cumplicidade, ajuda e amizade.

Ao professor doutor, Edson de Moura,  
Á professora Arisol Simone Yamamoto,  
E aos colegas, Deise e Bruno,  
Pela orientação deste trabalho, paciência e ajuda.

## RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo comparar os parâmetros Marshall: volume de vazios, vazios do agregado mineral (VAM), vazios cheios de betume (VCB) e a relação betume vazios (RBV) e também fazer um comparativo com base na resistência à tração por compressão diametral (RT) entre dois tipos de misturas asfálticas, de mesma distribuição granulométrica, faixa IVb-IA com adição de borracha de pneu moído por dois processos: úmido e seco. O processo úmido contempla o uso da borracha incorporado ao ligante asfáltico já no processo seco a borracha é adicionada à mistura asfáltica de forma a compor a distribuição granulométrica. Serão realizados dois ensaios de dosagem Marshall, um ensaio com emprego do ligante asfáltico modificado por borracha, e outra dosagem com emprego de ligante asfáltico convencional CAP 50/70. Os resultados apontam que o processo de dosagem com emprego da borracha pelo processo úmido mostrou-se mais satisfatório face às especificações do DNIT.

Palavras-Chave: Asfalto-borracha. Pneu moído. Misturas asfálticas. Marshall.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Alteração da estrutura química da borracha pelo processo de vulcanização .....	4
Figura 2.2 – Estrutura do pneu .....	5
Figura 2.3 – Lixo jogado nas ruas e terrenos. Falta de respeito! .....	7
Figura 3.1 – Cimento asfáltico de petróleo – (CAP) .....	12
Figura 3.2 – Ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído – AMB.....	13
Figura 3.3 – Certificado do CAP 50/70 .....	14
Figura 3.4 – Certificado do AMB.....	15
Figura 3.5 – Lavagem da amostra na # > 4,76 mm .....	16
Figura 3.6 – Medição da massa de brita 1 para ensaio .....	16
Figura 3.7 – Imersão da amostra de brita 1 em água .....	16
Figura 3.8 – Pesagem hidrostática .....	16
Figura 3.9 – secagem superficial da água na superfície do agregado brita 1 .....	17
Figura 3.10 – Medição da Msss.....	17
Figura 3.11 – lavagem do pedrisco .....	18
Figura 3.12 – Pesagem da amostra após secagem em estufa .....	18
Figura 3.13 – Pesagem do picnômetro vazio e limpo com a tampa .....	19
Figura 3.14 – Colocação do material no picnômetro.....	19
Figura 3.15 – Recobrimento com água destilada a amostra para fervura.....	19
Figura 3.16 – Picnômetros em banho, após fervura, para estabilização da temperatura .....	19
Figura 3.17 – Medição da temperatura .....	20
Figura 3.18 – Medição da massa do conjunto: picnômetro + material + água.....	20
Figura 3.19 – Medição da massa do picnômetro + água.....	20
Figura 3.20 – Frasco com querosene com amostra de fíler sendo adicionada .....	21
Figura 3.21 – Frasco com amostra de fíler adicionada e com temperatura estabilizada.....	21
Figura 3.22 - Peneiramento. ....	22
Figura 3.23 – Faixa III DER-PR - ES-P 22/91 .....	23
Figura 3.26 – Cal CH-I.....	24
Figura 3.24 – Estufa 180oC.....	24
Figura 3.27 – Temperatura do ligante asfáltico AMB .....	24
Figura 3.28 – Adição da massa de ligante asfáltico.....	25
Figura 3.29 – Medição da massa de ligante asfáltico diretamente sobre a balança.....	25

Figura 3.30 – Mistura sobre o fogo.....	25
Figura 3.31 – Transferência da mistura asfáltica para estufa.....	25
Figura 3.32 – Colocação da mistura asfáltica no molde Marshall.....	26
Figura 3.33 – Disposição dos moldes com os corpos-de-prova Marshall após compactação..	26
Figura 4.1 – Planilha de dosagem Marshall pelo processo úmido .....	28
Figura 4.2 – Planilha de dosagem Marshall pelo processo seco .....	29
Figura 4.3 – Volume de vazios x teor de ligante asfáltico .....	29
Figura 4.4 – Relação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral.....	31

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Considerações Iniciais .....	1
1.2	Objetivos gerais.....	1
1.3	Justificativa .....	2
1.4	Estrutura do trabalho .....	3
2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	Pneu .....	4
2.2	Impacto ao meio ambiente.....	6
2.3	Processos de Incorporação da Borracha à Mistura Asfáltica .....	8
2.4	Histórico da adição de borracha de pneus em materiais asfálticos.....	8
2.5	Vantagens Previstas.....	9
2.5.1	Método de Marshall .....	9
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	12
3.1	Ligante asfáltico .....	12
3.2	Agregados .....	15
3.2.1	Determinação da Absorção, Massa Específica Real e Aparente – Agregado Graúdo (Procedimento de Ensaio – DNER-ME 195/97 e ABNT NBR 6458/84).....	16
3.2.2	Massa Específica do Agregado Miúdo (Procedimento de Ensaio – DNER-ME 084/95) 18	
3.2.3	Determinação da Massa Específica Real – Material Finamente Pulverizado (Procedimento de Ensaio – DNER-ME 085/94 e ABNT NM 23/2001) .....	20
3.3	Análise granulométrica.....	22
3.4	Dosagem Marshall.....	24
4	RESULTADOS .....	27
4.1	Composição granulométrica .....	27
4.2	Massas específicas e absorção .....	27
4.3	Ensaio Marshall .....	28
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	32
5.1	Conclusão .....	32
5.2	Comentários .....	32
	REFERÊNCIAS .....	33



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, tem-se observado, principalmente por parte da mídia, esforços na conscientização da população na utilização de materiais que sejam recicláveis. Não diferentemente, registra-se na área de pavimentação a necessidade de se utilizar materiais também de características renováveis, em todos os segmentos, mas, principalmente no emprego de materiais na constituição das camadas do pavimento.

Aplicação de material reciclado de construção e demolição (RCD) em camadas de base e sub-base de pavimentos destinados a baixo volume tráfego, a reciclagem de camada asfáltica e redosagem dessas com materiais virgens e reaplicação como camada de base e/ou rolamento tem-se mostrado uma prática corrente. Diversos são os tipos de materiais empregados em pavimentação que podem ser considerados como materiais de fontes renováveis. Dentre esses, destaca-se o uso de borracha de pneu moído como agente melhorador características reológicas do ligante asfáltico.

A forma de se empregar a borracha de pneu moído na mistura asfáltica divide-se em das formas: processo seco, em que a borracha é adicionada à mistura asfáltica como parte da distribuição granulométrica e o processo úmido a borracha é incorporada ao ligante asfáltico modificando-o. No processo seco a massa de borracha adicionada é da ordem de 3% em relação a massa de mistura asfáltica, já no processo úmido a massa de borracha adicionada é da ordem de 18% em relação a massa de ligante asfáltico.

Salienta-se que, o uso de materiais alternativos como: (RCD), escórias de aciaria ou de alto forno, ou mesmo a borracha de pneu moído, isolados ou mesmo combinados com outros materiais são utilizados em pavimentação, pelo fato desses materiais apresentarem desempenhos satisfatórios, de forma que, não é comprometido o desempenho estrutural e/ou funcional via.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

O teor de ligante asfáltico de projeto de uma dada mistura asfáltica é obtido através de diversos métodos de dosagem: *Duriez*, *Superpave*, método francês e o método de dosagem Marshall, dentre outros, sendo o método Marshall o mais difundido no rodoviarismo

brasileiro e tem como principal base de sua determinação o volume de vazios que mistura asfáltica apresenta após a compactação da mistura.

Tem-se observado que esse teor muda em função da composição granulométrica e principalmente quanto ao tipo de ligante asfáltico. O uso de ligantes modificados por borracha, normalmente, apresenta um teor com cerca de 0,5% acima do teor de uma mistura asfáltica usinada com ligante asfáltico convencional ou modificado por polímero Estireno-Butadieno-Estireno tendo a sigla em inglês de SBS. A alteração da granulometria com adição de borracha pelo processo seco resulta em alterações significativas a estrutura granulométrica, daí, o teor de ligante necessário à mistura para que essa atenda as exigências de projeto torna-se um desafio para os técnicos rodoviários.

A avaliação desses parâmetros considerando os dois processos de dosagem: adição de borracha: pelo processo úmido e seco, possibilitaria uma escolha adequada, face ao teor de ligantes e, por conseguinte, ao custo de mistura asfáltica.

Portanto, o objetivo principal é, comparar os parâmetro Marshall entre dois tipos de misturas asfálticas, de mesma distribuição granulométrica, faixa IVb-I.A, com adição de borracha de pneu moído por dois processos: úmido e seco.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

O estudo justifica-se visto que a opção do uso de borracha de pneu moído em mistura asfáltica atualmente utilizado é basicamente praticada pelo processo úmido. A quantidade de borracha empregada nesse processo é cerca de 18% sobre a massa de ligante asfáltico. A massa de ligante asfáltico referente a mistura asfáltica é cerca de 5%, logo tem-se uma quantidade na ordem de 9 kg de borracha de pneu moído para cada tonelada de mistura asfáltica produzida.

A possibilidade de empregar a borracha de pneu moído pelo processo seco tem-se a estimativa de utilizar cerca de 3% no mínimo na produção. Isso resultaria em cerca de 30 kg para cada tonelada de mistura asfáltica produzida.

Outro fato a ser considerado é que o custo do ligante asfáltico modificado por borracha é superior ao custo do ligante asfáltico convencional, o que tornaria o custo final da mistura asfáltica com emprego de borracha de pneu moído de maior custo.

## **1.4      *ESTRUTURA DO TRABALHO***

A seguir, uma amostragem dos capítulos que desenrolaram neste trabalho:

### **Capítulo 1 – Introdução**

Capítulo de apresentação do trabalho, onde é abordado a ideia central do trabalho, os objetivos gerais, a justificativa e a própria estrutura do trabalho.

### **Capítulo 2 – Pesquisa bibliográfica**

Nesse capítulo procurar-se-á apresentar um breve relato sobre: a descoberta da borracha, o pneu, descarte, processos alternativos do uso do pneu, ligante asfáltico, modificação do ligante asfáltico, dosagem de mais pelo método Marshall.

### **Capítulo 3 – Materiais e Métodos**

Serão apresentados os materiais e os métodos utilizados na pesquisa.

### **Capítulo 4 – Resultados**

Neste capítulo traz os resultados dos ensaios e comentários pertinentes sobre os mesmos.

### **Capítulo 5 – Conclusão e recomendações**

Apresentação da conclusão do trabalho e recomendações para trabalhos futuros

### **Referências**

Apresentação da relação de referências que será utilizada neste trabalho.

## 2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo relata-se a descoberta da borracha, surgimento do pneu, processos de incorporação da borracha ao asfalto e à mistura asfáltica, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas e pesquisas sobre o uso da borracha como agente modificador das propriedades reológicas do ligante asfáltico. Contempla-se também nesse capítulo vantagens ecológicas e sociais previstas para essa incorporação de borracha no asfalto.

### 2.1 PNEU

A alteração da estrutura química da borracha pela conversão das moléculas do polímero independente, numa rede tridimensional, como mostrado na figura 2.1, onde se ligam, resultando-se, assim, um material menos viscoso e com propriedades mecânicas superiores, aumentando a elasticidade e diminuindo a plasticidade dos compostos. Segundo Gomes (2008) esse processo de alteração da estrutura química da borracha foi criada por Charles Goodyear e dá-se o nome de vulcanização.

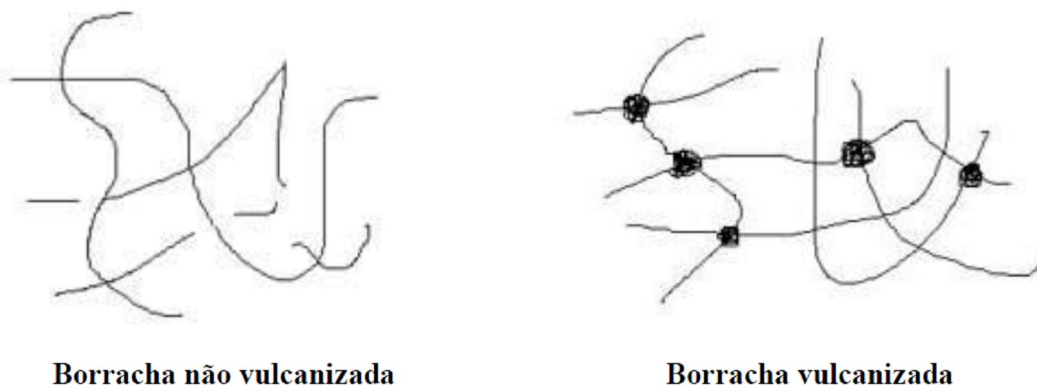


Figura 2.1 – Alteração da estrutura química da borracha pelo processo de vulcanização

Fonte: GOMES (2008)

O pneu se tornou fundamental para a população, pois proporcionou conforto e agilidade e melhorou significativamente a segurança dos usuários de veículos automotores. Mas, segundo Gomes, (2008), após a serventia dos pneus o descarte inadequado desses é uma grande preocupação, tanto para grandes cidades como também para locais que não possuem grandes frotas de veículos. Esse descarte inadequado traz um grande impacto para o meio ambiente, pois um pneu demora cerca de 600 anos para decompor em condições normais na natureza.

Na Figura 2.2 é apresentada a estrutura de um pneu e descreve-se a seguir as partes constituintes desse.



Figura 2.2 – Estrutura do pneu

Fonte: MICHELIN (2012)

1. **Revestimento de borracha interior:** camada do interior do pneu e faz a função de câmara de ar
2. **Carcaça:** estrutura flexível formada por filamentos (têxteis ou de aço) engastados na borracha, que formam arcos e se enrolam no aro do talão do pneu.
3. **Zona baixa:** tem o papel de transmitir o binário motor (potência do veículo) em aceleração e travagem da jante para a zona de contato com o solo.
4. **Aro de talão:** é a parte do pneu que se fixa e ajusta à jante. É formado por um filamento de aço inextensível de forma e proporção variável segundo a dimensão e tipo do pneu.
5. **Flanco:** é uma zona compreendida entre a banda de rolamento e os talões do pneu. O flanco representa a altura do pneu.
6. **Lonas de topo:** estão constituídas por filamentos metálicos revestidos de borracha. Posicionam-se sobre a carcaça formando uma cintura que garante a resistência mecânica do pneu à velocidade e à força centrífuga.
7. **Banda de rolamento:** é a parte do pneu que está em contato com o solo e é formada por uma camada de borracha que se realizam várias ranhuras que dão origem ao piso ou escultura. Parte Reutilizada do Pneu

A parte do pneu mais reutilizada em misturas asfálticas é a banda de rodagem, pois essa parte do pneumático possui maior quantidade de borracha natural. Para a borracha ser incorporada ao asfalto pelo processo úmido, é necessário que ela passe antes por um beneficiamento. Primeiramente, separam-se os pneus inservíveis onde os talões já são retirados. Posteriormente, é retirada por separação, a borracha vulcanizada dos outros componentes. Esses pneus são cortados em lascas e separados em peneiras. As lascas são moídas depois submetidas a vários processos de cominuição. Finalmente, produto é refinado em moinhos para a obtenção de uma manta uniforme resultando em grânulos de borracha.

A borracha de pneus de caminhões é mais apropriada para a modificação dos ligantes asfálticos, pois possui 27% de borracha natural, contra 5% dos pneus de automóveis (Tabela - 2.1).

Tabela 2.1 – Composição química de pneus de automóveis e caminhões

Componentes (%)	Banda de Rodagem		Pneus Inteiros	
	Automóvel	Caminhão	Automóvel	Caminhão
Negro de Fumo	32,0	30,0	31,0	28,5
Borracha Sintética	37,0	23,0	26,0	21,0
Borracha Natural	5,0	27,0	20,0	33,0
Solúvel em Acetona	21,0	16,0	19,0	12,5
Sílica	5,0	4,0	5,0	5,0

Fonte: HEIZTMAN (1992)

Na composição dos pneus, diversos materiais podem ser detectados como: negro de fumo, borrachas nas condições sintética e natural, detecta-se também solúveis em acetona e sílica.

## 2.2 IMPACTO AO MEIO AMBIENTE

O pneu, devido às suas características físicas é um produto que, após o sua principal serventia, revela-se como um material de difícil descarte. Devido a isso, é comum observarmos o seu descarte em lugares inadequados (beira de estrada, lixões, etc...) o que pode se transformar em criadouros de vetores transmissores de doenças (como a dengue), contaminar o lençol freático com óleo, dentre outros tipos de danos. Além de contaminação por óleo ocasionado pela decomposição do pneu, caso esse pneus fiquem expostos ao ar podem ocasionar incêndios de grande dimensões, liberando com a queima fumos altamente

tóxicos. Quando descartados irregularmente em aterros sanitários, devido a constituição demoram cerca de 500 anos para se decomporem além de contaminar o lençol freático. Caso permaneçam em locais que futuramente deverão ser submetidos a algum tipo de compactação, podem dificultar a densificação do solo diminuindo a vida útil dos aterros (BERTOLLO, 2002).

Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 258 de 26 de agosto de 1999, considera-se que os pneumáticos inservíveis, abandonados ou dispostos inadequadamente (Figura 2.3), constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. E que uma parte dos pneumáticos novos, depois de usados, pode ser utilizada como matéria prima em processos de reciclagem. Assim sendo a Resolução Nº 258 definiu:

Art 1º As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional. Na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Portanto, a Resolução do CONAMA Nº 258, prescreve que o produtor deve direcionar e destinar um fim adequado ao seu produto, de modo a não comprometer o ecossistema local (CONAMA, 2002).



Figura 2.3 – Lixo jogado nas ruas e terrenos. Falta de respeito!

Fonte: DEROSSO (2010)

### **2.3        *PROCESSOS DE INCORPORAÇÃO DA BORRACHA À MISTURA ASFÁLTICA***

A borracha pode ser incorporada no asfalto através de dois processos: o úmido e o seco. No processo úmido a borracha é incorporada no asfalto através da adição da borracha moída no ligante asfáltico, já no processo seco a borracha é incorporado no asfalto em partículas maiores, substituindo parte dos agregados pétreos.

São sobre esses dois processos de incorporação da borracha que esse trabalho é focado. Foram feitas duas dosagens Marshall e por comparação com base nos parâmetros resultantes da dosagem pode-se avaliar a qualidade das duas misturas.

### **2.4        *HISTÓRICO DA ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM MATERIAIS ASFÁLTICOS***

Foi na década de 40 que se iniciou a história da adição de borracha de pneus em materiais para a pavimentação com a Companhia de Reciclagem de Borracha, U.S. *Rubber Reclaiming Company*.

O mesmo autor considerado pai do sistema asfalto-borracha (*asphalt rubber*) nos Estados Unidos, iniciou uma pesquisa com o intuito de desenvolver, com a incorporação de borracha moída, um material “altamente elástico” para ser aplicado na manutenção da superfície de pavimentos asfálticos. Essas pesquisas resultaram em um produto composto de ligante asfáltico e 25% de borracha de pneu moído, na temperatura de 190°C, durante 20 minutos, para ser utilizado em remendos. Esse produto foi denominado *band-aid*. A primeira aplicação foi feita em uma via na cidade de Phoenix, onde se pode verificar que, após seis anos, o pavimento não apresentava a formação de trincas por reflexão. A partir da década de 90, a adição de borracha de pneus usados em misturas asfálticas passou a ser considerada também uma alternativa excelente para diminuir os problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos. Até o início da década de 90 já existiam cerca de 16.000 quilômetros de rodovias construídas com o asfalto modificado por borracha (AMB).

No Brasil, o início da incorporação da borracha de pneu moída em asfaltos convencionais somente se iniciou em 1995, e o primeiro trecho de asfalto-borracha, com aproximadamente dois quilômetros, só foi construído em agosto de 2001 no estado do Rio Grande do Sul.



Em outubro de 2001, a Concessionária Rodonorte foi a segunda empresa a aplicar o asfalto-borracha, e em 2003 foi a primeira empresa a aplicar o asfalto-borracha em larga escala (SOARES, 2008).

Em 2002 a Greca Asfaltos, foi a pioneira na aplicação de granulometria descontínua (tipo *gap-graded*) em asfalto-borracha. Este tipo de mistura asfáltica apresenta uma curva granulométrica descontínua que exige a utilização de um ligante modificado por borracha de pneus moída de alta viscosidade, em contrapartida, que imprime maior segurança ao tráfego, principalmente em dias de chuva (CORTEZ, 2011).

## **2.5 VANTAGENS PREVISTAS**

Visando o aspecto ecológico e social, deve-se atentar para o fato de que o petróleo, e por consequência o asfalto, é uma fonte não renovável de energia. É listado abaixo duas vantagens relevantes quanto ao uso da borracha de pneu moído na incorporação do ligante asfalto:

1. Implantação de empresas especializadas no segmento de reciclagem de pneus inservíveis de forma convertê-los em produtos para serem incorporados ao ligante asfáltico e,
2. Redução da demanda de petróleo (asfalto), por dois motivos:
  - a) Substituição de parte do asfalto por borracha moída de pneus e;
  - b) Maior durabilidade que será alcançada na vida útil de nossas estradas.

Dentro do aspecto ecológico e social tem-se ainda a diminuição nos focos de criação de vetores transmissores de doenças, na diminuição da poluição visual com desassoreamento de rios, lagos e baías e ainda redução nos riscos de incêndios incontroláveis.

### **2.5.1 Método de Marshall**

O método de dosagem Marshall foi desenvolvido no Mississippi Highway Department por Bruce Marshall em 1939. O United States of American Corps of Engineering (USACE) começaram a estudar em 1943 o desenvolvimento de um equipamento portátil para

moldagem de corpos-de-prova de misturas asfálticas destinadas a pistas de aeroportos. Essa necessidade se deu devido ao aumento da carga de roda de aeronaves durante a II Guerra Mundial. Com o aumento da pressão dos pneus e, por conseguinte, o aumento da pressão de contato, foi necessário a busca de um método de dosagem de misturas asfálticas mais eficiente que fizesse frente a essa nova necessidade. O USACE iniciou testando o equipamento proposto por Bruce Marshall e em uma série de experimentos de campo e de laboratório (MOURA, 2010).

O mesmo autor ainda comenta que diversos tipos de misturas asfálticas foram testadas, variando-se os esforços de compactação na tentativa de produzir densidades<sup>1</sup> em laboratório similares àquelas encontradas em campo de pistas-teste submetidas a simuladores de tráfego de aeronaves. A compactação de laboratório envolveu, diferentes tipos de soquete, diferentes tipos de combinação de números de golpes por face e/ou carga de compressão estática, diversos tipos de sapatas dos soquetes em tamanho e forma, e diferentes moldes quanto à forma e materiais. O objetivo da compactação de laboratório era o de adotar um procedimento, que envolvesse um esforço mínimo de compactação e de tempo, e que pudesse selecionar um teor ótimo de ligante asfáltico.

Em pista-teste, submetidas a um gama de cargas variando desde 6,8 t até 27,2 t e pressões de pneus desde 3,5 kgf/cm<sup>2</sup> até 14 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente, para um número de 3500 coberturas, não mostrou um aumento significativo na **densidade** de misturas asfálticas após a ação tráfego, mostrando-se indiferente à carga de roda. Usando os resultados de campo, os seguintes limites foram estabelecidos para projetos de misturas asfálticas, (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Projeto Marshall para 50 para misturas asfálticas

Parâmetros de Ensaio	Teor de ligante asfáltico		Limites	
	concreto asfáltico	Areia asfalto a quente	concreto asfáltico	Areia asfalto a quente
Estabilidades (N)	Pico	Pico	2220	2200
Fluência (0,25mm)	-	-	5,0	5,0
Peso espec. Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Pico	Pico	-	-
Volume de vazios (%)	4	6	3-5	5-7
RBV (%)	80	70	75-85	65-75

Fonte: MOURA (2010)

<sup>1</sup>A designação no texto corresponde ao peso específico aparente, que por facilidade, está sendo chamado por **densidade**.

Ainda em Moura (2010) registra-se que no final da década de 40 e início da década de 50 o tamanho e o peso das aeronaves continuavam aumentando, as pressões dos pneus chegaram a ordem de  $14 \text{ kgf/cm}^2$ . Novamente o USACE começou a estudar um processo de compactação mais forte, ou mais intenso, que pudesse correlacionar com a densificação na mistura asfáltica causada por essas novas cargas das aeronaves. Assim, novos critérios de projetos para CBUQ (concreto asfáltico) foram estabelecidos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Projeto Marshall para 75 golpes para CBUQ - Critério de compactação forte

Parâmetros de ensaio	Teor de ligante asfáltico	Valores Limites
Estabilidades (N)	Pico	4440 (mín)
Fluência (0,25mm)	-	4 (máx)
Peso espec. do agregado (g/cm <sup>3</sup> )	Pico	-
Peso espec. Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Pico	-
Volume de vazios (%)	5	4-6
RBV (%)	80	75-82

Fonte: MOURA (2010)

Em resumo, o desenvolvimento do procedimento de dosagem de misturas asfálticas Marshall apresenta dois parâmetros importantes para projeto que devem ser atendidos em campo: o teor de ligante asfáltico e a **densidade** da mistura asfáltica compactada. Já em laboratório, as características importantes são a seleção da energia de compactação compatível com a densificação induzida pela ação do tráfego, para a produção de corpos-de-prova que, através dos parâmetros de ensaios Marshall, aponte o teor ótimo de ligante asfáltico, resultando em uma mistura asfáltica com desempenho satisfatório quando submetidas à ação do tráfego.

Roberts *et al.* (1996) elencam os principais objetivos que uma mistura asfáltica deve apresentar:

- Resistência à deformação permanente em trilha de roda;
- Resistência à fadiga;
- Resistência ao trincamento a baixas temperaturas;
- Durabilidade;

- Resistência ao dano causado pela água;
- Resistência ao polimento (derrapagem); e,
- Trabalhabilidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Procurar-se-á abordar nesse capítulo a descrição dos materiais utilizados nesse estudo e também apresentar os métodos utilizados de caracterização desses materiais.

#### 3.1 *LIGANTE ASFÁLTICO*

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é o produto de coloração marrom escura a preta resultante da destilação do petróleo (borra de petróleo). Apresenta-se com características semissólidas em temperatura ambiente e que com aquecimento muda sua consistência de forma que sua viscosidade diminui significativamente. É impermeável à água, visco-elástico, pouco reativo, com propriedades adesivas e termoplásticas. (BERNUCCI *et al.*, 2007)

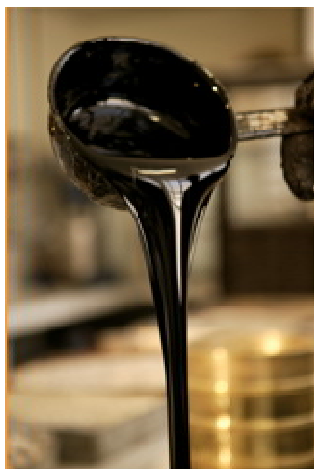


Figura 3.1 – Cimento asfáltico de petróleo – (CAP)

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2007)

Nesse estudo foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos, ambos os dois foram fornecidos pela Greca Asfaltos.

Um denominado de convencional CAP 50/70 que foi utilizado na dosagem da mistura asfáltica pelo processo seco e que apresenta aspecto da Figura 3.1. Sua especificação conforme apresentado na Figura 4, atende às exigências para esse tipo de ligante asfáltico da especificação: resolução nº 19, de 11 de julho de 2005 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Já o ligante asfáltico que teve a borracha incorporada, denominado de ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído (AMB) tem em sua formulação cerca de 18% de borracha moída incorporada e seu aspecto está apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído – AMB

Fonte: MOURA (2010)

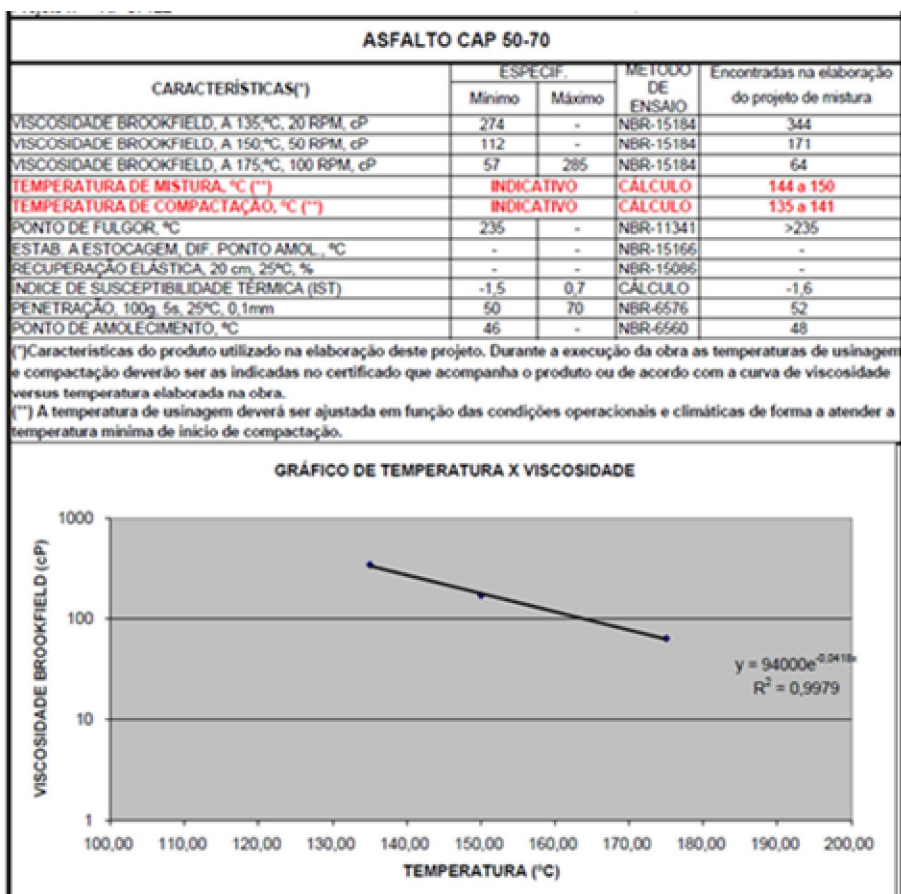




Figura 3.3 – Certificado do CAP 50/70

Fonte: MOURA (2010)

O certificado do AMB utilizado nesse trabalho está apresentado na Figura 3.3 e 3.4, atendendo a resolução nº 39, de 24 de dezembro de 2008 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

**ASFALTO BORRACHA - ECOFLEX Pave B**

**Cuidados de Aplicação do Produto ECOFLEX Pave:**

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

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

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

**CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO**

DATA	24/08/2012
PRODUTO	ECOFLEX B
CLIENTE	LEÃO ENGENHARIA/ USP
OBRA	SÃO PAULO - SP
AMOSTRA NÚMERO	0035-12

ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1mm	NBR - 6576	30 a 70	50
Ponto de Amolecimento, °C	NBR - 6560	55 (mínimo)	58
Recuperação Elástica, %	NLT 329 / 91	50 (mínimo)	70
Ponto de Fulgor, °C	NBR - 11341	235 (mínimo)	> 240
Densidade Relativa, 25°C/25°C	NBR - 6296	Anotar	1,030
Visc. Brookfield a 175°C, 3P, 5p 3, 20 rpm	NBR - 15529	800 - 2000	1630

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

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

\* Esta especificação atende a Resolução 38 da ANP que regulamenta este tipo de produto.

Figura 3.4 – Certificado do AMB

Fonte: MOURA (2010)

### 3.2 AGREGADOS

Foram utilizados os agregados: brita 1, pedrisco e pó de pedra, também foi empregado a cal CH-I. Inicialmente, foram realizados os ensaios de massa específica real ( $\gamma_r$ ) e aparente ( $\gamma_{ap}$ ) e absorção (Abs) dos três materiais da brita 1 e massa específica real do pedrisco e do pó de pedra.

### **3.2.1 Determinação da Absorção, Massa Específica Real e Aparente – Agregado Graúdo (Procedimento de Ensaio – DNER-ME 195/97 e ABNT NBR 6458/84)**

O procedimento consiste basicamente medir o volume de uma dada amostra de agregado graúdo (material # 4,76 mm) com auxílio de pesagem hidrostática. Primeiro, lavamos a amostra de agregados graúdos sob a peneira nº4 (4,76mm de abertura) (Figura 3.5) em seguida secamos a amostra na estufa (105 a 110°C) até a constância de peso e mediu-se a massa para ensaio (Figura 3.6).



Figura 3.5 – Lavagem da amostra na # > 4,76 mm

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.6 – Medição da massa de brita 1

para ensaio

Fonte: KUME (2013)

Após a secagem e medição da massa os agregados de brita são colocados imersos em água por um período de 24 h (Figura 3.7). Segue-se para a medição da massa imersa ( $M_i$ ) (pesagem hidrostática) da amostra de brita (Figura 3.8)



Figura 3.7 – Imersão da amostra de brita 1 em

água

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.8 – Pesagem hidrostática

Fonte: KUME (2013)



Dando sequência, o material foi retirado do cesto de medição imerso e foi seco em um pano ligeiramente úmido (Figura 3.9) e após foi medida a massa com superfície seca saturada (M<sub>ss</sub>) (Figura 3.10).



Figura 3.9 – secagem superficial da água na superfície do agregado brita 1

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.10 – Medição da M<sub>ss</sub>

Fonte: KUME (2013)

Como última etapa do processo da determinação da massa específica aparente e real e absorção do agregado gráudo, o agregado foi colocado em estufa (105 a 110°C) até constância de peso (M<sub>s</sub>) e com foram determinados com a equações 1 a massa específica real, com a equação 2 a massa específica real e com a equação 3 a absorção.

$$\gamma_r = M_s / (M_{ss} - M_i) \quad (1)$$

$$\gamma_{ap} = M_s / (M_s - M_i) \quad (2)$$

$$Abs = (M_s - M_{ss}) / M_s \quad (3)$$

Onde:  $\gamma_r$  = massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\gamma_{ap}$  = massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)  
M<sub>s</sub> = massa seca (g)  
M<sub>ss</sub> = massa superfície seca saturada (g)  
M<sub>i</sub> = massa imersa (g)

### 3.2.2 *Massa Específica do Agregado Miúdo (Procedimento de Ensaio – DNER-ME 084/95)*

Nesse procedimento, devido a dimensão do material a ser testado é empregado o picnômetro de 500 ml. O pedrisco (material que apresenta maior quantidade de material na fração de interesse) foi lavado nas peneiras n. 4 (abertura 4,76 mm) e n. 200 (abertura 0,075 mm) e fração separada para este teste foi a retida na peneira n. 200 e retida na peneira n. 4 (Figura 3.11) em seguida a amostra foi seca em estufa (105 a 110°C) até constância de peso (Figura 3.12).



Figura 3.11 – lavagem do pedrisco

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.12 – Pesagem da amostra após secagem em estufa

Fonte: KUME (2013)

Normalmente, são realizadas duas determinações simultaneamente com dois picnômetro. Mede-se a massa dos picnômetro vazios e limpos com as respectivas tampas (A) (Figura 3.13), em seguida, coloca-se o material seco no interior dos picnômetro e mede-se a massa do picnômetro + material (B) (Figura 3.14).



Figura 3.13 – Pesagem do picnômetro vazio e limpo com a tampa

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.14 – Colocação do material no picnômetro

Fonte: KUME (2013)

Adicionou-se água destilada até o total recobrimento da amostra (Figura 3.15) e em seguida os dois picnômetro foram submetidos a fervura por 15 minutos para eliminação do ar e após fervura os picnômetros foram colocados em um recipiente com água para estabilização da temperatura (Figura 3.16).



Figura 3.15 – Recobrimento com água destilada a amostra para fervura

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.16 – Picnômetros em banho, após fervura, para estabilização da temperatura

Fonte: KUME (2013)

Após a estabilização da temperatura (Figura 3.17) completou-se todo o volume dos picnômetros com água destilada na mesma temperatura do banho e mediu-se a massa do conjunto picnômetro + material + água (C) (Figura 3.18) e, por fim, mediu-se a massa do

picnômetro saturado com água destilada, também na mesma temperatura do banho (D) (Figura 3.19).



Figura 3.17 – Medição da temperatura

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.18 – Medição da massa do conjunto: picnômetro + material + água

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.19 – Medição da massa do picnômetro + água

Fonte: KUME (2013)

Com a equação 4 é possível determinar a massa específica real do agregado miúdo ( $\gamma_r$ )

$$\gamma_{r \text{ miúdo}} = (B - A) / ((D - A) - (C - B)) \quad (4)$$

Onde:  $\gamma_{r \text{ miúdo}}$  = massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)

A = massa do picnômetro (g)

B = massa do picnômetro + amostra (g)

C = massa do picnômetro + material + água (g)

D = massa do picnômetro + água (g)

### ***3.2.3 Determinação da Massa Específica Real – Material Finamente Pulverizado (Procedimento de Ensaio – DNER-ME 085/94 e ABNT NM 23/2001)***

Primeiramente enchamos o frasco Le Chatelier, com auxílio de um funil de haste longa com querosene (utilizado nesse experimento), poderia ser xilol ou nafta (líquidos isentos de água) até o nível compreendido entre 0 e 1 cm<sup>3</sup> deixa-se em repouso em banho a temperatura controlada e após estabilização da temperatura registra-se a leitura (L1), em seguida, com auxílio de outro funil, sendo esse de haste mais curta, colocasse cerca de 60 g de

material finamente pulverizado (Mf) denominado de fíler (diâmetro < 0,075mm) (Figura 3.20). Após a adição do fíler o frasco é agitado de forma a se eliminar as bolhas eventualmente inclusas, e novamente é colocado no mesmo banho até estabilização da temperatura, por fim, efetua-se a leitura (L2) (Figura 3.21).



Figura 3.20 – Frasco com querosene com amostra de fíler sendo adicionada

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.21 – Frasco com amostra de fíler adicionada e com temperatura estabilizada

Fonte: KUME (2013)

A determinação da massa específica real do fíler é obtida com a aplicação da equação 5.

$$\gamma_{r \text{ fíler}} = M_f / (L_2 - L_1) \quad (5)$$

Onde:  $\gamma_{r \text{ fíler}}$  = massa específica real do fíler (g)

L2 = leitura final no frasco de Le Chatelier (cm<sup>3</sup>)

L1 = leitura inicial no frasco de Le Chatelier (cm<sup>3</sup>)

### 3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das principais características que efetivamente influi diretamente no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc.

A distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento conforme Figura 3.22. Nessa análise uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores. Uma vez que a massa da fração de partículas retida em cada peneira é determinada e comparada com a massa total da amostra, a distribuição é expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira, (BERNUCCI et al., 2007).

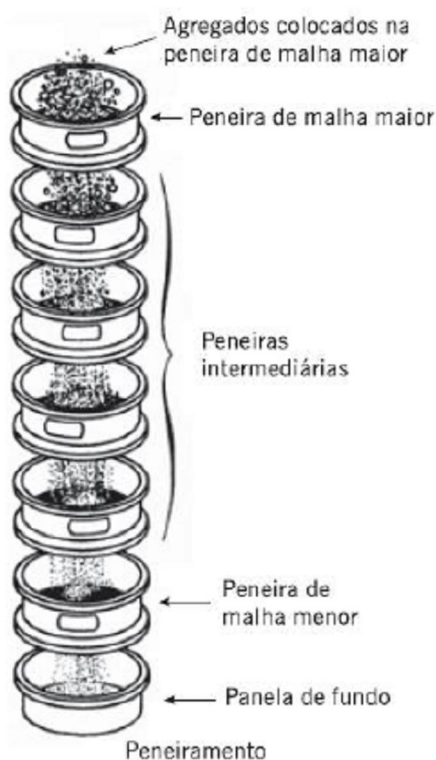


Figura 3.22 - Peneiramento.

Fonte: BERNUCCI et al.(2007)



Foram realizados a análise granulométrica lavada dos quatro materiais: brita 1, pedrisco, pó de pedra e da cal CH-I. As peneiras utilizadas são da série normal e atendem a distribuição granulométrica da faixa III DER-PR, conforme especificação DER/PR ES-P 22/91.

Cada material é ensaiado separadamente. As determinações granulométricas consistem basicamente em secar em estufa até constância de peso cada material, com massa previamente medida de forma a atender a especificação de norma de procedimento. Após a secagem, mede-se a massa seca total (Mt) em seguida esse material é lavado através da peneira n. 200 (abertura 0,075 mm) e todo material retido novamente é seco em estufa até constância de peso. Retira-se o material da estufa estabiliza-se com a temperatura ambiente, mede-se a massa lavada seca (Ml) e em seguida, passa o material pela série de peneiras registrando-se a massa retida de cada fração (cada peneira). Para cálculos, deve-se somar as frações retidas em cada de forma a se obter as massas retidas acumuladas (Mr). Para o cálculo das porcentagens das frações que passam (%) emprega-se a equação 6.

$$\% = (Mt - Mr) / Mt * 100 \quad (6)$$

Onde      %      = porcentagem de material retido (%)

Mt      = material total inicial seco (g)

Mr      = material retido acumulado em cada peneira (g)

Em posse de cada distribuição granulométrica de cada material, procede-se para a composição granulométrica da mistura. A mistura asfáltica deve atender a faixa III de distribuição granulométrica do DER-PR, conforme especificação (Figura 3.23) (DER/PR ES-P 22/91, 1991).

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso				
ABNT	Abertura, mm	I	II	III	IV	V
1 1/2"	38,1	100	-	-	-	-
1"	25,4	95-100	100	-	-	-
3/4"	19,1	-	-	100	-	-
1/2"	12,7	25-60	45-75	65-95	100	100
3/8"	9,5	-	-	-	70-100	80-100
nº 4	4,8	0-10	5-30	5-35	20-40	20-40
nº 8	2,4	-	-	-	5-20	12-20
nº 10	2,0	0-4	0-6	0-10	2-8	-
nº 30	0,60	-	-	-	-	8-16
nº 200	0,074	0-2	0-2	0-2	0-4	3-5

Figura 3.23 – Faixa III DER-PR - ES-P 22/91

Fonte: DER ES-P22/91 (1991)

### 3.4 DOSAGEM MARSHALL

Para a dosagem Marshall primeiramente te foram preparadas 20 bandejas com 1180 de agregados cada, atendendo a as proporções (porcentagens) de cada material. As 20 bandejas foram divididas em dois grupos de 10 bandejas cada, sendo um conjunto para cada tipo de ligante asfáltico.

Devido a falta de compactador automático na FATEC-SP os corpos-de-prova Marshall foram confeccionados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP.

Foram escolhidos 5 teores para a confecção dos corpos-de-prova Marshall: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%, de forma que o teor ótimo de projeto, para os dois tipos de ligantes asfálticos estudados deve situar-se nessa faixa.

Todas a bandejas foram colocadas na estufa a 180°C até constância de temperatura (Figura 3.24), em seguida, mediu-se a massa cal CH-I (Figura 3.25) e também a temperatura do ligante asfáltico (Figura 3.26).



Figura 3.24 – Estufa 180oC

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.26 – Cal CH-I

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.27 – Temperatura do ligante asfáltico

AMB

Fonte: KUME (2013)



Após a pesagem da cal CH-I e atingir a temperatura do ligante asfáltico, removeu-se as bandejas uma a uma da estufa e foi adicionado a massa de ligante asfáltico, de forma a atender a porcentagem pré-estabelecida (Figuras 3.28 e 3.29).



Figura 3.28 – Adição da massa de ligante asfáltico

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.29 – Medição da massa de ligante asfáltico diretamente sobre a balança

Fonte: KUME (2013)

Finalizada a pesagem do ligante asfáltico inicia-se imediatamente a misturação. O processo foi manual e manteve a panela com a mistura sobre o fogo (Figura 3.30). Homogeneizada a mistura asfáltica transfere-se para a mesma bandeja (Figura 3.31) leva-se à estufa, onde permanecerá por 2 h, denominado de tempo de digestão.



Figura 3.30 – Mistura sobre o fogo

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.31 – Transferência da mistura asfáltica para estufa

Fonte: KUME (2013)

Todas as 20 bandejas, sendo 10 de cada tipo de ligante asfáltico foram adicionados o ligante asfáltico, seguida da mistura e colocadas em estufa a temperatura de compactação.

Vencido o período de 2 h iniciou-se a compactação de todos os corpos-de-prova (Figura 3.32) com 75 golpes por face. Finalizada a compactação os corpos-de-prova permaneceram ao ar para esfriamento ( Figura 3.33). Após 24 h os corpos-de-prova foram extraídos dos moldes e procedeu-se com as medições das alturas e diâmetros e da pesagem hidrostática para a determinação dos parâmetros Marshall.

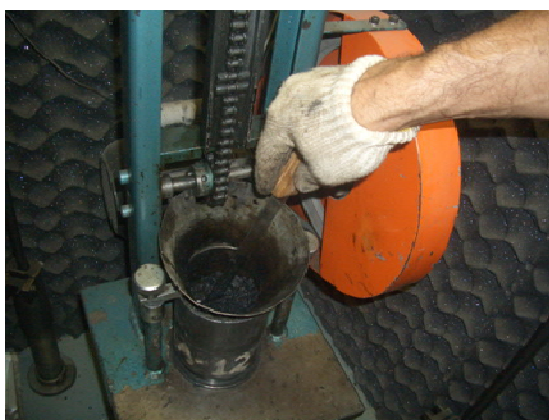


Figura 3.32 – Colocação da mistura asfáltica no molde Marshall

Fonte: KUME (2013)



Figura 3.33 – Disposição dos moldes com os corpos-de-prova Marshall após compactação

Fonte: KUME (2013)

## 4 RESULTADOS

### 4.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A seguir é apresentado na Figura 4.1a a formulação da composição granulométrica, bem com, as distribuições granulométricas de cada material testado: brita 1, pedrisco, pó-de-pedra e da cal CH-I.

Observe-se que na Figura 4.1a está também apresentado a faixa granulométrica Faixa D DER/PR ES-P 15/05, bem como o e, que a composição em porcentagem dos materiais testados granulometricamente foram: brita 1 = 20 %, pedrisco = 30 %, pó-de-pedra = 49 % e a cal CH-I = 1 %.

Tabela 4.1a - Composição da mistura na Faixa D DER/PR – ES-P 15/05

Peneiras		Materiais												Comp.	Faixa D DER-PR		Faixa de Trabalho		
		Brita 1			Pedrisco			Pó-de-pedra			Cal CH-I				ES-P 15/05				
n.	(mm)	#	%	% #	#	%	% #	#	%	% #	#	%	% #		Inf.	Sup.	Toler.	Inf	Sup.
3/4"	19,1	100	20	20	100	30	30	100	49	49	100	1	1	100	100	100	+/-7%	93	107
1/2"	12,7	13	20	2,6	100	30	30	100	49	49	100	1	1	82,6	80	100	+/-7%	75,6	89,6
3/8"	9,52	1	20	0,2	99,0	30	29,7	100	49	49	100	1	1	79,9	70	90	+/-7%	72,9	86,9
4	4,76	0	20	0	1,7	30	0,5	100	49	48,8	100	1	1	50,3	50	70	+/-5%	45,3	55,3
10	2	0	20	0	0,3	30	0,1	67	49	33	100	1	1	34,1	33	48	+/-5%	29,1	39,1
40	0,42	0	20	0	0,3	30	0,1	33	49	16,1	100	1	1	17,2	15	25	+/-5%	12,2	22,2
80	0,177	0	20	0	0,0	30	0	21	49	10,4	100	1	1	11,4	8	17	+/-3%	8,4	14,4
200	0,075	0	20	0	0,0	30	0	13	49	6,2	90	1	0,9	7,1	4	10	+/-2%	5,1	9,1

Fonte: KUME (2013)

### 4.2 MASSAS ESPECÍFICAS E ABSORÇÃO

Os valores das massas específicas: real e aparente e absorção do agregado, a massa específica real do agregado miúdo e também da fração fíler estão apresentados na Tabela 4.2.

Observe-se de acordo com composição dos materiais na formulação da mistura asfáltica, conforme apresentado no item 4.1a, foi feita a ponderação da massa específica aparente dos agregados da mistura asfáltica (Tabela 4.2). Registra-se a absorção do agregado graúdo foi de 1,66%.

Tabela 4.2 – Ponderação da massa específica real

Frações	Massa específica			Composição por fração	DMT Ponderado
	Real	Aparente	Efetiva		
3/4" > # > 4,76 mm	2,845	2,717	2,781	49,7	1,414
4,76 mm > # > 0,075 mm	2,87	-	-	43,2	1,240
# < 0,075 mm	2,9	-	-	7,1	0,206
				100	<b>2,860</b>

Fonte: KUME (2013)

### 4.3 ENSAIOS MARSHALL

Conforme descrito anteriormente foram realizados dois ensaios de dosagem Marshall, um denominado de processo úmido em que a borracha de pneu moído é incorporada ao ligante asfáltico e uma segunda dosagem denominada de processo seco em que a borracha de pneu moída é incorporada à mistura asfáltica em forma de agregado.

Estão apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2 as planilhas da dosagem pelo processo úmido e do processo seco, respectivamente.

FATEC - FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO														
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA														
Laboratório de Materiais Betuminosos														
ENSAIO MARSHALL														
Interessado:					Obra:					Rodovia:				
Operador:					Projeto:						Data / /			
					Data / /			Visto:						
Característica dos Materiais														
Agregado (procedência):					Dens. real da mistura dos agregados: (γa)					2,86 g/cm3				
Ligante Asfáltico: AMB					Densidade do Ligante Asfáltico (γb)					1,030 g/cm3				
Parâmetros Volumétricos - Processo Úmido														
CPs	n.	Ligante	Massa			Volume	Densidade			Volume de vazios	V.C.B. Vazios cheios de betume	V.A.M. Vazios do Agr. Mineral	R.B.V. Rel. Betume Vazios	Altura
		asfáltico	ao ar	Mess	Imersa		Aparente	Vol. Teórico	Max. Teórica					
		(%)	(g)	(g)	X	cm3	(g/cm3)	cm3	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
		X - D				C / E	C*(100-B)/γa+C*B/γb		C / G	(H - F) / K*100	F * B/γb	I + J	J / K*100	
1	4	1224,63	1212,1	707,45	504,7	2,427	458,62	2,670	9,1	9,42	18,54	50,8	65,548	
2	4	1226,73	1215,2	710,44	504,8	2,430	459,41	2,670	9,0	9,44	18,42	51,2	66,080	
Média										9,1	9,4	18,5	51,0	65,8
3	4,5	1235,72	1224,6	720,15	504,5	2,449	466,61	2,648	7,5	10,70	18,21	58,8	65,933	
3A	4,5	1233,47	1220,9	720,74	500,2	2,466	465,76	2,648	6,9	10,77	17,65	61,0	64,868	
4	4,5	1229,77	1219,6	716,83	502,8	2,446	464,37	2,648	7,6	10,69	18,03	59,3	65,823	
Média										7,3	10,7	18,0	59,7	65,5
5	5	1236,98	1219,9	725,22	494,7	2,501	470,93	2,627	4,8	12,14	16,93	71,7	64,935	
6	5	1237,33	1219,5	729,71	489,8	2,526	471,07	2,627	3,8	12,26	16,09	76,2	63,793	
Média										4,3	12,2	16,5	74,0	64,4
7	5,5	1240,42	1217,2	727,93	489,3	2,535	476,10	2,605	2,7	13,54	16,24	83,4	65,485	
8	5,5	1244,52	1224,4	729,81	494,6	2,516	477,67	2,605	3,4	13,44	16,86	79,7	65,533	
Média										3,1	13,5	16,5	81,5	65,5

Figura 4.1 – Planilha de dosagem Marshall pelo processo úmido

Fonte: KUME (2013)

FATEC - FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO													
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA													
Laboratório de Materiais Betuminosos													
ENSAIO MARSHALL													
Interessado:				Obra:				Rodovia:					
Operador:				Projeto:				Data / /					
Característica dos Materiais:													
Agregado (procedência):				Dens. real da mistura dos agregados ( $\gamma_a$ ):				2,860		g/cm <sup>3</sup>		Visto:	
Ligante Asfáltico: CAP 50/70				Densidade do Ligante Asfáltico ( $\gamma_b$ ):				1,010		g/cm <sup>3</sup>			
Parâmetros Volumétricos - Processo Seco													
CPs n.	Ligante asfáltico (%)	Massa			Volume cm <sup>3</sup>	Densidade			Volume de vazios (%)	V.C.B. Vazios cheios de betume (%)	V.A.M. Vazios do Agr. Mineral (%)	R.B.V. Rel. Betume Vazios	
		ao ar (g)	Massa (g)	Imersa (g)		Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Teórico (cm <sup>3</sup> )	Max. Teórica (g/cm <sup>3</sup> )					
A	B	C	D	X	E	F	G	H	I	J	K	L	
D-x						C / E	$C' \cdot (100-B) \gamma_a + C' B / \gamma_b$	C / G	$(H - F) / H \cdot 100$	$F \cdot B / \gamma_b$	I + J	J / K \cdot 100	
1	4	1223,85	1239,21	704,74	534,5	2,290	459,27	2,665	14,1	9,07	23,14	39,2	
2	4	1238,46	1244,97	711,88	533,1	2,323	464,75	2,665	12,8	9,20	22,02	41,8	
Média									13,4	9,1	22,6	40,5	
3	4,5	1236,76	1247,99	707,90	540,1	2,290	468,08	2,642	13,3	10,20	23,54	43,3	
4	4,5	1226,88	1236,75	707,81	528,9	2,320	464,34	2,642	12,2	10,33	22,55	45,8	
Média									12,8	10,3	23,0	44,6	
5	5	1241,61	1246,05	726,00	520,1	2,387	473,89	2,620	8,9	11,82	20,70	57,1	
6	5	1235,76	1243,58	713,56	530,0	2,332	471,66	2,620	11,0	11,54	22,55	51,2	
Média									9,9	11,7	21,6	54,1	
7	5,5	1224,37	1233,16	704,98	528,2	2,318	471,23	2,598	10,8	12,62	23,41	53,9	
8	5,5	1227,76	1229,09	724,82	504,3	2,435	472,53	2,598	6,3	13,26	19,55	67,8	
Média									8,5	12,9	21,5	60,9	
9	6	1254,66	1257,31	728,82	528,5	2,374	486,91	2,577	7,9	14,10	21,97	64,2	
10	6	1250,20	1249,17	732,55	516,6	2,420	485,17	2,577	6,1	14,38	20,46	70,3	
Média									7,0	14,2	21,2	67,2	

Figura 4.2 – Planilha de dosagem Marshall pelo processo seco

Fonte: KUME (2013)

Tem-se adotado o volume de vazios de 4% para a determinação do teor de ligante asfáltico. Para as duas misturas asfálticas testadas foram verificados a relação do volume de vazios x teor de ligante asfáltico (Figura 4.3) e nota-se que para a dosagem pelo processo seco os volumes de vazios encontrados foram significativamente elevados se comparados com a dosagem pelo processo úmido.

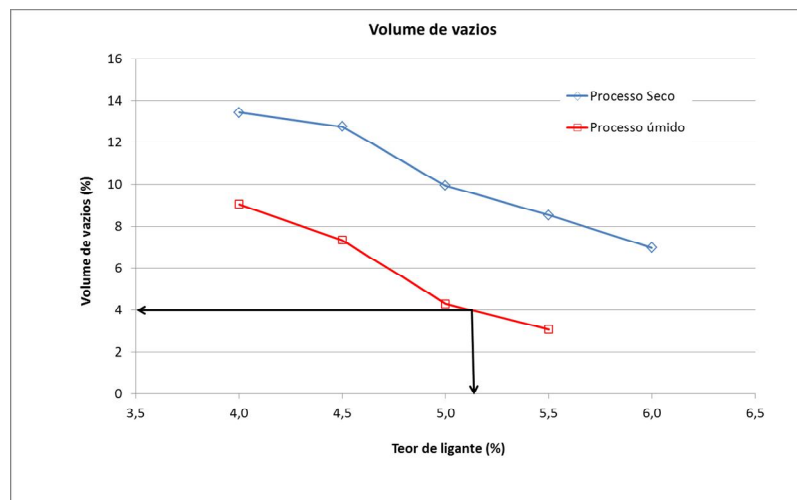


Figura 4.3 – Volume de vazios x teor de ligante asfáltico

Fonte: KUME (2013)

Já para o processo úmido o teor de ligante asfáltico correspondente à 4% de volume de vazios foi de 5,65%.

Foram realizados também na dosagem Marshall o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para ambas as misturas asfálticas, os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 e na Figura 4.4 é apresentado o gráfico com a relação dos valores de resistência à tração por compressão diametral das duas misturas asfálticas.

Tabela 4.1 – Valores de resistência à tração por compressão diametral pelo processo úmido

Processo Úmido										
Teores	CP's	1	2	Medidas (mm)			Carga (kgf)	RT (MPa)		
				3	4	Média		Ind.	Média	
4,0	11→	Ø 1 =	101,73	101,66	101,62	101,69	101,675	1299	1,24	1,25
		h 1 =	65,4	65,25	65,75	65,79	65,548			
	12→	Ø 1 =	101,73	101,52	101,73	101,59	101,643	1321	1,25	
		h 1 =	65,56	66,92	65,54	66,3	66,080			
	13→	Ø 1 =	101,66	101,62	101,67	101,21	101,540	1507	1,43	
		h 1 =	66,53	65,89	65,51	65,8	65,933			
4,5	13A→	Ø 1 =	101,64	101,59	101,56	101,47	101,565	1246	1,20	1,40
		h 1 =	64,92	64,6	64,88	65,07	64,868			
	14→	Ø 1 =	101,75	101,6	101,66	101,7	101,678	1639	1,56	
		h 1 =	66,1	65,76	65,39	66,04	65,823			
	15→	Ø 1 =	101,75	101,63	101,65	101,54	101,643	1782	1,72	
		h 1 =	64,94	64,6	65,28	64,92	64,935			
5,0	16→	Ø 1 =	101,8	101,79	101,82	101,81	101,805	1939	1,90	1,81
		h 1 =	64,29	63,64	63,27	63,97	63,793			
	17→	Ø 1 =	101,62	101,65	101,73	101,66	101,665	1820	1,74	
		h 1 =	64,98	65,21	65,26	66,49	65,485			
	18→	Ø 1 =	101,69	101,77	101,72	101,75	101,733	1649	1,57	
		h 1 =	65,32	66,04	65,51	65,26	65,533			

Fonte: KUME (2013)

Tabela 4.2 – Valores de resistência à tração por compressão diametral pelo processo seco

Processo Seco										
Teores	CP's	Medidas (mm)					Carga (kgf)	RT (MPa)		
		1	2	3	4	Média		Ind.	Média	
4,0	1→	Ø 1 =	101,82	101,67	101,85	101,73	101,768	1135	1,03	1,09
		h 1 =	69,43	68,73	68,14	68,13	68,608			
	2→	Ø 1 =	101,69	100,88	101,51	101,23	101,328	1250	1,15	
		h 1 =	67,51	69,25	68,76	68,47	68,498			
4,5	3→	Ø 1 =	101,6	101,77	101,58	101,73	101,670	1215	1,11	1,12
		h 1 =	68,68	68,98	67,92	68,35	68,483			
	4→	Ø 1 =	101,63	101,57	101,61	101,49	101,575	1228	1,14	
		h 1 =	67,55	67,32	67,97	68,27	67,778			
5,0	5→	Ø 1 =	101,61	101,76	101,66	101,84	101,718	1631	1,55	1,35
		h 1 =	65,66	65,98	65,79	65,51	65,735			
	6→	Ø 1 =	101,68	101,76	101,72	101,31	101,618	1235	1,15	
		h 1 =	67,02	67,87	67,81	67,04	67,435			
5,5	7→	Ø 1 =	101,66	101,71	101,38	101,76	101,628	1167	1,09	1,32
		h 1 =	66,72	67,55	67,06	67,54	67,218			
	8→	Ø 1 =	101,73	101,83	101,5	101,73	101,698	1605	1,55	
		h 1 =	65,02	64,69	65,08	64,12	64,728			
6,0	9→	Ø 1 =	101,57	101,91	101,71	101,64	101,708	1260	1,19	1,27
		h 1 =	65,73	66,45	65,92	66,42	66,130			
	10→	Ø 1 =	101,68	101,67	101,72	102,16	101,808	1389	1,34	
		h 1 =	64,21	64,65	65,15	64,82	64,708			

Fonte: KUME (2013)

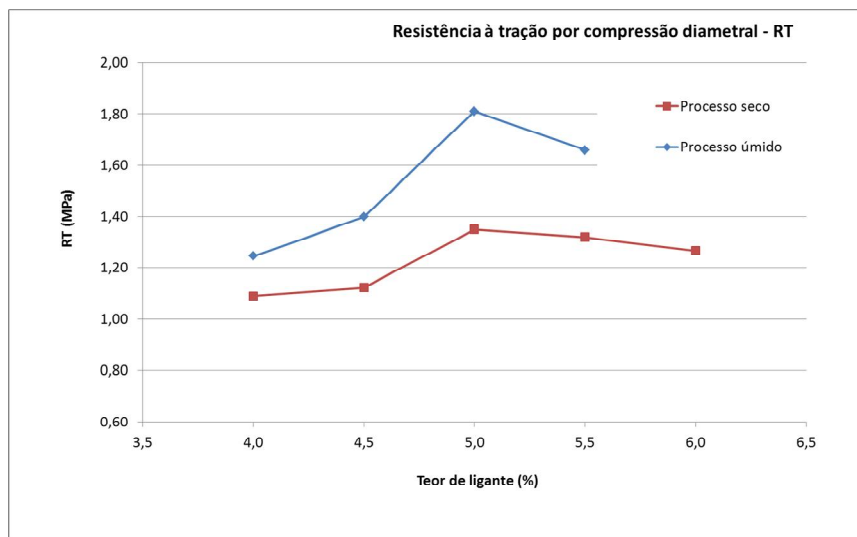


Figura 4.4 – Relação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral

Fonte: KUME (2013)

## **5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 CONCLUSÃO**

Face aos resultados encontrados podemos concluir que a mistura asfáltica usinada pelo processo úmido mostrou-se com maior valor de resistência à tração por compressão diametral, visto que essa mistura asfáltica teve um teor de ligante asfáltico de 5,65% para 4% de volume de vazios e que para a mistura asfáltica referente ao processo seco não foi possível determinar o teor de ligante asfáltico devido aos volumes de vazios serem superiores a 4% para todos os teores de ligante asfáltico testados.

### **5.2 COMENTÁRIOS**

Recomenda-se testar esse processo para outros tipos de misturas asfálticas quanto à distribuição granulométrica e também tipos de ligantes asfálticos. Verifica-se que a incorporação de borracha pelo processo seco é ainda uma incógnita no meio técnico rodoviária de materiais. E vejo, com essas perspectivas, que este trabalho poderá e terá uma continuidade complementar em breves estudos.



## REFERÊNCIAS

- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007.
- BERTOLLO, Sandra Margarido. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com borracha reciclada de Pneus.** 2002. 197 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- BERTOLLO, Sandra Ap. Margarido et al. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista Limpeza Pública**, São Paulo, n. 54, p. 23-30, jan. 2000. Disponível em: < [http://www.ablp.org.br/acervoPDF/04\\_LP54.pdf](http://www.ablp.org.br/acervoPDF/04_LP54.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2012.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002.** Brasília: DOU, 17 jul. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 10 out. 2012.
- CORTEZ, Diego. **Estudo Comparativo da Resistência à Deformação Permanente em Trilha de Roda de Duas Mistura Asfálticas Usinadas com Ligante Asfáltico Convencional CAP 50/70 e Modificado por Borracha.** 2011. 78 p. Monografia (Graduação) – Curso de Movimento de Terra e Pavimentação, Departamento de Transporte e Obras de Terra, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2011.
- DER-PR. **Faixa III DER-PR – ES-P 22/91.** Paraná, 1991.
- GOMES, Manuel Morato. **Introdução à Vulcanização.** São Paulo: Rubberpedia, 2008. Disponível em: <<http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao/vulcanizacao.php>>. Acesso em: 11 abr. 2013.
- DEROSSO, Mary. **Lixo jogado nas ruas e terrenos. Falta de respeito!.** 1 fotografia. Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://www.maryderosso.blogspot.com>>. Acesso em: 9 abr. 2013.
- HEITZMAN, M. ***Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. State of the Practice.*** FHWA-SA-92-022, 1992.
- KUME, Renata Mayumi. **Avaliação dos parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com emprego de borracha de pneu moída pelo processo úmido e seco.** fotografias cor. Arquivo pessoal. São Paulo, 2013.
- MICHELIN. **O que compõem um pneu?** Portugal: [20--]. Disponível em: <<http://www.michelin.pt/pneus-turismo/conselhos/tudo-sobre-o-pneu/o-que-compoe-um-pneu>>. Acesso em: 4 maio 2012.

MOURA, Edson de. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**. 2010: 299p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA. **Asfalto-Borracha**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/autoborracha>>. Acesso em 2 de abril de 2013.

SKILL TEC. **Paquímetro Digital**. 1 fotografia. São Paulo, [20--]. Disponível em: <<http://www.skill-tec.com/500-171-20b-paquimetro-digital-mitutoyo>> Acesso em 11 de abril de 2013.

SOARES, R.A.; ASSIS, E. M. **O Uso da Borracha de Pneus na Pavimentação como uma Alternativa Ecologicamente Viável**. 2008. 14p. Artigo – Universidade Católica de Salvador, Salvador, 2008.