

O USO DO PNEU PARA PAVIMENTAÇÃO

Adilene Rochido dos Santos

Orientador: Prof. Aldo Giuntini de Magalhães

Fevereiro 2011

Adilene Rochido dos Santos

O USO DO PNEU PARA PAVIMENTAÇÃO

Monografia apresentada ao
Curso de Especialização
em Construção Civil da
Escola de Engenharia UFMG.

Orientador: Prof. Aldo Giuntini
de Magalhães

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

**ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA**

ALUNO: ADILENE ROCHIDO DOS SANTOS

MATRÍCULA: 2010704562

RESULTADO

Aos 26 dias do mês de abril de 2011 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:


"O USO DO PNEU PARA PAVIMENTAÇÃO"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

 APROVADO APROVADO COM CORREÇÕES REPROVADONOTA: 85CONCEITO: B**BANCA EXAMINADORA:**

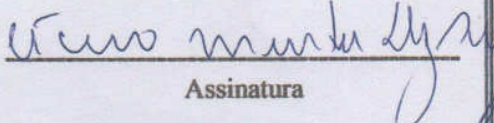
Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Nome


Assinatura

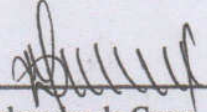
Prof. Dr. Cicero Murta Diniz Starling

Nome


Assinatura

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Belo Horizonte, 26 de abril de 2011


Coordenador do Curso
Prof. Dalmo Lúcio M. Siqueiredo
Coordenador do Curso de Especialização
Em Construção Civil

Dedico a quem sempre esteve ao meu lado, dando amor e carinho, sonhado meus sonhos, apoiando para torná-lo realidade, sorrindo para superar as decepções e chorando para aplaudir minhas conquistas.



AGRADECIMENTOS

Esta caminhada começou a partir de esperanças em um futuro diferente, do medo frente ao desconhecido, da alegria de estar começando uma nova trajetória.

Agradeço a Deus a mais uma conquista atribuída. Agradeço a minha família pelo incentivo e por estar aqui vencendo mais uma batalha.

Agradeço a toda a Administração e professores da Escola de Engenharia do Curso de construção civil pela oportunidade, apoio e toda a compreensão.

Agradeço aos companheiros de turma que compartilharam comigo, dividindo a sua história e ajudando a construir a minha.

Agradecer com um muito obrigado a todos neste momento é pouco, mas o máximo que consigo dizer. Sem vocês seria impossível de chegar.

Vivemos em constantes buscas de realizações, esta é mais uma que dedico aos meus pais e meus irmãos que colaboraram com esta conquista. Aos meus amigos pelo companheirismo e compreensão

“Grandes foram às lutas, maiores serão as vitórias”.

SUMÁRIO

1.0 - INTRODUÇÃO.....	12
1.2 - OBJETIVO	16
1.3 - JUSTIFICATIVA	19
1.4 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA	22
2.0 - CONCEITOS BÁSICO SOBRE PAVIMENTAÇÃO	25
2.1- PAVIMENTO	25
2.1.1- Funções.....	25
2.1.1- Requisitos.....	25
2.2 – Classificação do Pavimentos	25
2.2.1 – Pavimentos Rígidos.....	26
2.2.1.1 – Vantagens dos Pavimentos Rígidos.....	27
2.2 – Pavimentos Flexíveis.....	27
2.2.2.1 - Descrição Das Camadas De Um Pavimento Flexível.....	28
2.2.3- Vantagens Do Pavimento Flexível.....	29
2.3 – CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO	29
3.0 - FORMAS DE REUTILIZAÇÃO DE PNEUS INSERSÍVEIS.....	30
3.1 - APLICAÇÃO DE PNEUS INSERSÍVEIS EM SUA FORMA INTEIRA.....	30
3.2 - UTILIZAÇÃO DE PNEUS INSERSÍVEIS COMO COMBUSTIVEL.....	30
3.3- INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEUS PELA MASSA ASFÁLTICA.....	30
4.0- HISTÓRIA DO PNEU E O PROBLEMA AMBIENTAL	31
4.1 – A PREOCUPAÇÃO COM A QUESTÃO AMBIENTAL.....	32
4.2 – APRIMORAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS PELA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	33
4.2.1 – Processo de Reutilização, Reciclagem e Disposição de Pneus.....	34
4.2.2 – Processo de Trituração de pneus.....	35
4.2.2.1 – Classificação da Granulometria da Borracha.....	37
4.2.2.2 – Produção do Ligante Asfáltico de Borracha	38

4.2.3 – Asfalto Modificado Com Polímeros	39
4.2.3.1 – Processo Seco	41
4.2.3.2 – Processo Úmido	42
4.2.4 – Vantagens Técnicas Preventivas	48
4.2.4.1 – Redução do Envelhecimento	49
4.2.4.2 – Redução a Sustentabilidade Térmica.....	51
4.2.4.3 – Maior Resistência às Deformações Permanentes as Trilhas de Roda	51
4.2.4.4 – Aumento da Resistência à Fadiga.....	52
4.2.4.5 – Aumento da Flexibilidade e Viscosidade.....	54
4.2.4.6 – Aumento do Ponto de Amolecimento	54
4.2.5 – Selante de Trincas, Juntas e Remendos	55
4.2.6 – Tratamento Superficial (SAM).....	55
4.2.7 – Aplicação entre as camadas de Asfáltico (SAMI)	56
4.3 – PAVIMENTO MODIFICADO COM BORRACHA DE PNEUS.....	57
4.3.1 – Materiais.....	58
4.3.2 – Cimento Asfáltico.....	58
4.3.3 – Agregados	59
4.3.3.1 – Agregado Miúdo.....	59
4.3.3.2 – Material de Enchimento (Filer).....	60
4.3.5.1 – Caminhões Para Transporte do Ligante Asfalto- Borracha.....	61
4.3.5.2 – Depósito Para Ligante Asfalto-Borracha.....	61
4.3.5.3 – Depósito Para Agregados.....	61
4.3.5.4 – Silos Para Agregados	61
4.3.5.5 – Usina Para Mistura Asfática	62
4.3.5.6 – Caminhões Para Transporte de Mistura	63
4.3.5.7 – Equipamento Para Distribuição e Acabamento	63
4.3.5.8 – Equipamento Para Compactação	64

4.3.5.9 – Ferramentas e Equipamento e Acessórios	64
4.4 – EXECUÇÃO.....	65
4.4.1 – Condições Gerais	65
4.4.2 – Preparo da Superfície	65
4.4.3 – Produção do Concreto Asfáltico Com Asfalto Borracha	66
4.4.4 – Transporte do Concreto Asfáltico Com Asfalto Borracha	66
4.4.5 – Distribuição da Mistura	67
4.4.6 – Compactação da Mistura	68
4.4.7 – Juntas	69
4.4.8 – Abertura ao Tráfego	69
4.4.9 – Controle de Qualidade	69
4.5 – Principais Defeitos do Pavimento Asfáltico	70
4.5.1 – Deformação Permanente nas Trilhas de Roda	71
4.5.2 – Trincas por Fadiga	72
4.5.3 – Modelos de Fadiga para Mistura Asfáltica Densas	75
4.6 – PRODUÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO (PROCESSO ÚMIDO)	75
4.7 – MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO	76
4.7.1 – Principais Ensaio Para Caracterização do Ligante Asfáltico	77
4.7.2 – Ensaio Tradicionais	78
4.8 – CONDIÇÕES DE TRABALHO NO INVERNO	81
4.9 – ASFALTO TRADICIONAL X ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)	82
5.0 - CONCLUSÃO.....	85
6.0 – VISITA TECNICA AO CANTEIRO DE OBRA DO TRECHO DE ITABIRA.....	87
6.1 – Comentários das fotos do trecho de Itabira	89
7.0 – BIBLIOGRAFIA.....	90

LISTA DE FIGURAS

2.2.1 – Pavimento Rígido.....	26
2.2.2 – Pavimento Flexível.....	27
4.0 – Esquema do Ciclo de Vida de Um Pneu	31
4.1a – Disposições de Carcaças de Pneu em Terreno Baldio e Rio.....	32
4.1b – Incêndios de Pneus do Ar, da Água e do Solo.....	33
4.2a – Composição Média de Um Pneu Novo	33
4.2b – Corte de Um Pneu Radial de Um Automóvel.....	34
4.2.1 – Esquema da Destinação Final dos Pneus Inservíveis.....	35
4.2.2 – Processo de Trituração dos Pneus.....	36
4.2.3 – Processo de Misturas Asfálticas com Partículas de Borracha	41
4.2.3.1 – Misturas Asfálticas com Partículas de Borracha	41
4.2.3.2 – Fatores Que Influenciam o Ligante Asfalto-Borracha.....	44
4.2.3.2a – Comparação de Consistência Entre Asfalto-Borracha e Asfalto Convencional no Momento de Usinagem	47
4.2.3.2b – Processo de Mistura Estocável do Asfalto Borracha	47
4.2.3.3 – Deformação em Trilhas de Roda de Pavimentos	52
4.2.4.4 – Progressão da Trincas de Fadiga nos Pavimentos Flexíveis.....	53
4.2.5 – Aplicação de Selagem de trincas	55
4.2.6 – Execução de Um SAM	56
4.2.7 – Execução de Um SAMI	57
4.3a – Composição do Pavimento Modificado do Pneu	57
4.3b – Execução de Um Recapeamento.....	57
4.5.1 – Deformação Permanente nas Trilhas de Roda.....	71
4.5.2a – Trincas por Fadiga do Revestimento Asfáltico	72
4.5.2b – Equipamento de Compressão Diametral da UFSC Utilizado Para Avaliação do Módulo Resiliente e Estudos de Fadiga de Misturas Asfálticas.....	74

4.6 – Esquema da Produção do Ligante Asfalto-Borracha	76
4.7 – Agitador Mecânico, Panela Elétrica e Recipiente Para Armazenagem do Ligante	77
4.7.2a – Equipamento Utilizado no Ensaio da Penetração dos Ligantes Asfálticos.....	78
4.7.2b- Equipamento Utilizado na Determinação do Ponto de Fulgor dos Ligantes Asfálticos	79
4.7.2c- Equipamento Utilizado na Determinação do Ponto de Amolecimento do Ligante Asfáltico – Método Anel e Bola	80
4.7.2d- Viscosímetro de Saybolt-Furol.....	80
4.7.2e- Equipamento Utilizado na Determinação da Ductibilidade	81



LISTA DE TABELAS

4.3.2 – Propriedades do Ligante Asfalto-Borracha	59
4.3.4.1 – Granulometria do Material de Enchimento	60



LISTA DE GRÁFICOS

5.0a - Ensaio de Deformação Permanente - N. de ciclos x afundamento - Corredor de ônibus da Av. Faria Lima – SP / Ligante asfáltico - CAP-20 - t=60 Cº	84
5.0b- Ensaio de Deformação Permanente - N. de ciclos x afundamento -Corredor de ônibus da Av. Faria Lima – SP/ Ligante asfáltico - Ecoflex-B - t=60 Cº.....	84



1.0- INTRODUÇÃO

O principal meio de transporte de pessoas e produtos no Brasil é o rodoviário e nossas estradas se encontram em péssimo estado de conservação sendo que o precário estado de conservação dos pavimentos ocasiona aumento em custos operacionais de transporte (com o aumento dos custos logísticos em geral), os quais são repassados aos produtos e, por conseguinte, ao consumidor final. Uma solução para este problema é a utilização de pneus inservíveis para a produção de um pavimento asfáltico com maior durabilidade. O pavimento é uma estrutura oriunda de múltiplas camadas, tais como revestimento, base, sub-base, subleito e reforço do subleito, que tem a função de suportar o tráfego e prover um meio seguro e econômico para o transporte de pessoas e mercadorias (SAMPAIO, 2005). O desempenho de um pavimento é condicionado por um complexo conjunto de fatores, dentre eles a propriedade física, mecânica e química que o constitui.

O Brasil necessita pavimentar grandes extensões de estradas com poucos recursos financeiros, dessa forma, o aproveitamento de materiais resistente e de baixo custo é uma maneira de desenvolver e viabilizar a construção civil. (SALINI E MARCON, 1998).

O alto custo e a função estrutural das camadas asfálticas e cimentadas são aspectos marcantes no desempenho do pavimento e a razão de se combinar asfaltos com determinados polímeros é prevenir a degradação prematura do pavimento com o uso e, desta forma, estender sua vida útil, reduzindo assim o seu custo de manutenção.” (SPECHT, 2004 apud Cury et al., 2002).

O asfalto de borracha é uma forma de preparo da mistura asfáltica aproveitando resíduos sólidos (pneus, nesse caso) para aprimorar características como resistência, permeabilidade e aderência. O asfalto leva o nome de ecológico por receber 20% de borracha de pneu velho triturado, contribuindo para o reaproveitamento desse resíduo de difícil destinação. Quantidades variáveis entre 200 e 1000 pneus, dependendo da tecnologia

utilizada, são aproveitados para a construção de um quilômetro dessa forma de pavimentação.

O asfalto pode ser distribuído como ligante à quente, para uso em misturas, ou pode servir de matéria-prima para fabricação de outro importante ligante rodoviário: a emulsão asfáltica.

O asfalto de borracha é uma forma de preparo da mistura asfáltica aproveitando resíduos sólidos (pneus, nesse caso) para aprimorar características como resistência, permeabilidade e aderência. Além de evitar que os pneus se transformem em fonte de poluição, esta reciclagem é ambientalmente correta ao utilizar ao máximo um recurso natural (derivado de petróleo), que misturado ao asfalto convencional resultada em um produto com características técnicas superiores e ambientalmente correto, o asfalto-borracha.

A borracha granulada proveniente desses pneus possui aplicações em diversas áreas. Dentre as aplicações que ganharam maior notoriedade nos últimos anos, a incorporação da borracha em pavimentos asfálticos se destaca pelo grande consumo de pneus inservíveis, melhorando as condições do asfalto como resistência e durabilidade.

Reciclagem é a recuperação, re-processamento ou reutilização de materiais descartados como alternativa à sua disposição final em forma de resíduo. Essa utilização como matéria prima de materiais que de outra forma, seriam considerados despejos representa o principal incentivo às tentativas de incorporação dos resíduos de borracha provenientes de pneus (ORSI E SIMON, 2006).

Os asfaltos, materiais aglutinantes de cor escura, derivados do petróleo, podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (ROBERTS *et al.*, 1998).

Segundo Specht (2000) Apud Cury et al.(2002), o alto custo e a função estrutural das camadas asfálticas e cimentadas são aspectos marcantes no

desempenho do pavimento e a razão de se combinar asfaltos com determinados polímeros é prevenir a degradação prematura do pavimento com o uso e, desta forma, estender sua vida útil, redolímeros haja uma redução da sustentabilidade térmica e um aumento da ductibilidadeuzindo assim o seu custo de manutenção. Espera-se que com a adição de p, levando a uma maior resistência a deformação plásticas a altas temperaturas e suprimindo o aparecimento de fissuras por retração térmica e de fadiga.

De acordo com Morilha Jr. e Greca (2003), a utilização da borracha, como polímero, adicionado ao cimento asfáltico, funciona como um grande melhorador do asfalto.

A utilização da borracha de pneu moído, ou pó de pneu, nas misturas asfálticas mostra-se como uma das alternativas ambientalmente adequadas, que pode apresentar grandes reduções de volume desse resíduo em todo o mundo. (Cury et. al, 2002).

Mais de 330 milhões de pneus inservíveis são descartados por ano em todo mundo, deste número, somente uma pequena proporção é recauchutada ou queimada para produção de energia (FATTUHI & CLARK, 1996), o restante é descartado de maneira ambientalmente incorreta, sendo, cada vez mais necessária, uma ampla discussão a respeito do descarte de pneus e sobre os novos caminhos que os processos de reciclagem desses resíduos podem seguir.

O fato dos pneus não serem facilmente biodegradáveis, ou não decomporem facilmente faz com que estes resíduos se acumulem em proporções consideráveis na natureza, podendo trazer sérios riscos à saúde pública e ao meio ambiente, causando vários problemas, sendo um deles o espaço que eles ocupam. Pois, além de não sofrerem biodegradação, eles ocupam grandes espaços, por serem volumosos (LIU ET AL., 1998), e muitos são, normalmente, amontoados em áreas abertas ou dispostos em aterros (BARLAZ ET AL., 1993). O destino adequado dos resíduos gerados pela sociedade tem sido um dos maiores problemas da atualidade.

Os incêndios em pneus são perigosos e altamente poluentes, causando significativa poluição do ar, do solo e da água, além disso, a recuperação do local após o acidente é muito onerosa (RAGHAVAN, 1999).

A reutilização dos rejeitos, através da reciclagem é uma forma de sanar este problema.

1.2- OBJETIVO

A busca de novas alternativas para a construção de rodovias é imperativa, dada a escassez de materiais naturais e o aumento de custos dos materiais de construção.

Segundo Specht (2000) apud Cury et. AL (2002), o alto custo e a função estrutural das camadas asfálticas e cimentadas são aspectos marcantes no desempenho do pavimento e a razão de se combinar asfalto com determinados polímeros é prevenir a degradação prematura do pavimento com o uso e, desta forma, estender a sua vida útil, reduzindo assim seu custo de manutenção. Espera-se que com a redução de polímeros haja uma redução de suscetibilidade e o aumento da ductilidade, levando a uma maior resistência as deformações plásticas a altas temperaturas e suprimindo o aparecimento de fissuras por retração térmica e de fadiga.

Trata-se do Asfalto Borracha, denominado comercialmente de ECOFLEX, especialmente desenvolvido para consumir pneus inservíveis e melhorar as propriedades do asfalto comum. (GRECA ASFALTOS, 2007).

“A modificação ou melhoria dos ligantes asfálticos utilizados em pavimentação, com adição de borracha de pneus, foi considerada uma alternativa atraente para o melhoramento das propriedades dos materiais betuminosos, já que como resultado final de um revestimento com características técnicas superiores às verificadas em misturas asfálticas convencionais. A borracha constituinte do pneu possui excelentes propriedades físico-químicas para ser incorporada ao ligante convencional, trazendo uma série de melhorias que se refletem diretamente na durabilidade do pavimento.” Eng. Marcelo Montans Zamarian – Gerente de obras da ECONORTE. (GRECA ASFALTOS, 2003).

O asfalto borracha é uma mistura efetuada a quente sob condições controladas, de ligante asfáltico, borracha moída de pneus (com variação de 15% a 20% em relação ao peso total da mistura), diluentes e alguns aditivos especiais.

Os materiais utilizados na pavimentação asfáltica e vêm sofrendo modificações ao longo dos tempos visando uma melhor adequação as necessidades, tais como: maior durabilidade, resistência, qualidade e redução de custos. visando a possibilidade da utilização de pneus usados como insumo de pavimentação, contribuindo para um melhor desempenho do asfalto convencional, além de dar uma destinação ambientalmente adequada aos pneus velhos.

Tendo como principal objetivo mostrar a reutilização da borracha dos pneus insersíveis, adicionada ao asfalto convencional, consegue-se obter um novo tipo de asfalto, o asfalto borracha e demonstrando diversas vantagens frente ao asfalto tradicional utilizado.

O asfalto-borracha proporciona uma melhor aderência pneu-pavimento, reduz o ruído provocado pelo tráfego em até 85%, permite a redução da espessura do pavimento, proporciona um aumento na sua vida útil, reduz o envelhecimento e a suscetibilidade térmica, e aumenta a resistência à fadiga e às deformações permanentes nas trilhas de roda, além de dar uma destinação final aos pneus inservíveis que são descartados de forma indevida na natureza. A sua relação custo benefício é vantajosa sobre os ligantes convencionais devido ao baixo custo de manutenção ao longo dos anos. (GRECA ASFALTOS, 2003).

Os asfaltos modificados com borracha proporcionam misturas asfálticas mais resistentes às variações de temperatura. O desempenho a baixas temperaturas assim como o desempenho a altas temperaturas é melhor quando comparado com pavimentos construídos com ligante asfáltico convencional (HEIZTMAN, 1992a, RUTH et al., 1997 apud ODA, 2000).

Aprimorar diversas propriedades do concreto convencional, tais como, resistência a fissuração não estrutural, absorção do impacto de ondas, resistência a ácidos, além deste novo material apresentar menor condutividade térmica e maior capacidade de isolamento acústico, que podem ser obtidas com a incorporação de borracha no concreto.

A durabilidade de um revestimento asfáltico depende da utilização de ligantes asfálticos de melhor qualidade, o que tem levado ao uso de aditivos para melhorar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas.

Atualmente processos utilizados em indústrias são desenvolvidos de forma a usar o mínimo de matéria prima e energia para conseguir um produto que seja de boa qualidade. Para isso é necessário utilizar políticas de desenvolvimento sustentável, que estabeleçam regras para utilização dos recursos naturais de forma inteligente, diminuindo desperdícios e aumentando o rendimento dos materiais.

1.3- JUSTIFICATIVA

A transformação de resíduos sólidos em novos produtos utilizáveis constitui uma solução criativa que permite a otimização dos recursos econômicos, em que o material descartável passa a ser a matéria-prima de novos produtos. A reciclagem contribui para a preservação do meio ambiente, sendo do ponto de vista ambiental uma grande alternativa para a manutenção da qualidade de vida. Desta forma, torna-se importante o estudo da viabilidade do uso de pneus inservíveis.

A utilização da borracha de pneus inservíveis como matéria-prima em pavimentação se justifica tecnicamente por produzir misturas asfálticas mais duráveis e, conseqüentemente, melhores vias. Outro motivo seria o de benefício ambiental, através de uma destinação adequada desses resíduos, bem como a minoração de exploração de novas jazidas de agregados. Some-se a isso a possível diminuição de focos do mosquito da dengue (pela deposição inadequada dos pneus inservíveis), reduzindo, assim, a incidência de casos, situação essa que muito atinge a população de vários municípios do estado.

O aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais é uma tendência mundial que vem crescendo rapidamente em todos os ramos da atividade econômica e contempla a redução de custos trazendo, por vezes, melhorias, facilidades técnicas e operacionais.

Os pneus usados são considerados não biodegradáveis e seu tempo de decomposição é indeterminado. O abandono ou a indisposição incorreta, forma um passivo ambiental com sério risco ao meio ambiente e a saúde pública.

A questão do descarte de pneus inservíveis em aterros tornou-se uma séria preocupação em todas as cidades no mundo. Esse tipo de resíduo apresenta processo de decomposição lento, baixa compressibilidade, o que resulta ocupar grandes espaços, hoje preciosos nas grandes cidades, ou seja, são estruturas difíceis de serem eliminadas. Quando são compactados inteiros, os pneus tendem a voltar à sua forma original e retornam à superfície, causando

uma movimentação no solo. Da queima inconseqüente resulta a fumaça negra, altamente poluidora pela diversidade de compostos liberados na combustão, podendo provocar danos à saúde, e material oleoso, derivado de petróleo, que carregado para os corpos d'água superficiais ou para os aquíferos subterrâneos, podem contaminar a água, tornando-a imprópria para o consumo, além de prejudicar espécies que habitam o ambiente atingido (GHALY; CAHILL, 2005).

Os pneus não são biodegradáveis, agravando ainda mais a questão de sua decomposição em aterros. Descartados em pilhas tornam-se locais se locais ideais como criadouros de insetos e nos diversos vetores de transmissão de doenças (ratos, mosquitos).

Além de evitar que os pneus transformem-se em fonte de poluição, esta reciclagem é ambientalmente correta ao utilizar ao máximo um recurso natural (derivado de petróleo), que misturado ao asfalto convencional resultada em um produto com características técnicas superiores e ambientalmente correto, o asfalto-borracha.

O gerenciamento é um grande problema em todo o mundo. Tendo em vista que seu manejo e a disposição é um processo caro, muito países vem tentando minimizar a sua geração, a reciclagem, a recuperação dos materiais e sua conversão em produtos utilizáveis, compostos ou energia. Conseqüentemente, a quantidade de resíduos a ser disposta será menor, o que significa que o custo com gerenciamento também será menor.

Nos dias de hoje, a melhoria na qualidade dos pneus vem acompanhada por exigências de destinação após o termino de sua vida útil, porém ainda não é definitivamente cumprida principalmente pelo envolvimento de diversos segmentos, como fabricantes, revendedores, reformadores e usuários, tornando difícil o trabalho de conscientização e acompanhamento.

Estimam-se existir em torno de 100 milhões de pneus abandonados em aterros, lixões, córregos, lagoas e rios do Brasil segundo estimativa da Associação Nacional das Industrias de Pneumaticos (ANIP).

Com a finalidade de se produzir revestimentos asfálticos mais flexíveis, menos sujeitos às variações térmicas, mais resistentes à ação do tráfego, e conseqüentemente revestimentos de maior durabilidade foram desenvolvidos nos últimos anos diversos tipos de polímeros modificadores dos ligantes asfálticos convencionais (MORILHA, 2004).

1.4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sabendo-se do aumento de números de veículos e peso por eixo nas rodovias brasileiras, a busca sempre constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e uso do asfalto modificado que visam ampliar a faixa de utilização dos ligantes rodoviários. (PETERSON, R. L., 1995).

Muitos são os tipos de pneus devido a sua aplicação em diferentes veículos. Os mais comuns, e em maior quantidade, são os pneus para automóveis, caminhões, ônibus e utilitários leves (pick-up, vans), motocicletas e bicicletas. Há também pneus de borracha sólida chamada “pneus maciços” com aplicação restrita e alguns veículos industriais, agrícolas e militares.

De acordo com Ruth et al. (1997, apud ODA, 2000), uma maior quantidade de borracha natural é encontrada nos pneus de caminhões, enquanto a borracha sintética é encontrada em maior quantidade nos pneus de automóveis. Segundo Roberts et al. (1989 apud SPECHT, 2004), quão maiores os teores de borracha natural no asfalto-borracha, melhores são as características da mistura resultante. Conforme Roberts e Lytton (1987, apud ODA, 2000), a composição química da borracha depende do seu processo de produção e influencia a elasticidade do asfalto-borracha e a estabilidade do produto.

O pneu é construído, basicamente, com uma mistura de borracha natural e de elastômeros (polímeros com propriedades físicas semelhantes às da borracha natural), também chamados de “borrachas sintéticas”. A adição de negro de fumo confere à borracha propriedades de resistência mecânica e à ação dos raios ultravioleta, durabilidade e desempenho. A mistura é espalmada num molde e, para a vulcanização - feita a uma temperatura de 120°-160°C - utiliza-se o enxofre, compostos de zinco como aceleradores e outros compostos ativadores e antioxidantes. Um fio de aço é embutido no talão, que se ajusta ao aro da roda e, nos pneus de automóveis do tipo radial, uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça e a mistura de borracha/elastômeros é espalmada, com uma malha de arame de aço entrelaçada nas camadas superiores. Estes

materiais introduzem os elementos químicos da composição total de um pneu típico.

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

Esse asfalto composto com polímeros da borracha de pneus reciclados apresenta dois fatores potenciais de uso: a grande quantidade de pneus utilizados, dando destino final a um maior número de carcaças, e melhoria das características dos ligantes asfálticos. A vida útil é 33% maior do que o asfalto tradicional. O desgaste de pneus também é reduzido.

A composição química da borracha depende do processo de produção e influencia a elasticidade do asfalto-borracha e a estabilidade do produto (ROBERTS e LYTTON, 1987).

O asfalto leva o nome de ecológico por receber 20% de borracha de pneu velho triturado, contribuindo para o reaproveitamento desse resíduo de difícil destinação. Quantidades variáveis entre 200 e 1000 pneus, dependendo da tecnologia utilizada, são aproveitados para a construção de um quilômetro dessa forma de pavimentação. E asfalto composto com polímeros da borracha de pneus reciclados apresenta dois fatores potenciais de uso: a grande quantidade de pneus utilizados, dando destino final a um maior número de carcaças, e melhoria das características dos ligantes asfálticos. A vida útil é 33% maior do que o asfalto tradicional. O desgaste de pneus também é reduzido.

Devido ao processo de produção, o asfalto ecológico é 50% mais caro, mas esse valor é reduzido quando são consideradas a vida útil do pavimento e a quantidade de massa asfáltica utilizada, já que a espessura do asfalto ecológico é menor que a do asfalto convencional.

O asfalto de borracha é uma forma de preparo da mistura asfáltica aproveitando resíduos sólidos (pneus, nesse caso) para aprimorar características como resistência, permeabilidade e aderência.

2.0- CONCEITOS BÁSICOS SOBRE PAVIMENTAÇÃO

2.1 - PAVIMENTO

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem de um terreno.

2.1.1 - Funções:

- Receber as cargas impostas pelo tráfego de veículos e as redistribuir para os solos da fundação (subleito);
- Proporcionar condições satisfatórias de velocidade, segurança, conforto e economia no transporte de pessoas e mercadorias.

2.1.2 - Requisitos:

- Estabilidade;
- Resistência a esforços verticais, horizontais, de rolamento, frenagem e aceleração centrípeta nas curvas,
- Durabilidade
- Regularidade longitudinal

2.2 - Classificação dos Pavimentos

Os pavimentos são classificados de acordo com a forma de distribuição de tensões, sendo:

- Pavimentos flexíveis;
- Pavimentos rígidos.

Pavimentos flexíveis: são compostos por várias camadas que devem trabalhar em conjunto, cada uma delas absorvendo parte das solicitações impostas e transmitindo o restante às camadas localizadas em níveis inferiores

Pavimentos rígidos: são constituídos basicamente por uma placa de concreto que

praticamente absorve toda a solicitação, distribuindo-a em uma grande área. Ao chegar ao subleito, a carga encontra-se suficientemente amortecida.

2.2.1- Pavimentos Rígidos

Consiste no pavimento que possui uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (Figura 2.2.1).(DNIT. Apud. BIANCHI, BRITO, CASTRO)

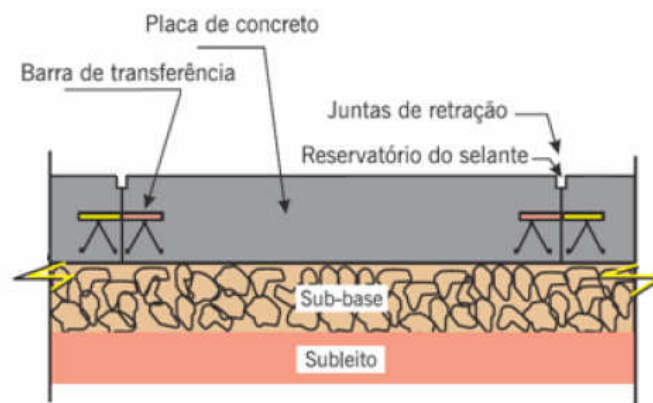


Figura 2.2.1 – Pavimento rígido (Bianchi, Brito, Castro)

São aqueles cujo revestimento é constituído de placas de concreto de cimento Portland rejuntadas entre si. Essas placas se caracterizam por :

- alta rigidez
- alta resistência
- pequenas espessuras, definidas em função da resistência à flexão

No caso dos pavimentos rígidos, o coeficiente de recalque da camada em que se apóia o pavimento tem influência decisiva nas tensões que se desenvolvem no concreto sob a ação das cargas aplicadas pelo tráfego de veículos

O coeficiente de recalque é a medida da rigidez do terreno, sendo definido como a pressão em Kgf/cm² aplicada ao terreno capaz de produzir um recalque de 1 cm.

2.2.1.2 - Vantagens do Pavimento Rígido

- Pelas suas características, o pavimento rígido, se bem projetado e construído, tem vida mais longa e maior espaçamento entre manutenções quando comparado ao pavimento flexível
- Oferece resistência ao efeito solvente dos combustíveis, como o óleo diesel e o querosene de avião

2.2.2 - Pavimentos Flexíveis

É o pavimento em que todas as sofrem deformação elástica sob o carregamento aplicado, e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalente entre camadas(Figura 2.2.2). (DNIT. Apud. BIANCHI, BRITO, CASTRO).

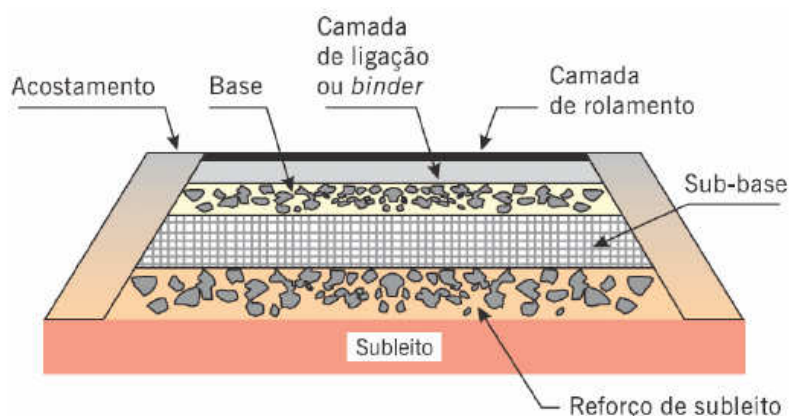


Figura 2.2.2 – Pavimento flexível (Bianchi, Brito, Castro)

- São compostos por camadas, que em geral são três: sub-base; base e revestimento;
- Essas camadas repousam sobre o subleito, que é a plataforma da estrada. Compreende a infra-estrutura implantada, bem acaba em termos de movimento de terra (limpeza, cortes e aterros) e de seu aspecto superficial
- O subleito é o terreno de fundação do pavimento.

2.2.2.1 - Descrição das Camadas de Um Pavimento Flexível

Regularização do subleito:

- Camada com espessura variável
- Executada quando se faz necessária a preparação do subleito da estrada, para conformá-lo, transversal e longitudinalmente, com o projeto pode em alguns trechos não ocorrer deve ser executada sempre que possível em aterro.

Reforço do subleito

- Camada necessária quando o subleito possui baixa capacidade de carga
- É também utilizada para redução da espessura da sub-base
- Possui espessura constante
- É construída acima da regularização e possui características técnicas superiores ao material do subleito e inferiores ao material que vier acima

Sub-base

- Camada utilizada para reduzir a espessura da base
- Exerce as mesmas funções da base, sendo complementar a esta tem como funções básicas resistir às cargas transmitidas pela base, drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água, quando for o caso

Base

Camada estruturalmente mais importante, tendo como função:

- Resistir e distribuir os esforços provenientes da ação do tráfego, atenuando a transmissão destes esforços às camadas subjacentes geralmente é construída com materiais estabilizados granulometricamente ou quimicamente, através do uso de aditivos (cal, cimento, betume etc)

Revestimento

- Destinado a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste;
- É constituído por uma combinação de agregado mineral e material betuminoso;
- Suporta e transmite as cargas aplicadas pelos veículos;
- Resiste ao desgaste imposto pelas solicitações;
- Material betuminoso (asfalto) compõe entre 5% e 10% do revestimento;
- elemento aglutinante, que liga os agregados;
- Ação impermeabilizante (oferece resistência à ação das águas provenientes das chuvas)

2.2.3- Vantagens do Pavimento Flexível

- Adaptação a eventuais recalques do subleito, pois deformam sob a ação das cargas;
- Rapidez de execução e liberação ao tráfego;
- Reparações fáceis e rápidas.

2.3- CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO

O asfalto é um resíduo derivado do refino do petróleo, que contém uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, parafínicos, aromáticos, compostos contendo carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, dentre eles, Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos - HAP (Guimarães, 2003/2004).

- Os sinônimos de asfalto são *piche* e *betume*. A produção de asfaltos no Brasil se iniciou em 1956, na Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão/SP.
- Os asfaltos podem ser encontrados em estado sólido, pastoso e líquido quando diluídos e aquecidos. Há duas classificações básicas para os asfaltos de pavimentação e industrial.

- O asfalto em estado pastoso ou líquido, usado em pavimentação, é obtido com a diluição em querosene e nafta, além de ser aquecido em tanques, antes de sua aplicação.
- O asfalto de uso industrial, mais voltado para impermeabilização e revestimento de dutos, é conhecido como asfalto oxidado, ou seja, com injeção de ar na massa asfáltica, durante sua fabricação, acrescido de pó de asfalto no revestimento externo. É muito resistente à corrosão e à água.

3.0- FORMAS DE REUTILIZAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS

3.1 - APLICAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS EM SUA FORMA INTEIRA

- Obras de contenção;
- Construção de recifes artificiais;
- Condução do escoamento superficial;
- Confecção de bueiros, utilizando pneus de caminhões.

3.2 - UTILIZAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS COMO COMBUSTÍVEL

- Em fábricas de celulose e papel;
- Em fornos de cimento;
- Em usinas termelétricas;
- Em misturas asfálticas.

3.3 - INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEUS PELA MASSA ASFÁLTICA

Na pavimentação asfáltica se utiliza na produção do asfalto ecológico, que para cada quilômetro de asfalto produzido se consome cerca de 700 pneus transformados em pó. (ANDRIETTA, 2002).

Considerando-se a pavimentação de 4000 Km de rodovias por ano: isso significa se consome milhões de pneus por ano, incorporados em pavimentos. Dessa forma percebe-se a importância ambiental do desenvolvimento de pesquisas visando à utilização da borracha triturada de pneus inservíveis em obras de pavimentação.

4.0 - HISTÓRIA DA BORRACHA E O PROBLEMA AMBIENTAL

Esse grande avanço só foi possível devido norte-americano Charles Goodyear (inventor do pneu), que descobriu o processo de vulcanização da borracha ao deixar o produto, misturado com enxofre, cair no fogão. Mal sabia ele que sua invenção revolucionara o mundo. A borracha, além de ser mais resistente e durável, absorve melhor o impacto das rodas com o solo, fato esse que tornou o transporte muito mais prático e confortável. (SENAI-PR, 2001).

Juntamente, com a revolução no setor dos transportes, a utilização dos pneus de borracha trouxe consigo a problemática do impacto ambiental (Figura 4.0), uma vez que a maior parte dos pneus descartados é abandonado em locais inadequados, causando grandes transtornos para a saúde e para a qualidade da vida humana. (SENAI-PR, 2001).

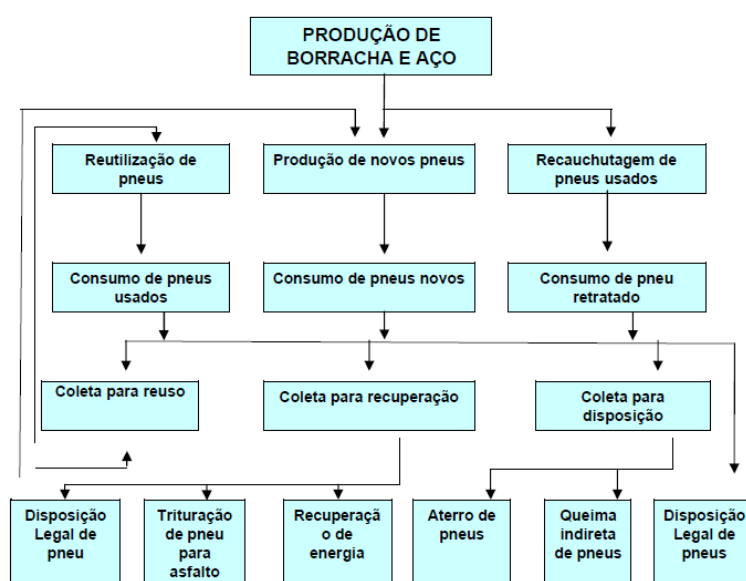


Figura 4.0 - Esquema do ciclo de vida de um pneu. (COMLURB, 2002)

Existem dois tipos de pneu o radial e o diagonal – o radial possui uma estrutura interna de aço, o que dificulta um pouco mais o processo de reciclagem, assim como exige máquinas mais sofisticadas para fazer a separação do aço, incorrendo num custo mais alto para a trituração. Um pneu de caminhão pode esconder até 22 cabos de aço. O tipo diagonal tem uma estrutura interna à base de tecidos, sendo assim bem mais fácil de reciclar (FIEP, 2001).

4.1 - A PREOCUPAÇÃO COM A QUESTÃO AMBIENTAL

É considerada a destinação mais agressiva ao meio ambiente o descarte de pneus ao ar livre, nos campos, matas, rios, córregos, lagos e mesmo áreas desertas. Devido à falta de uma ação governamental para o controle da destinação adequada desses resíduos, os pneus geralmente são armazenados em fundos de quintais, borracharias, ferro-velho e recauchutadoras ou são lançados em terrenos baldios, cursos de água e beiras de estradas (Figura 4.1a).



Figura 4.1a- Disposição de carcaças de pneus em terreno baldio e no rio. (BRITO, 2002 e ODA,2000)

As pilhas de pneus representam riscos constantes de incêndios (Figura 4.1 b) é sempre iminente, durando semanas até ser extinto, exalando gases tóxicos e fumaça negra na atmosfera, que são de difícil controle, produzem grande quantidade de fumaça tóxica (dióxido de enxofre) e deixam como resíduos óleos que podem contaminar as águas subterrâneas (EPPS, 1994, apud BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002). Devido ao formato chuva, propiciando um ambiente ideal para a procriação de mosquitos, roedores e

outros vetores de doenças como mosquito *Aedes aegypti*, transmissor da dengue e da febre amarela urbana. (BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002).



Figura 4.1 b- Incêndio de pneus causa a contaminação do ar, da água e do solo. (ODA,2000)

4.2 – APRIMORAÇÃO DE PNEUS INSERVIVEIS PELA CONSTRUÇÃO CIVIL

O pneu é contato entre o veículo e o solo, que transmite e recebe esforços provenientes de acelerações, desacelerações e impactos.

O pneu é constituído fundamentalmente de borracha natural ou sintética, hidrocarbonetos, e negro de fumo. A borracha representa um total de 85% a 90% do pneu. O aço é considerado como material complementar (MARQUES; 2005). A (figura 4.2a) mostra a composição de um pneu novo (MARQUES; 2005).

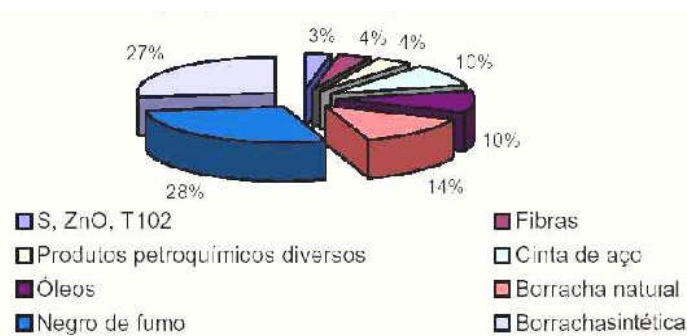


Figura 4.2a- Composição média de um pneu novo (MARQUES, 2005).

Os componentes estruturais da borracha são compostos por rayon, nylon e mais recentemente polyester, de forma a definir a posição do aço na estrutura interna da roda. Na figura 4.2b é apresentado o corte de um pneu radial de automóvel com suas partes e respectivos materiais componentes.

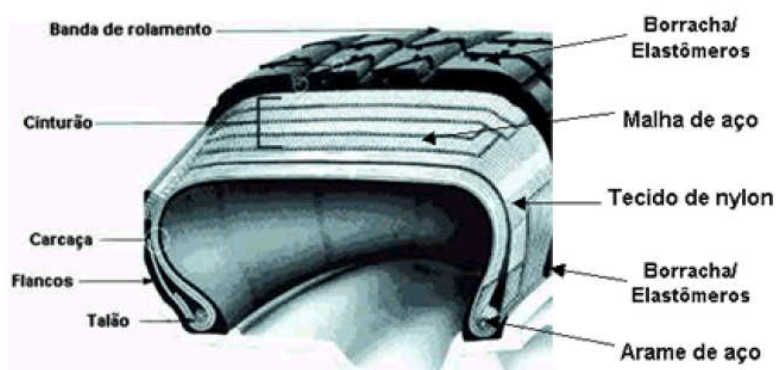


Figura 4.2b- Corte de um pneu radial de automóvel. (ANDRIETTA)

4.2.1 – Processo de Reutilização, Reciclagem e Disposição de Pneus.

(SILVA, 2004) divide a metodologia de utilização de pneus usados em três categorias: reutilização, reciclagem e valorização energética. Na reutilização, são aproveitados os pneus inteiros. Na reciclagem são transformados em um novo produto a partir de métodos físicos e/ou químicos (por exemplo: tapetes, barreiras de choque). Por sua vez na valorização energética, os pneus são utilizados na geração de energia calorífica devido ao seu elevado poder calorífico (aproximadamente 8170 Kcal/Kg, superior ao do carvão).

A destinação dos pneus inservíveis para pavimentação asfáltica, melhora a resistência à frenagem, reduz a fissuração por fadiga, resultando no aumento da vida útil do pavimento. (SIDDIQUE et al., 2004).

A reciclagem de pneus envolve um ciclo que compreende a coleta, o transporte, a trituração e a separação de seus componentes (borracha, aço, náilon, ou poliéster), transformando sucatas em matérias primas para o mercado. (BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002). A figura 4.2.1 apresenta um esquema da destinação final dos pneus descartados.

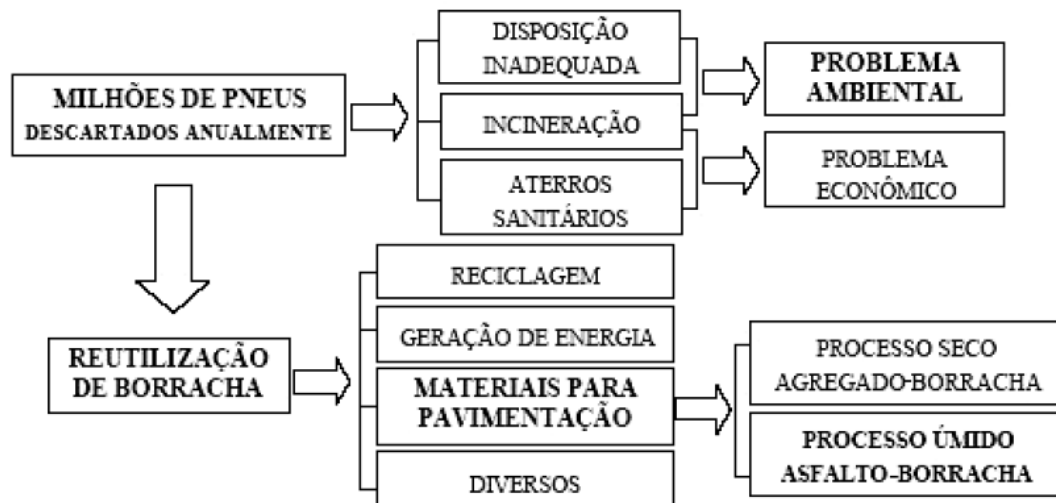


Figura 4.2.1- Esquema da destinação final dos pneus inservíveis. (ODA,2000)

4.2.2 - Processo de Trituração de Pneus

Os pneus são recebidos inteiros e podem ser submetidos a uma limpeza prévia materiais que os acompanhem e que possam danificar os equipamentos trituradores, tais como pedras ou peças metálicas. Podem ainda ser separados de acordo com a sua natureza, em especial: pneus ligeiros ou de turismo e pneus pesados. A composição é ligeiramente diferente, os pneus pesados. Mas sobretudo é significativa a diferença de dimensões e de massa por unidade.

Após a limpeza os pneus são triturados, rasgados em grandes dimensões, chamados chips. Aos pneus pesados pode ser extraído o talão antes desta primeira operação de trituração. Estes chips são depois encaminhados para moinhos e, posteriormente ao túnel criogênico onde a borracha triturada é arrefecida a uma temperatura abaixo de menos -120°C , utilizando CO_2 sólido ou nitrogênio líquido.

Devido ao contato com o nitrogênio líquido, os materiais passam pelo processo de secagem para retirar a umidade.

Logo após, o aço e o nylon do pneu são separados da borracha através da separação magnética e por aspiração (ciclone) respectivamente. A borracha

moída passa por um classificador que permite obter determinados intervalos de granulometria.

Sabendo o processo de classificação da granulometria da borracha, podem-se aplicar os variados tipos de granulometria na produção do ligante asfáltico da borracha.

De acordo com Mirante (2004) e Andrieta (2002), a recuperação consiste em uma primeira fase da trituração em pedaços de granulometria elevada, posteriormente o material resultante da primeira fase do processo é triturado novamente, o que resultará em um material com uma granulometria inferior, e assim sucessivamente (FIGURA 4.2.2). Destas diferentes moagens se obtém os vários granulados de borracha até chegar no pó fino de borracha. Esta borracha está na forma vulcanizada, portanto não sofre modificação e não é separada dos demais compostos.



Figura 4.2.2- Processo de trituração de pneus. (LAGUNO,2000)

PÓ DE BORRACHA COM DIÂMETRO ENTRE 0,3 E 2 MM

Utilizado como matéria-prima para a fabricação de: adesivos; vinil; lubrificantes para a indústria de plástico; fabricação de peças da borracha, retentores com

diâmetro inferior a 0,3 cm; pastilhas e lonas de freio; tintas; tijolos de alta resistência; látex; goma para adesivos; pneus (adicionado 10%).

GRANULADO DE BORRACHA COM DIÂMETRO ENTRE 1,5 E 3 MM

Utilizado como matéria-prima para a fabricação de produtos de borracha como: pavimentação (misturado com o asfalto, agregado borracha).

GRANULADO DE BORRACHA COM DIÂMETRO ENTRE 4,0 E 7,0 MM

Utilizado basicamente em três formas: como matéria-prima na fabricação de produtos de borracha: tapetes; pallet's; coxins automotivos; correias automotivas e industriais; tijolos para queima, alimentação de caldeiras e fornos em geral. Na forma de complemento na fabricação de produtos como: Tubos; bombas; encanamentos, retentores de motor, mantas de isolamento acústico e térmico; cintas para reboque e levantamento de cargas; sinalização de solo para tráfego, etc. Na mistura com xisto, onde dá origem a gases e óleos combustíveis.

4.2.2.1 - Classificação da Granulométrica da Borracha

A granulometria da borracha tem papel fundamental no desempenho do asfalto-borracha. Segundo ROBERTS et al. (1996) apontam durabilidade, estabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, vida de fadiga, aderência, resistência à umidade e rigidez como propriedades influenciadas pela granulometria da mistura.

Após a trituração, a borracha moída passa por um classificador que permite obter determinados intervalos de granulometria. Sua determinação é feita a partir da quantificação de matéria que consegue ultrapassar as malhas de peneiras diferentes. Podem-se classificar as malhas pelo número de aberturas por polegada linear denominado "mesh" (representado pelo símbolo #) ou valor (em escala métrica) da abertura da mesma. Quanto maior o "mesh",

maior o número de aberturas e, conseqüentemente, mais fino deverá ser o grão para que passe por ela.

Sabendo o processo de classificação da granulometria da borracha, podem-se aplicar os variados tipos de granulometria na produção do ligante asfáltico de borracha.

4.2.2.2- Produção do Ligante Asfáltico de Borracha

O ligante asfáltico (cimento asfáltico de petróleo – CAP) é um composto obtido através do refinamento do cru de petróleo. Possui a cor negra e tem uma elevada viscosidade.

Em meio à necessidade da busca de tecnologias que permitam a destinação final de resíduos sólidos, principalmente os pneus inservíveis, foi desenvolvido uma técnica para reutilização destes pneus na melhoria do ligante asfáltico.

Nesta técnica (trituração de pneus) a borracha já triturada é adicionada diretamente ao ligante asfáltico.

Na mistura direta ao ligante, chega-se a um produto final caracterizado como asfalto-borracha, que tem como objetivo principal melhorar as propriedades físicas, químicas e reológicas dos ligantes asfálticos. Todavia, um dos pontos críticos na utilização deste ligante modificado é sua alta viscosidade em altas temperaturas, o que se faz necessário uma criteriosa escolha na granulometria das partículas da borracha (PATRIOTA, M; MOTA, M.; FILHO, I. 2004).

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

Segundo EPPS (1994), o tipo de borracha, função da porcentagem de borracha natural e sintética, pode influenciar a viscosidade a 60°C e a ductilidade do ligante asfalto-borracha.

A principal diferença entre a produção de uma mistura asfáltica com ligante asfalto-borracha e uma mistura asfáltica convencional é a pré-mistura (reação da borracha com o ligante asfáltico) para produzir o ligante asfalto-borracha.

Os componentes devem ser misturados com freqüente agitação para que a borracha seja incorporada ao ligante asfáltico (ZAMAN et al., 1995).

O aquecimento do ligante visa à obtenção da viscosidade adequada, de forma a facilitar a mistura e incorporação da borracha ao ligante asfáltico. O tempo de reação, por sua vez, é função do teor e granulometria da borracha, do tipo de cimento asfáltico e da temperatura de mistura. Entretanto, deve-se tomar cuidado com a temperatura da mistura, pois uma temperatura muito elevada irá reduzir a qualidade do ligante asfalto-borracha em razão da perda de voláteis e envelhecimento acelerado (PAGE et al., 1992).

4.2.3- Asfalto Modificado Com Polímero

Inicialmente, o ligante asfalto-borracha foi desenvolvido para ser usado em atividade de manutenção e reabilitação e para tentar prolongar a vida de um pavimento, posteriormente passou a ser utilizado de várias outras maneiras na pavimentação asfáltica. (MORRIS e Mc DONALD, 1976 apud ODA, 2000).

O asfalto especial, que pode receber até 20% de borracha, também reduz o acúmulo de água após uma chuva, evitando aquaplanagem e acidentes. Isso ocorre porque a borracha possibilita gerar misturas asfálticas com mais poros. A água entra por esses minúsculos espaços e pode ser carregada para uma saída lateral nas pistas.

A modificação do ligante asfáltico proporciona uma série de ganhos em termos estruturais para a mistura asfáltica, tais como:

- Menor suscetibilidade térmica;

- Maior resistência à deformação permanente;
- Maior resistência ao trincamento por fadiga (evitando a reflexão de trincas);
- Espessura de película maior (revestimentos drenantes);
- Menor envelhecimento por oxidação, etc.

A modificação de asfalto se dá através de processo de mistura em tanques especialmente projetados para este objetivo. O qual consiste na adição de polímero e aditivos ao asfalto, obtendo-se assim o asfalto modificado por polímeros. A modificação dos ligantes asfálticos tradicionais possibilita a utilização de misturas asfálticas de alto desempenho com a utilização de composições granulométricas tanto contínuas como descontínuas estas podem ser densas ou abertas, proporcionando, respectivamente, maior capacidade de suporte a deformações permanentes e ao trincamento por fadiga e a drenabilidade do revestimento. Estas podem ser:

- Camadas porosas;
- Misturas descontínuas especiais; e,
- Misturas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt). (GRECA: 2007)

O asfalto-borracha é uma mistura efetuada a quente, sob condições controladas, de ligante asfáltico (cimento asfáltico de petróleo – CAP), borracha moída de pneus (BMP), onde o teor da borracha varia de 15% a 20% em relação ao peso total da mistura, diluentes e alguns aditivos especiais se houver necessidade (PETROBRÁS, 2003).

Segundo Morilha Jr. e Greca (2003), duas são as maneiras mais empregadas de adição da borracha de pneus às misturas asfálticas.

A borracha de pneus usada como modificador de ligante asfáltico pode ser adicionada através da mistura com o ligante asfáltico antes da adição do

agregado (processo úmido), obtendo-se o asfalto-borracha, ou como parte do agregado. (processo seco) dando origem à borracha-agregado (Figura 4.2.3). (ODA e FERNANDES JR, 2000).

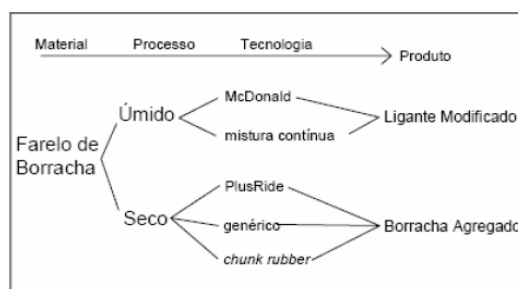


Figura 4.2.3- Processo de mistura asfáltica com partículas de borracha. (Fonte: SPECHT, 2004).

4.2.3.1- Processo Seco

No processo seco de incorporação da borracha de pneus em concreto asfáltico a borracha é utilizada como um aditivo ao agregado, obtendo-se assim a borracha-agregado (Figura 4.2.3.1). As partículas de borracha substituem no máximo 5% dos agregados. Este processo utiliza de duas a quatro vezes mais quantidade de borracha de pneus que o processo úmido. (SPECHT, 2004).

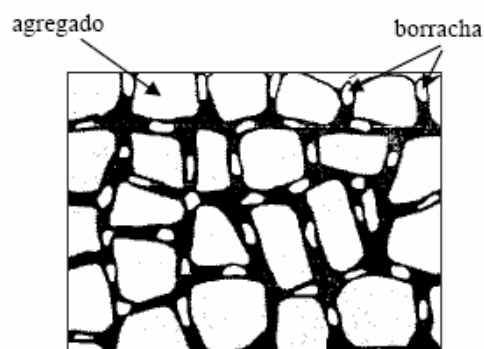


Figura 4.2.3.1- Mistura asfáltica com partículas de borracha. (Fonte: SPECHT, 2004).

A interação entre a borracha e o ligante é muito pequena, não sendo então transmitidos para o asfalto os inibidores de raios ultravioletas e os antioxidantes presentes na borracha. As misturas produzidas através deste processo só devem ser usadas em misturas asfálticas a quente (Concreto Asfáltico), não devendo ser usadas em misturas a frio. (SPECHT, 2004).

Segundo Balbo (2007), a borracha de pneus como agregado nas misturas asfálticas é incorporada em geral com diâmetro superior a 0,42 mm, podendo alcançar 9,5 mm. Naquelas misturas que usam borrachas com distribuição granulométrica mais grossa verifica-se acréscimo de deformações plásticas, apesar de ocorrer também um aumento da elasticidade do material.

Specht (2004) afirma que a incorporação da borracha através do processo seco melhora as características de resistência à fadiga e o trincamento térmico devido à menor sensibilidade às variações de temperatura, ficando evidente melhor característica funcional em revestimento tipo borracha-agregado que em concretos asfálticos convencionais.

A borracha triturada é introduzida diretamente no misturador da usina de asfalto. Neste caso a borracha entra como um agregado na mistura com o ligante asfáltico.

4.2.3.2- Processo Úmido

Neste processo a borracha de pneu é misturada primeiramente com o ligante. Ocorre a transferência das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original. (GRECA ASFALTOS, 2003). Este processo dá origem ao ligante denominado asfalto-borracha, sendo definido pela ASTM D 6114-97 como:

Mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada e certos aditivos, dos quais o percentual de borracha deve ser pelo menos 15% em massa do total da mistura e sofrer reação com o ligante asfáltico aquecido de forma a causar um inchamento das partículas de borracha. (SPECHT, 2004, p.51).

Antes de ser produzido o asfalto-borracha, deve ser verificado primeiramente a compatibilidade entre a borracha e o asfalto. O tipo e a quantidade de óleos aromáticos presentes no ligante desempenham um papel significativo na determinação desta compatibilidade. Para melhorar a compatibilização entre o

ligante e a borracha pode ser utilizado um óleo extensor, que ainda serve para diminuir a viscosidade do ligante asfalto-borracha. (PINHEIRO, 2004). De acordo com Morilha (2004), a principal finalidade da adição do óleo extensor na fabricação do asfalto-borracha é minimizar a absorção das frações mais leves do asfalto pela borracha.

Abdelrahman e Carpenter (1999 apud PINHEIRO, 2004) descrevem a interação entre o ligante asfáltico e a borracha por dois mecanismos, desvulcanização e despolimerização, ambos considerados como reações químicas que reduzem o peso molecular da borracha quebrando suas ligações químicas.

Apesar de a literatura não distinguir bem estes dois processos, sabe-se que a desvulcanização quebra as ligações enxofre-enxofre ou carbono-enxofre, formadas na vulcanização da borracha durante a produção dos pneus, e que estes dois processos são essenciais para se obter um ligante com estabilidade à estocagem.

A reação entre a borracha e o CAP se dá mediante a absorção de óleos aromáticos do CAP à cadeia de polímeros da borracha natural e sintética. (LEWANDOWSKI (1994) e ABDELRAHMAN (1996), apud PINHEIRO, 2004). A borracha é inchada a altas temperaturas formando assim um gel viscoso e aumentando a viscosidade do material. (MORILHA, 2004)

Segundo Oda (2000), o grau de modificação do ligante depende de diversos fatores além da compatibilidade com a borracha, como: o tamanho e textura da borracha, o teor de ligante, tempo e temperatura de reação, a energia mecânica durante a mistura e reação e o uso de aditivos (Figura 4,2.3.2).

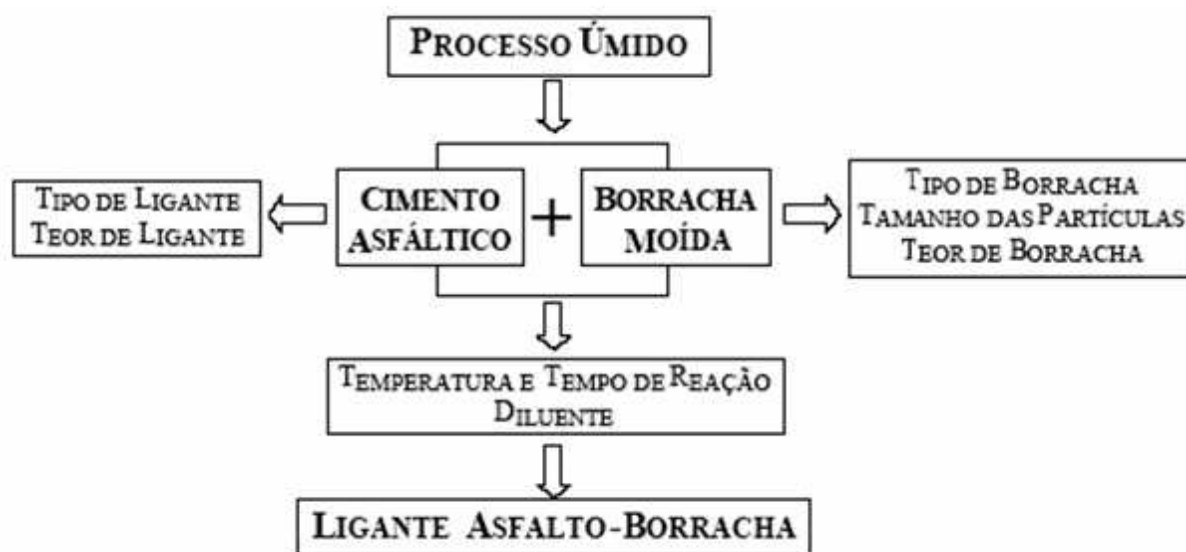


Figura 4.2.3.2- Fatores que influenciam o ligante asfalto-borracha. (Fonte: ODA, 2000).

A borracha empregada para a produção do asfalto-borracha pode ser proveniente tanto de pneus de automóveis como de pneus de caminhões, como visto anteriormente, podendo ser usada também uma mistura de borracha de pneus de caminhões e pneus de automóveis. (ODA, 2000).

De acordo com Ruth et al. (1997, apud ODA, 2000), uma maior quantidade de borracha natural é encontrada nos pneus de caminhões, enquanto a borracha sintética é encontrada em maior quantidade nos pneus de automóveis. Segundo Roberts et al. (1989 apud SPECHT, 2004), quanto maior os teores de borracha natural no asfalto-borracha, melhores são as características da mistura resultante.

Conforme Roberts e Lytton (1987, apud ODA, 2000), a composição química da borracha depende do seu processo de produção e influencia a elasticidade do asfalto-borracha e a estabilidade do produto.

Em relação ao tamanho das partículas de borracha, Oda (2000) diz que pode variar com o seu processo de produção, processos que diferem pelo tipo de equipamento, temperatura, etc. Os dois processos existentes para moer a borracha são: a trituração à temperatura ambiente (processo mecânico) e o processo criogênico.

O processo mecânico é feito em temperatura ambiente consistindo em uma série de trituradores, peneiras, correias transportadoras e tambores magnéticos para promover a remoção do aço. Existem três tipos de processos mecânicos, que se diferenciam pelo tamanho das partículas: *crackermill*, que produz partículas de 4,8 até 0,42 mm, *granulator*, partículas que variam de 2,0 a 9,5 mm e o “micro-mill” que produz partículas entre 0,42 e 0,075 mm. (ODA, 2000).

No processo criogênico, a borracha de pneu é submersa em nitrogênio líquido, pois abaixo de -60°C ela se torna muito frágil passando pelos moinhos de martelo que reduzem as partículas a tamanhos finos ou superfinos (usado para a produção do asfalto-borracha). (ODA, 2000).

A borracha de pneus inservíveis utilizada deve ser uniforme, tanto física como quimicamente, facilitando a mistura e tornando o processo constante, ser livre de metais e conter baixos teores de fibras. Assim, de acordo com a ASTM D 6114-97, deve possuir no máximo 0,75% de umidade, massa específica de $1,15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05$ e conter no máximo 0,01 de metais. É permitido que se acrescente até 4% de material inerte fino (como talco) para prevenir o empolamento das partículas de borracha. (SPECHT, 2004).

Já que o asfalto é um material de consistência semi-sólida à temperatura ambiente, para facilitar a mistura e incorporação da borracha moída, é necessário torná-lo fluido aquecendo-o até ser atingida a viscosidade adequada. A borracha adicionada também é aquecida previamente, devendo ser misturada ao ligante por um tempo suficiente para que resulte um produto uniforme com consistência homogênea. (ODA, 2000).

Os componentes devem ser misturados com freqüente agitação, não excedendo a temperatura e o tempo de reação. O equipamento misturador deve possuir um sistema para controlar a temperatura e tempo, assim como um sistema de agitação que evite a segregação das partículas de borracha. (ZAMAN et al., 1995 apud ODA, 2000).

De acordo com Pinheiro (2004) deve-se ter um cuidado especial com a temperatura de reação, pois temperaturas elevadas podem provocar o envelhecimento precoce do CAP, mudando assim suas características. Specht (2004) afirma que estes dois fatores, temperatura e tempo de reação, dependem principalmente da granulometria da borracha, que quanto mais fina, maior a área superficial e menor o tempo e temperatura da mistura para se obter um material homogêneo.

O asfalto-borracha, dependendo do seu processo de fabricação, por ser estocável e não estocável. O sistema estocável (*terminal blending*) é preparado com borracha de pneus finíssima (partículas passantes na peneira no40 – 0,42 mm) e misturado em um terminal especial, obtendo como resultado um ligante estável que posteriormente é transportado para cada obra (Figura 4.2.3 a e Figura 4.2.3.2b). O controle de qualidade neste sistema é mais acurado e confiável, além de ser um sistema mais econômico em relação ao tempo e aos custos, pois o ligante é produzido e transportado para várias obras ao mesmo tempo. O sistema não-estocável (*continuous blending*) é produzido com equipamento misturador na própria obra, devendo ser aplicado imediatamente devido à sua instabilidade, apresentando características diferentes do asfalto-borracha estocável. (BERNUCCI, et al., 2006).

A fim de se obter a desvulcanização e a despolimerização da borracha de pneu, o asfalto-borracha estocável deve ser processado em altas temperaturas por agitação em alto cisalhamento, permitindo-se assim a reação da borracha com as moléculas do CAP e obtendo-se um produto final com menor viscosidade. (BERNUCCI, et al., 2006).

Existe também um processo de mistura via úmida imediatamente antes da usinagem em equipamentos especiais. Estes equipamentos são acoplados às usinas de concreto asfáltico e a borracha moída só é adicionada ao CAP minutos antes de ele ser incorporado ao agregado. (BERNUCCI, et al., 2006).

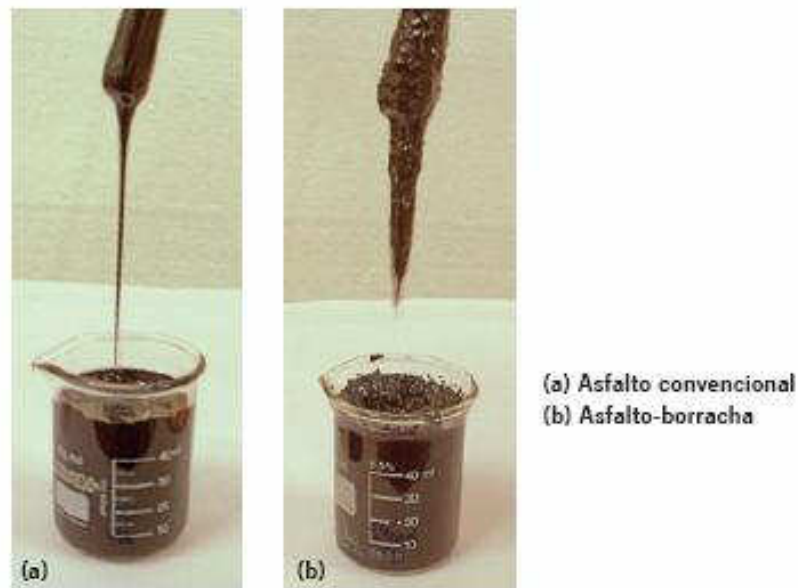


Figura 4.2.3.2a- Comparação de consistência entre asfalto-borracha e asfalto convencional no momento de usinagem. (Fonte: BERNUCCI, et al., 2006).

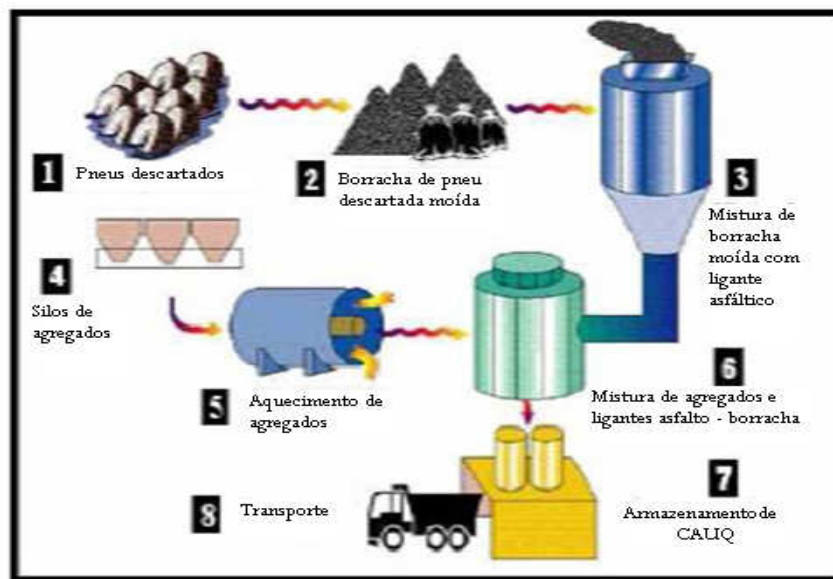


Figura 4.2.3.2b- Processo de mistura estocável do asfalto-borracha. (Fonte: BERNUCCI et al., 2006).

A borracha é previamente misturada ao ligante, modificando-o permanentemente. Nesta modalidade ocorre a transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original.

Este material que, acredita-se, possuir características bastantes favoráveis, aliadas ao seu custo reduzido e a sua maior durabilidade frente ao concreto asfáltico usinado a quente tradicional (CAUQ), também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), pode transformar-se numa excelente alternativa para a recuperação de pavimentos deteriorados, bem como, a execução de novos pavimentos, seja em rodovias, vias urbanas, etc. (SALINI e MARCON, 1998).

4.2.4- Vantagens Técnicas Previstas

A modificação dos ligantes asfálticos utilizados em pavimentação, com borracha de pneus, é uma alternativa atraente para o melhoramento das propriedades dos materiais betuminosos, já que como resultado obtém-se um revestimento com características técnicas superiores às verificadas em misturas asfálticas convencionais. (GRECA ASFALTOS, 2003).

Segundo Zanzotto & Svec (1996) apud Morilha Jr. e Greca (2003), o ligante modificado por borracha granulada de pneus ou simplesmente asfalto-borracha, apresenta algumas vantagens principais com a sua utilização, mostrada a seguir.

Como decorrência das vantagens apontadas anteriormente podemos descartar também:

- Redução do envelhecimento;
- Aumento da flexibilidade e Viscosidade;
- Aumento do ponto de amolecimento;
- Redução da suscetibilidade térmica;
- Redução da espessura do pavimento asfáltico construído;
- Melhor Adesividade aos agregados;
- Maior resistência à trincas, por fadiga;
- Maior poder impermeabilizante;

- Redução da poluição em rios, lagos, aterros, e do foco da criação de insetos;
- Redução da demanda de petróleo devido a adição da borracha e a durabilidade;
- Outro fator importante é a contribuição para a redução de CO₂ na atmosfera;
- Aumento da vida útil do pavimento;
- Melhor aderência pneu-pavimento proporcionada no uso;
- Redução do ruído provocado pelo tráfego entre 65% e 85%;
- Redução da aquaplanagem e do efeito “spray” sob chuva (névoa que se forma quando o veículo passa sobre o asfalto molhado), o que contribui para a redução no número de acidentes e de vítimas fatais nas rodovias.

De acordo com ODA (2000), o ligante asfalto-borracha tem sido aplicado em vários serviços de pavimentação, não ficando só restrito às atividades de reabilitação (remendo, selante de trincas e juntas), mas também têm sido utilizado em tratamento superficial (SAM), transição entre pavimento existente e camada de reforço (SAMI) e revestimento de concreto asfáltico. Apresenta-se, a seguir, uma síntese das principais formas de aplicação do ligante asfalto-borracha. A sua relação custo benefício é vantajosa sobre os ligantes convencionais devido ao baixo custo de manutenção ao longo dos anos. (GRECA ASFALTOS, 2003).

4.2.4.1- Redução do Envelhecimento

Mistura com ligantes asfalto borracha são mais resistentes às variações de temperatura, quer dizer, o seu desempenho tanto altas como as baixas temperaturas é melhor quando comparado com pavimentos construídos com ligante convencional.

O envelhecimento, de acordo com Tonial (2001), é o processo que o CAP sofre durante sua estocagem, manuseio, aplicação e em serviço, e que

provoca um aumento de sua consistência. A temperatura do ligante e o seu grau de exposição com o oxigênio do ar são os principais fatores que influenciam o envelhecimento.

Pinheiro (2004) diz que o envelhecimento é devido a fatores físicos e/ou químicos. O envelhecimento químico é representado principalmente pela oxidação, reação na qual o oxigênio reage com o carbono, enxofre e nitrogênio aumentando a polaridade das moléculas do ligante fazendo com que haja maior associação entre elas, aumentando assim a sua rigidez. Já o envelhecimento físico se deve à perda de voláteis (frações mais leves do ligante asfáltico), durante as fases de usinagem e transporte da mistura.

Segundo Balbo (2007,) “o envelhecimento do CAP decorrente da oxidação do material, pode ser rápida ou lenta, tornando-o duro ou quebradiço”.

Tonial (2001) diz que quanto maior a temperatura e a superfície específica de um ligante, maior o seu grau de oxidação.

O envelhecimento provoca uma redução da ductilidade e da recuperação elástica do ligante. Esta redução contribui decisivamente para o enrijecimento do revestimento que, em função da deformabilidade da estrutura subjacente, pode ter sua vida útil reduzida. (GRECA ASFALTOS, 2003).

O ligante asfalto-borracha proporciona uma redução do envelhecimento por oxidação devido à presença de antioxidantes e carbono na borracha de pneus. (ODA, 2000).

De acordo com a Greca Asfaltos (2003), o envelhecimento é minimizado com a utilização do asfalto-borracha, tendo em vista dois fatores:

- A espessura da película sobre o agregado é maior àquela encontrada com ligantes convencionais, garantindo um menor envelhecimento do ligante durante a usinagem.
- O asfalto-borracha, após o ensaio *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), que simula o envelhecimento, apresenta ganho na recuperação elástica, diferentemente dos ligantes convencionais e os modificados por polímeros. (MORILHA E TRICHÊS, 2003 apud GRECA ASFALTOS, 2003).

A presença de antioxidantes e carbono na borracha de pneus auxilia na redução do envelhecimento por oxidação.

4.2.4.2- Redução a Suscetibilidade Térmica

“A suscetibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura”. (BERNUCCI, et al., 2006).

O CAP apresenta comportamento termoplástico, ou seja, a temperaturas mais elevadas torna-se menos viscoso (mais mole). A suscetibilidade térmica é importante, já que o CAP deverá estar em estado líquido para que possa envolver os agregados e permitir o seu deslocamento durante a compactação das misturas betuminosas. No entanto, deve ser viscoso em temperatura ambiente de forma que não ocorra a perda do envolvimento aos agregados. (BALBO, 2007).

Os asfaltos modificados com borracha proporcionam misturas asfálticas mais resistentes às variações de temperatura. O desempenho a baixas temperaturas assim como o desempenho a altas temperaturas é melhor quando comparado com pavimentos construídos com ligante asfáltico convencional (HEIZTMAN, 1992a, RUTH et al., 1997 apud ODA, 2000).

4.2.4.3- Maior Resistência às Deformações Permanentes nas Trilhas de Roda

A deformação permanente nas trilhas de roda é uma distorção que se manifesta sob a forma de depressões longitudinais. Inicialmente, na maioria dos casos, os afundamentos em trilha de roda (ATR) (Figura .4.2.4.3) são praticamente imperceptíveis e sendo somente notados na ocorrência de chuvas através do acúmulo de água. (GONÇALVES, 1999).

A adição de borracha de pneus ao ligante asfáltico faz com que o ponto de amolecimento (o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido) do

ligante asfalto borracha aumente em até 17°C em relação ao ponto de amolecimento do ligante convencional, significando em um aumento da resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de rodas. (SALTER e MAT, 1990 apud ODA,2000).



Figura 4.2.4.3- Deformações em trilhas de roda de pavimentos. (Fonte: BALBO, 2007)

4.2.4.4- Aumento da Resistência à Fadiga

Segundo Gonçalves (1999), a fadiga é a deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas, e que após certo número de repetições do carregamento resulta em trincas ou em fraturas completas.

Este fenômeno está relacionado ao fato de que muitos materiais ao serem solicitados sucessivamente em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura, desenvolvem pouco a pouco alterações em sua estrutura interna, perdendo suas características estruturais originais. (BALBO, 2007).

O efeito da fadiga se manifesta nos pavimentos flexíveis por meio do surgimento de trincas conhecidas como “trincas de jacaré” (Figura 4.2.4.4), e a intensificação deste fenômeno separa os blocos do revestimento provocando a não transmissão de carga entre eles. (BERNUCCI, et al., 2006, MORILHA, 2004).

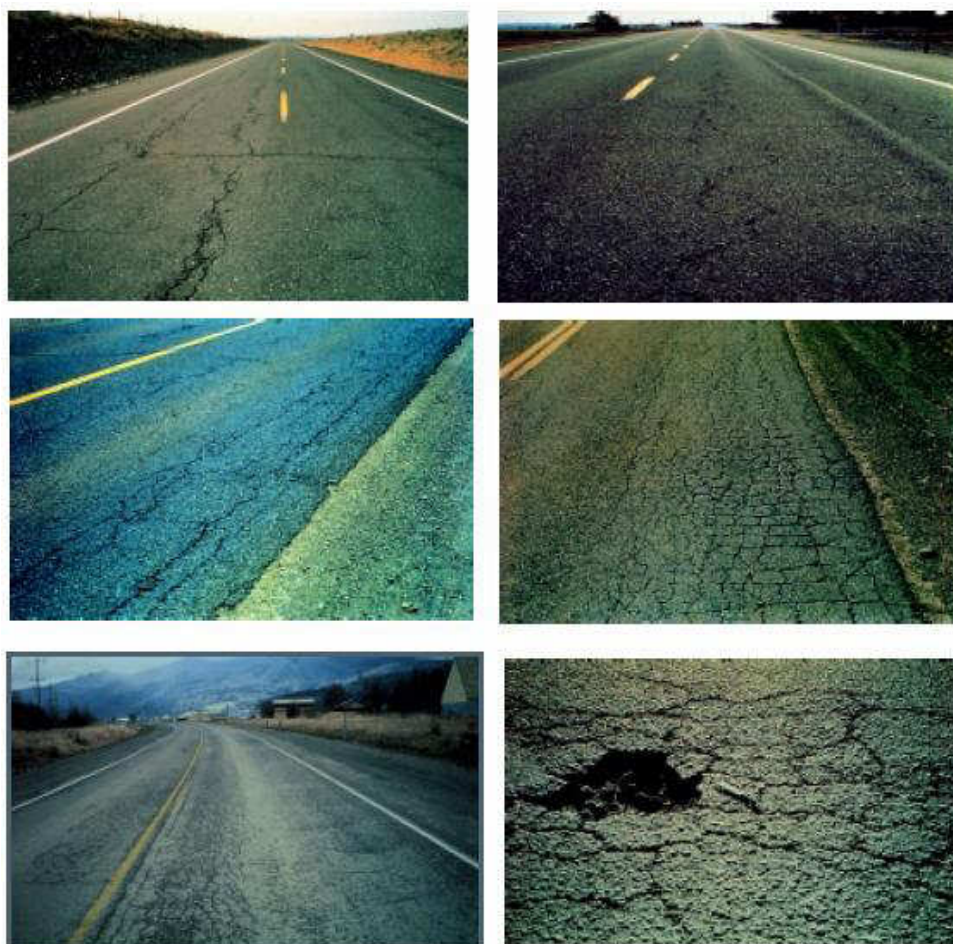


Figura 4.2.4.4– Progressão das trincas de fadiga nos pavimentos flexíveis. (GONÇALVES, 1999).

De acordo com Medina (1997) as trincas começam nas fibras inferiores da camada do revestimento asfáltico se propagando para cima por toda a espessura, até surgirem trincas na superfície. Nos revestimentos muito espessos (20 cm), podem iniciar na superfície devido à curvatura convexa próximo às rodas dos veículos.

As características à fadiga dos pavimentos são expressas em relação à tensão ou deformação atuante e o número de repetições de carga até a sua ruptura,

correlações que são determinadas através de diversos ensaios de carregamento repetido. (SPECHT, 2004).

A resistência à fadiga é a habilidade intrínseca de um material se deformar sob carregamento repetido sem romper, resistência esta que é aumentada com a incorporação da borracha de pneus ao CAP. (SPECHT, 2004).

Devido à maior concentração de elastômeros na borracha de pneus e à melhor adesividade do ligante aos agregados, ocorre um aumento da flexibilidade da mistura resultante, proporcionando maior resistência à propagação de trincas. (MORILHA, 2004).

4.2.4.5- Aumento da Flexibilidade e Viscosidade

Acontece devido a maior concentração de elastômeros na borracha de pneus e a melhor adesividade do ligante aos agregados proporcionando maior resistência a propagação de trincas.

4.2.4.6- Aumento do Ponto de Amolecimento

O ligante asfalto-borracha possui um ponto de amolecimento maior que o do ligante convencional melhorando a resistência da formação de trilhas de roda. (BERTOLLO, S. A. M - 2002).

O ponto de amolecimento de um material, no ensaio anel e bola, é o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. É a temperatura lida no momento em que uma esfera metálica padronizada atravessa um anel, também padronizado, cheio de material asfáltico e toca uma placa de referência, após ter percorrido uma distância de 25,4 mm (ABNT/MB-164/NBR 6560, 1972). Quanto mais alta a temperatura do ponto de amolecimento, mais resistente à deformação permanente é a mistura.

4.2.5- Selante de Trincas, Juntas e Remendos

Quando uma trinca se torna visível no asfalto, é sinal de que, por baixo, o pavimento já está bastante danificado. A pressão em cima do pavimento força a abertura de trincas nas camadas inferiores, que se quebram. No entanto, também é possível que a rachadura surja de cima para baixo. Se a estrada for muito rígida, uma carga elevada tende a abrir uma fenda na lateral de onde o pneu passa. Esses dois fenômenos foram estudados sob o olhar da mecânica dos pavimentos e vão ajudar a prever trincas e entender o comportamento de uma rodovia ao longo dos anos.

Segundo ESTAKHRI et. al. (1992) apud ODA (2000), o ligante asfalto-borracha é um dos melhores selantes de trincas existentes, tanto de pavimentos asfálticos como de pavimentos de concreto de cimento portland, sendo recomendado fazer a selagem com auxílio de um aplicador manual (figura 4.2.5).



Figura 4.2.5- Aplicação de selagem de trincas. (GRAFTO,1980 apud ODA, 2000)

4.2.6- Tratamento Superficial (SAM)

Geralmente usado para prevenir e/ou retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos asfálticos. Consiste em distribuir uma camada de

ligante asfalto-borracha (com cerca de 20% de borracha) sobre a superfície do pavimento existente seguida de uma camada de agregados uniformes espelhados sobre o ligante (Figura 4.2.6). A espessura de asfalto-borracha depende de granulometria do agregado, variando de 6 a 9 mm (HICKS et. al., 1995 apud ODA, 2000).



Figura 4.2.6- Execução de um SAM (ALL STATES ASPHALT Inc., 1999 apud ODA,2000)

4.2.7- Aplicação Entre as Camadas de Asfalto (SAMI)

É a utilização de uma camada de asfalto-borracha aplicada entre as camadas de asfalto existente e a camada de reforço, quando da execução de uma reabilitação (Figura 4.2.7), para retardar o desenvolvimento de trincas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes (HICKS et. al., 1995 apud ODA, 2000).

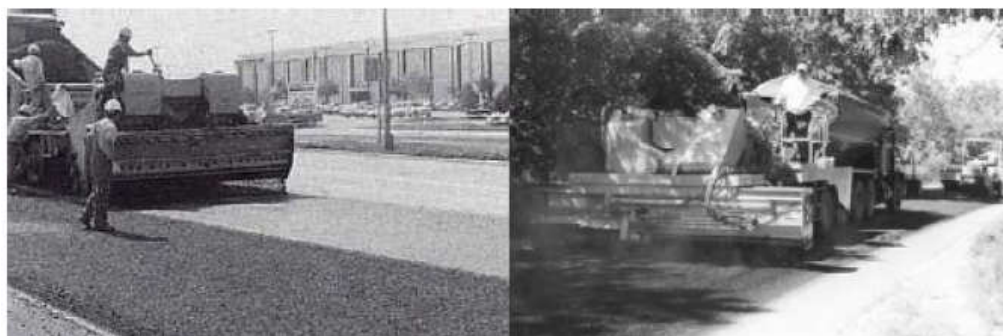


Figura 4.2.7- Execução de um SAMI (ALL STATES ASPHALT Inc., 1999 apud ODA,2000)

4.3- PAVIMENTO MODIFICADO COM BORRACHA DE PNEUS

O Pavimento Modificado com Borracha de Pneus é uma mistura efetuada a quente, sob condições controladas, de ligante asfáltico (cimento asfáltico de petróleo – CAP), borracha moída de pneus (BMP), onde o teor da borracha varia de 15% a 20% em relação ao peso total da mistura, diluentes e alguns aditivos especiais (Figura 4.3a) se houver necessidade (Petrobras, 2003).



Figura 4.3a- Composição do pavimento modificado do pneu.

Utiliza-se ligante asfalto-borracha em substituição ao ligante asfáltico convencional na produção do asfalto a ser aplicado na construção do pavimento (Figura 4.3b) reduz o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as trincas de roda, as trincas por fadiga e as trincas por contração de origem térmica, que são os principais defeitos apontados em uma pavimentação asfáltica (TAKALLOU e SAINTON, 1992 apud ODA, 2000).



Figura 4.3b- Execução de um Recapeamento (PETROBRÁS, 2003)

4.3.1- Materiais

Os materiais constituintes do concreto asfáltico com asfalto-borracha são: agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (filer) e dope, se necessários, e cimento asfáltico, os quais devem satisfazer as especificações vigentes no DNIT.

5.1.1 Asfalto-borracha via úmida, do tipo “Terminal Blending”

Podem ser empregados os seguintes tipos de asfaltoborracha:

- AB-8 (faixas A, B, C e Gap Graded)
- AB-22,(Gap Graded)

4.3.2- Cimento Asfáltico

Os cimentos asfálticos de petróleo modificados por adição de borracha moída de pneus devem possuir as seguintes características:

- a) o teor mínimo de borracha deve ser de 15% em massa, incorporada no ligante asfáltico; é expressamente proibida a industrialização na própria obra, sem acompanhamento laboratorial, equipamentos adequados, condição técnica e principalmente sem os requisitos básicos para garantir a segurança ao meio ambiente;
- b) o ligante asfalto-borracha deve atender aos requisitos apresentados na Tabela 4.3.2;
- c) o tempo máximo e as condições de armazenamento e estocagem do asfalto-borracha, para diferentes situações, devem ser definidos pelo fabricante;
- d) a garantia do produto asfáltico por carga deve ser atestada pelo fabricante através de certificado com as características do produto.

Todo o carregamento de asfalto-borracha que chegar à obra deve apresentar por parte do fabricante ou distribuidor o certificado de resultados de análise dos ensaios de caracterização exigidos pela especificação, correspondentes à

data de carregamento para transporte com destino ao canteiro de serviço. Deve trazer também indicação clara da sua procedência, do tipo e quantidade do seu conteúdo e distância de transporte entre a fábrica e o canteiro de obra.

Características	Exigência		Método ABNT
	Mínima	Máxima	
Viscosidade Brookfield a 175 °C, cP	800	2000	ASTM D 2196 ⁽¹⁾
Penetração, 100 g, 5 s, 25 °C, 0,1 mm	25	75	NBR 6576 ⁽²⁾
Ponto de amolecimento, °C	55	-	NBR 6560 ⁽³⁾
Recuperação elástica por torção, %	50	-	NLT 329 ⁽⁴⁾
Ponto de fulgor, °C	235	-	NBR 11341 ⁽⁵⁾
Densidade relativa, 25 °C	1,00	1,05	NBR 6296 ⁽⁶⁾
Ensaio no resíduo do RTFOT			
- variação em massa, %	-	1,0	NBR 15235 ⁽⁷⁾
- percentagem de penetração original	50	-	

Tabela 4.3.2 – Propriedades do Ligante Asfalto-Borracha

4.3.3- Agregados

Deve constituir-se por pedra britada ou seixo rolado britado, apresentando partículas sãs, limpas e duráveis, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas. Deve atender aos seguintes requisitos:

4.3.3.1- Agregado Miúdo

Pode constituir-se por areia, pó de pedra ou mistura de ambos. Deve apresentar partículas individuais resistentes, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas. O equivalente de areia obtido conforme NBR 12052(12) deve ser igual ou superior a 55%.

4.3.3.2- Material de Enchimento (Fíler)

O material de enchimento deve ser de natureza mineral finamente dividido, tal como cimento Portland, cal extinta, pós calcários, cinzas volantes etc., Na aplicação, o fíler deve estar seco e isento de grumos. A granulometria a ser atendida deve obedecer aos limites estabelecidos na Tabela 4.3.4.1.

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passando
ASTM	mm	
n° 40	0,42	100
n° 80	0,18	95 – 100
n° 200	0,075	65 – 100

Tabela 4.3.4.1 – Granulometria do Material de Enchimento

4.3.4- Melhorador De Adesividade

Quando não houver boa adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados, deve-se empregar aditivo melhorador de adesividade na quantidade fixada no projeto de mistura asfática. A razão da resistência à tração por compressão diametral estática após e antes da imersão deve ser superior a 0,70.

4.3.5- Equipamentos

Antes do início da execução dos serviços todo o equipamento deve ser examinado e aprovado.

Os equipamentos básicos para execução dos serviços de concreto asfáltico com asfalto borracha são compostos das seguintes unidades:

4.3.5.1- Caminhões Para Transporte do Ligante Asfalto-Borracha

As carretas-tanque de transporte de ligante modificado por borracha moída de pneus devem possuir bomba de circulação e serpentina com isolamento térmico.

4.3.5.2- Depósitos Para Ligante Asfalto-Borracha

Os depósitos para o cimento asfáltico devem possuir capacidade adequada, possuir dispositivos capazes de aquecer o ligante nas temperaturas fixadas nesta especificação. Estes dispositivos devem também evitar qualquer superaquecimento localizado. É necessário que sejam instalados agitadores mecânicos nos tanques e um sistema de circulação para o ligante asfáltico, de modo a garantir a circulação contínua do depósito ao misturador durante todo o período de operação.

4.3.5.3- Depósito Para Agregados

Os agregados devem ser estocados convenientemente, isto é, em locais drenados, cobertos, dispostos de maneira que não haja mistura de agregados, preservando a sua homogeneidade e granulometria e não permitindo contaminações de agentes externos.

A transferência para silos de armazenamento deve ser feita o mais breve possível.

4.3.5.4- Silos Para Agregados

Os silos devem ter capacidade total de, no mínimo, três vezes a capacidade do misturador e ser divididos em compartimentos, dispostos de modo a separar e estocar, adequadamente, as frações apropriadas do agregado. Cada compartimento deve possuir dispositivos adequados de descarga. Deve haver um silo adequado para fíler, conjugado com dispositivos para sua dosagem.

4.3.5.5- Usina Para Misturas Asfálticas

A usina utilizada deve estar equipada com uma unidade classificadora de agregados, após o secador, dispor de misturador capaz de produzir uma mistura uniforme. Um termômetro, com proteção metálica e escala de 90 °C a 210 °C, com precisão de ± 1 °C, deve ser fixado no dosador de ligante ou na linha de alimentação do asfalto, em local adequado, próximo à descarga do misturador. A usina deve ser equipada, além disso, com pirômetro elétrico, ou outros instrumentos termométricos aprovados, colocados na descarga do secador, com dispositivos para registrar a temperatura dos agregados, com precisão de ± 5 °C. A usina deve possuir termômetros nos silos quentes.

Pode, também, ser utilizada uma usina do tipo tambor-secador-misturador, de duas zonas, convecção e radiação, providas de: coletor de pó, alimentador de fíler, sistema de descarga da mistura asfáltica, por intermédio de transportador de correia com comporta do tipo *clamshell* ou alternativamente, em silos de estocagem.

As usinas devem possuir misturador externo ao tambor secador tipo *pug-mill*.

A usina deve possuir silos de agregados múltiplos, com pesagens dinâmicas individuais e deve ser assegurada a homogeneidade das granulometrias dos diferentes agregados.

A usina deve possuir ainda uma cabine de comando e quadros de força. Tais partes devem estar instaladas em recinto fechado, com cabos de força e comandos ligados em tomadas externas especiais para esta aplicação. A operação de pesagem de agregados e do ligante asfáltico deve ser semi-automática com leitura instantânea e acumulada, por meio de registros digitais em *display* de cristal líquido. Devem existir potenciômetros para compensação das massas específicas dos diferentes tipos de ligantes asfálticos e para seleção de velocidade dos alimentadores dos agregados frios.

As usinas devem possuir capacidade para usinagem de misturas até 180°C.

4.3.5.6- Caminhão Para Transporte da Mistura

Os caminhões tipo basculante para o transporte do concreto asfáltico devem ter caçambas metálicas robustas, limpas e lisas, ligeiramente lubrificadas com água e sabão, óleo cru fino, óleo parafínico ou solução de cal hidratada (3:1), de modo a evitar a aderência da mistura à chapa. A utilização de produtos susceptíveis à dissolução do ligante asfáltico, como óleo diesel, gasolina etc. não é permitida. As caçambas devem ser providas de lona para proteção da mistura.

4.3.5.7- Equipamento Para Distribuição e Acabamento

O equipamento de espalhamento e acabamento deve constituir-se de vibro-acabadoras, capazes de espalhar e conformar a mistura no alinhamento, cotas e abaulamento definidos no projeto.

A vibro-acabadora deve ser equipada com esteiras metálicas para sua locomoção. O uso de acabadoras de pneus só deve ser admitido se for comprovado que a qualidade do serviço não é afetada por variações na carga da acabadora.

As vibro-acabadoras devem ser equipadas com parafusos sem fim, e com esqui eletrônico de 3 m para garantir o nivelamento adequado, para colocar a mistura exatamente nas faixas, e devem possuir dispositivos rápidos e eficientes de direção, além de marchas para frente e para trás. As acabadoras devem ser equipadas com alisadores e dispositivos para aquecimento à temperatura requerida para a colocação da mistura sem irregularidade. Devem ser equipadas com sistema de vibração que permita pré-compactação na mistura espalhada.

No início da jornada de trabalho, a mesa deve estar aquecida, no mínimo, à temperatura definida pela especificação para descarga da mistura asfáltica.

4.3.5.8- Equipamento Para Compactação

O equipamento para a compactação deve constituir-se por rolo pneumático com regulagem de pressão e rolo metálico liso, tipo tandem.

Os rolos pneumáticos, auto-propulsionados, devem ser dotados de dispositivos que permitam a calibragem de variação da pressão dos pneus de 0,25 MPa a 0,84 MPa. É obrigatória a utilização de pneus uniformes, de modo a evitar marcas indesejáveis na mistura compactada.

O rolo metálico liso tipo tandem deve ter massa compatível com a espessura da camada.

O emprego de rolos lisos vibratórios pode ser admitido desde que a frequência e a amplitude de vibração sejam ajustadas às necessidades do serviço.

O equipamento em operação deve ser suficiente para compactar a mistura de forma que esta atinja o grau de compactação exigido, enquanto esta se encontrar em condições de trabalhabilidade.

4.3.5.9- FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS ACESSÓRIOS

Devem ser utilizados, complementarmente, os seguintes equipamentos e ferramentas:

- a) soquetes mecânicos ou placas vibratórias para a compactação de áreas inacessíveis aos equipamentos convencionais;
- b) pás, garfos e rodos, para operações eventuais;
- c) vassouras rotativas, compressores de ar para limpeza da pista;
- d) caminhão tanque irrigador para limpeza de pista.

4.4- EXECUÇÃO

4.4.1- Condições Gerais

Não é permitida a execução dos serviços em dias de chuva. O concreto asfáltico usinado a quente com asfalto-borracha somente deve ser fabricado, transportado e aplicado quando a temperatura ambiente for superior a 10 °C.

4.4.2- Preparo da Superfície

A superfície deve apresentar-se limpa, isenta de pó ou outras substâncias prejudiciais. Eventuais defeitos existentes devem ser adequadamente reparados, previamente à aplicação da mistura.

A imprimação ou pintura de ligação deve ser executada, obrigatoriamente, com a barra espargidora, respeitando os valores recomendados para taxa de ligante. Caneta ou regador podem ser utilizados somente para correções localizadas ou em locais de difícil acesso. Deve apresentar película homogênea e promover adequadas condições de aderência quando da execução do concreto asfáltico.

Quando a imprimação ou a pintura de ligação não tiverem condições satisfatórias de aderência, uma nova pintura de ligação deve ser aplicada previamente à distribuição da mistura.

No caso de desdobramento da espessura total de concreto asfáltico em duas camadas, a pintura de ligação entre estas pode ser dispensada se a execução da segunda camada ocorrer logo após a execução da primeira.

O tráfego de caminhões, para início do lançamento do concreto asfáltico com asfalto borracha, sobre a pintura de ligação só é permitido após o rompimento e cura do ligante aplicado.

4.4.3- Produção do Concreto Asfáltico Com Asfalto-Borracha

O concreto asfáltico com asfalto-borracha deve ser produzido em usinas apropriadas, conforme anteriormente especificado. A usina deve ser calibrada, de forma a assegurar a obtenção das características desejadas para a mistura. Os agregados, principalmente os finos, devem ser homogeneizados com a pá carregadeira antes de serem colocados nos silos frios.

As aberturas dos silos frios devem ser ajustadas de acordo com a granulometria do traço e dos agregados para evitar sobras nos silos quentes.

A temperatura de aquecimento do cimento asfáltico modificado com borracha de pneus empregado deve, salvo em orientação contrária e justificada do fabricante, se situar nos limites de 165 °C a 175 °C. Variações constantes ou desvios significativos em relação à faixa de temperatura desejável indicam a necessidade de suspensão temporária do processo de produção, para que sejam executados os necessários ajustes.

A temperatura de aquecimento dos agregados, medida nos silos quentes, deve ser até 10 °C superior à temperatura definida para o aquecimento do ligante, desde que não supere 180 °C.

A carga dos caminhões deve ser feita de maneira a evitar segregação da mistura dentro da caçamba, 1º na frente, 2º na traseira e 3º no meio.

O início da produção na usina só deve ocorrer quando todo o equipamento de pista estiver em condições de uso, para evitar a demora na descarga na acabadora que pode acarretar em diminuição da temperatura da mistura com prejuízo da compactação.

4.4.4- Transporte do Concreto Asfáltico Com Asfalto-Borracha

O concreto asfáltico com asfalto-borracha produzido deve ser transportado da usina ao local de aplicação, em caminhões basculantes, atendendo ao especificado no item 4.3.6.6 para que a mistura seja colocada na pista à temperatura especificada.

As caçambas dos veículos devem ser cobertas com lonas impermeáveis durante o transporte de forma a proteger a massa asfáltica da ação de chuvas ocasionais, da eventual contaminação por poeira e, especialmente, da perda de temperatura e queda de partículas durante o transporte. As lonas devem estar bem fixadas na dianteira para não permitir a entrada de ar entre a cobertura e a mistura, o que provoca resfriamento precoce.

O tempo máximo de permanência da mistura no caminhão é dado pelo limite de temperatura estabelecido para aplicação da massa na pista.

4.4.5- Distribuição da Mistura

A distribuição do concreto asfáltico com asfalto-borracha deve ser feita por equipamentos adequados, conforme especificado no item 4.3.6.7.

Para o caso de emprego de concreto asfáltico com asfalto-borracha como camada de rolamento, ligação ou de regularização, a mistura deve ser distribuída por uma ou mais acabadoras, atendendo aos requisitos anteriormente especificados.

Deve ser assegurado, previamente ao início dos trabalhos, o aquecimento conveniente da mesa alisadora da acabadora à temperatura compatível com a da massa a ser distribuída.

Deve-se observar que o sistema de aquecimento destina-se exclusivamente ao aquecimento da mesa alisadora e nunca de massa asfáltica que eventualmente tenha esfriado em demasia.

Caso ocorram irregularidades na superfície da camada acabada, estas devem ser corrigidas de imediato pela adição manual da mistura. Seu espalhamento deve ser efetuado por meio de rodos metálicos. Esta alternativa deve ser, no entanto, minimizada, já que o excesso de reparo manual é nocivo à qualidade do serviço.

Na partida da acabadora devem ser colocadas de 2 a 3 réguas, com a espessura do empolamento previsto, onde a mesa deve ser apoiada.

A mistura deve apresentar textura uniforme, sem pontos segregados. Qualquer falha constatada na superfície deve ser sanada antes do início da compactação, com espalhamento manual.

Na descarga, o caminhão deve ser empurrado pela acabadora, não se permitindo choques ou travamento dos pneus durante a operação.

O tipo de acabadora deve ser definido em função da capacidade de produção da usina, de maneira que esta esteja continuamente em movimento, sem paralisações para esperar caminhões.

A velocidade da acabadora deve estar sempre entre 2,5 m/minuto e 10,0 m/minuto.

4.4.6- Compactação da Mistura

A rolagem tem início logo após a distribuição do concreto asfáltico com asfalto-borracha. A fixação da temperatura de rolagem condiciona-se à natureza da massa e às características do equipamento utilizado. Como regra geral, deve-se iniciar a compactação na temperatura mais elevada que a mistura asfáltica possa suportar, temperatura esta fixada experimentalmente, em cada caso. A temperatura mínima recomendável para a compactação da mistura é de 150 °C, devendo ser ajustada no campo em função dos equipamentos de compactação, condições ambientais e de serviço que garantam as características requeridas pela mistura, por ocasião do projeto de dosagem.

É obrigatória, às expensas do contratado, a execução de trecho experimental, que deve possuir no mínimo 150 m e cobrir a largura da faixa ou a metade da largura da pista, para definição dos equipamentos de compactação e números de passadas necessárias dos equipamentos para atingir o grau de compactação mínimo exigido nesta especificação.

4.4.7- Juntas

O processo de execução das juntas transversais e longitudinais deve assegurar adequadas condições de acabamento, de modo que não sejam percebidas irregularidades nas emendas.

Em rodovias de pista dupla é recomendado o uso de duas vibro-acabadoras, de modo que os panos adjacentes sejam executados simultaneamente, tanto nas faixas da pista quanto nos acostamentos.

Em rodovias em operação, devem ser evitados degraus longitudinais muito extensos, permitindo-se no máximo o resultante de uma jornada de trabalho. Na jornada de trabalho seguinte, a aplicação da massa asfáltica deve começar no início do degrau remanescente da jornada de trabalho anterior.

No reinício dos trabalhos, deve-se realizar a compactação da emenda com o rolo perpendicular ao eixo, com 1/3 do rolo sobre o pano já compactado e os outros 2/3 sobre a massa recém-aplicada.

4.4.8- Abertura ao Tráfego

A camada de concreto asfáltico, com asfalto-borracha recém-acabada, deve ser liberada ao tráfego somente quando a massa atingir a temperatura ambiente.

4.4.9- Controle de Qualidade

O teor de ligante deve ser checado com bastante freqüência, principalmente no início do serviço, até ter-se certeza de que a calibragem da usina está correta e funcionando.

Além dos controles normais de teor de ligante e granulometria, uma avaliação de qualidade interessante da mistura que pode ser realizada diariamente é a confecção de corpos-de-prova Marshall, com massa da vibro acabadora, para realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

O teor de ligante obtido após a extração da amostra ensaiada deve ser multiplicado por um fator de correção, que leva em conta a porcentagem de borracha moída não solúvel pelo solvente que fica retido no filtro após o ensaio de extração. Este fator de correção é de 1,07.

O ligante asfalto borracha apresenta excelente comportamento e possui um custo interessante. Portanto todo o sistema de usinagem e aplicação da massa asfáltica deve ser melhorado e otimizado para que esta nova massa não tenha seu desempenho prejudicado por qualquer falha que eventualmente possa ocorrer durante a sua usinagem e aplicação. O laboratório da obra tem um papel importante no controle de qualidade e deve ser pró-ativo, de forma a prever e ajustar os procedimentos para aplicar este tipo de mistura com sucesso.

O asfalto borracha deve possuir em sua composição, pó de borracha de pneus, responsável por sua flexibilidade e durabilidade.

Os silos devem ter capacidade total de, no mínimo três vezes a capacidade do misturador, e devem ser divididos em compartimentos dispostos de modo a separar e estocar, adequadamente, as frações apropriadas do agregado. Os pneus de caminhões têm a particularidade de possuírem maiores teores de borracha natural do que sintética, por isso, algumas empresas Brasileiras preferem estes pneus, aos pneus de automóveis (DNIT – 2005). As carretas-tanque devem possuir bomba de circulação e serpentina com isolamento térmico, sendo que as carretas transportadoras têm o agitador em cima do tanque. As carretas são aquecidas para manter a temperatura. Segundo a GRECA ASFALTOS (2009), o aquecimento ideal é com óleo térmico, porém pode ser através de serpentina.

4.5- PRINCIPAIS DEFEITOS DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

De acordo com Bertollo; Fernandes Jr. e Schalch (2002), os dois principais mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis são: a deformação permanente (trilha de roda), causada pela ação combinada da densificação

dos materiais, ou principalmente, de ruptura por cisalhamento, e as trincas por fadiga, decorrente das repetições de deformação horizontal de tração na parte inferior do revestimento.

4.5.1- Deformação Permanente nas Trilhas de Roda

A ocorrência prematura e/ou excessiva de deformação permanente nos pavimentos asfálticos tem sido motivo de grande preocupação entre técnicos e pesquisadores brasileiros da área de pavimentação. As deformações que aparecem sob a forma de depressões longitudinais nas trilhas de roda (Figura 4.5.1), são o resultado da acumulação de pequenos afundamentos que ocorrem toda vez que um carregamento é aplicado.

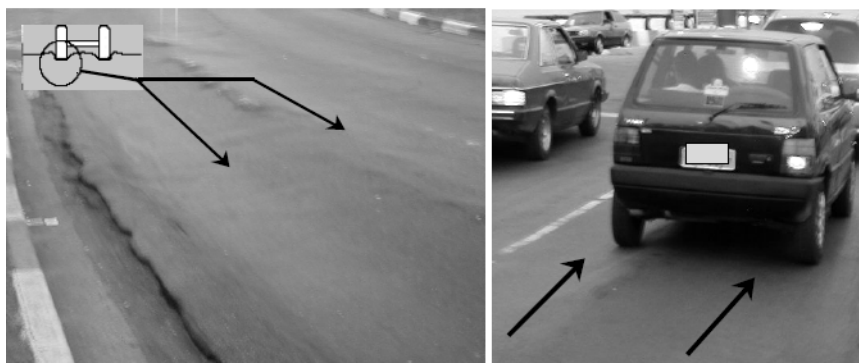


Figura 4.5.1- Deformação permanente nas trilhas de roda.

Esse fenômeno tem se agravado devido, principalmente, ao aumento do número de veículos pesados e ao avanço tecnológico que possibilita a esses veículos rodarem com maior carga por eixo e maior pressão de pneus (FERNANDES JR., 1994 apud BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002)

O afundamento da trilha de roda pode ser o resultado da escolha de espessuras indevidas das várias camadas que compõem o pavimento, resultando em carregamentos incompatíveis com a capacidade de suporte do subleito. Também pode ser causado por deformações nas camadas betuminosas, causadas por misturas que possuem pequena resistência ao cisalhamento. Nessas misturas, o afundamento pode ser associado à

suscetibilidade térmica dos ligantes ou da estrutura dos agregados com baixos ângulos de atrito interno. (BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002).

4.5.2- Trincas Por Fadiga

A fadiga é um dos maiores fatores que compromete os revestimentos asfálticos.

O fenômeno de fadiga em revestimentos asfálticos se torna evidente em forma de trincamentos (Figura 4.5.2a). Este fenômeno ocorre devido às solicitações repetidas do tráfego e, também, devido à falta de flexibilidade ou elasticidade no componente asfáltico do pavimento, que não consegue suportar (“responder”) as solicitações do tráfego pesado sem trincar.



Figura 4.5.2a- Trincas por fadiga do revestimento asfáltico. (FERNANDES JR. et al., 1999 apud CUNHA et al., 2000)

As trincas por fadiga são causadas por vários fatores que ocorrem simultaneamente, geralmente à ocorrência destas trincas está associada à repetição de carregamentos pesados ou quando o número de aplicações de carga ultrapassa o valor previsto em projeto. Ao contrário da trilha de roda, que pode ser evitável, a fadiga não pode ser evitada indefinidamente, devido à repetição das deformações elásticas resultantes do tráfego. (BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002).

Diante destes fatos é que se adiciona à borracha moída em materiais asfálticos pelo processo úmido, desta forma consegue-se melhorar o desempenho dos pavimentos em campo, aumentando a sua flexibilidade. Esta

aplicação faz com que se possa retardar o aparecimento de trincas, selar trincas existentes e aumentar a impermeabilização destes.

As principais formas de carregamento utilizados em ensaios de fadiga de misturas asfálticas são do tipo sinusoidal, pulsatória e cíclica, com ou sem períodos de repouso. Os ensaios mais utilizados para esta finalidade são:

- Flexão simples ou alternada em vigas prismáticas simplesmente apoiadas, com carregamento central ou em dois pontos (terço médio central);
- Flexão simples ou alternada com vigas em console (fixa em uma extremidade), trapezoidais ou cilíndricas, com carregamento aplicado em uma das extremidades;
- Tração simples em corpo-de-prova cilíndricos;
- Compressão diametral (tração indireta) em corpos-de-prova cilíndricos;
- Ensaio de torção em console.

No Brasil, devido a limitações de recursos e facilidade de condução do ensaio, tem-se utilizado o ensaio de compressão diametral à tensão controlada para avaliar o comportamento à fadiga das misturas asfálticas, utilizando-se corpos-de-prova moldados de acordo com o método Marshall ou extraídos em campo. A figura 4.5.2b mostra um destes equipamentos.

A carga aplicada deve induzir tensões de tração máximas da ordem de 10 a 40% do valor de resistência à tração da mistura.



Figura 4.5.2b- Equipamento de compressão diametral da UFSC utilizado para avaliação do módulo resiliente e estudos de fadiga de misturas asfálticas. (GRECA, 2007)

Para que se tenha o conhecimento do comportamento à fadiga é necessário que sejam ensaiados de 15 a 20 corpos-de-prova, a diferentes níveis de tensões ou deformações. A partir dos resultados, e utilizando-se da estatística, são definidos os modelos de comportamento à fadiga, ou as curvas de fadiga, ou ainda, na lei de fadiga da mistura, os quais podem ser representados da seguinte forma:

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma_i} \right)^{n_1}$$

$$N_f = K_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2}$$

N_f = Vida de fadiga expressa em número de solicitações da carga para a redução de 50% da rigidez da mistura ou ruptura total do corpo-de-prova;

$\Delta\sigma_i$ = Diferença de tensão inicial (diferença entre a tensão de compressão e de tração atuante no centro do corpo-de-prova);

ε_i = Deformação inicial; e

K, n = Parâmetros determinados experimentalmente.

4.5.3- Modelos de Fadiga Para Misturas Asfálticas Densas

Em um pavimento flexível cabe ao revestimento asfáltico resistir diretamente à repetição de cargas dos diferentes tipos de veículos. A fadiga da mistura asfáltica resulta do acúmulo dessas solicitações. Este fenômeno é considerado no dimensionamento de um pavimento através de modelos que relacionam o número de repetições de carga com o estado de tensão ou deformação aplicada. (MOTTA, 1991, apud MORILHA, 2004).

As correlações entre a tensão ou deformação atuante e o número de repetições de carga até a ruptura são determinadas em ensaios cujo objetivo é a obtenção de parâmetros para a aplicação no dimensionamento do pavimento. Os dados de comportamento à fadiga podem ser obtidos através de ensaios de laboratório ou através de pistas experimentais (métodos semi-empíricos). (SPECHELT, 2004).

4.6- PRODUÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA (PROCESSO ÚMIDO)

De acordo com ODA e Fernandes Jr. (2000), o processo úmido (Figura 4.6) consiste na mistura de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e borracha moída (5% a 25%), a uma temperatura elevada (150°C a 200°C), durante um determinado período de tempo (20 a 120 minutos). Essa mistura é classificada como uma reação e forma um composto asfalto-borracha, com propriedades reológicas diferentes do ligante original, podendo ainda ser incorporados aditivos (diluente) para ajustar a viscosidade da mistura.

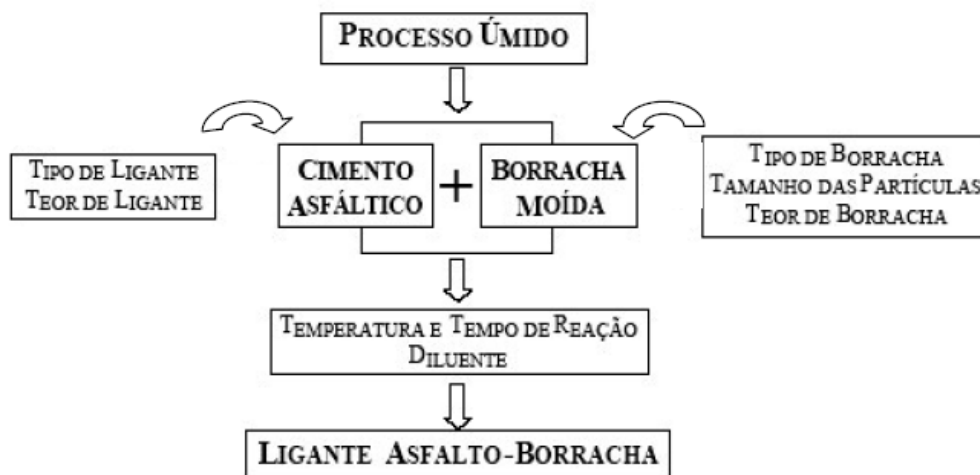


Figura 4.6 - Esquema da produção do ligante asfalto-borracha. (ODA, 2000)

O grau de modificação do ligante depende de vários fatores: o tipo de pneu moído, granulometria (tamanho das partículas) e a porcentagem (teor) de borracha, o cimento asfáltico utilizado (tipo de ligante), a proporção de cimento asfáltico e borracha (teor de ligante), o tempo e a temperatura de reação, a compatibilidade do ligante com a borracha, a energia mecânica durante a mistura e a reação e o uso de diluentes.

4.7- MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO

- ✓ **Borracha de pneus** (CUNHA et al., 2000)
 - **Tipo:** Mistura de borracha de pneu de automóveis e caminhões.
 - **Característica:** Borracha em pó de 0,42mm a 0,075mm, desvulcanizada, apresenta uma alta homogeneidade, mantendo cerca de 75% das características físicas da composição original da borracha natural.

- ✓ **Cimento Asfáltico de petróleo (CAP)** (CUNHA et al., 2000).
 - **Tipo:** CAP 20, que é o mais utilizado em obras de pavimentação.

- **Características:** ponto de amolecimento de 51°C, ponto de fulgor de 289°C e penetração de 41,7 (1/10 mm)
- ✓ **Equipamento para a Mistura** (ODA e FERNADES JR., 2000).
- **Tipo:** O equipamento utilizado no preparo do ligante asfalto-borracha (figura14), pode influenciar a sua homogeneidade. Deve conter um recipiente com controle de temperatura (até 200°C) e um agitador mecânico.

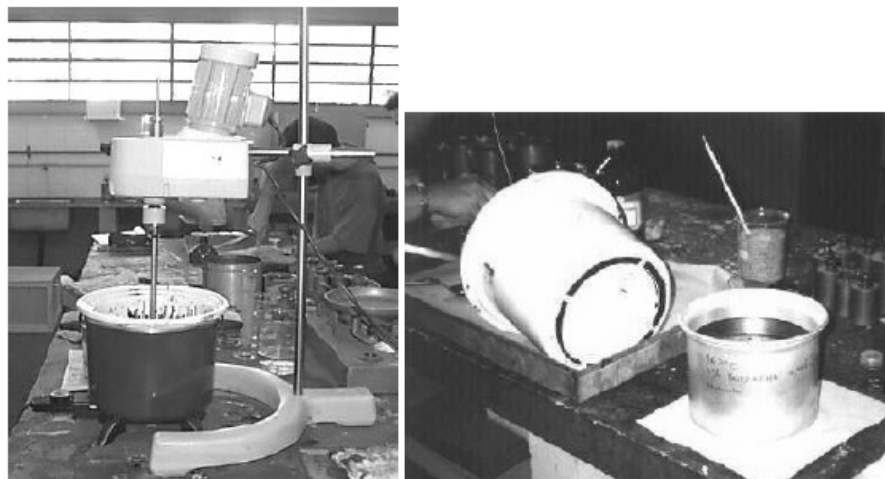


Figura 4.7- Agitador mecânico, panela elétrica e recipiente para armazenagem do ligante. (ODA, 2000)

4.7.1- Principais Ensaios Para Caracterização do Ligante Asfáltico

Para certificar a qualidade dos diferentes tipos de asfaltos, levando-se em conta as propriedades físicas, químicas e reológicas, foram estabelecidos ensaios de controle laboratorial baseados em experiências práticas, que visem garantir um desempenho satisfatório e o pleno sucesso na aplicação dos asfaltos. (ODA, 2000).

4.7.2- Ensaio Tradicionais

Os ensaios tradicionais são relacionados às propriedades fundamentais dos asfaltos. Os mais importantes utilizados são descritos a seguir (ODA, 2000)

- Determinação da penetração em materiais betuminosos (ABNT/MB-107/1971-NBR6576/1998 apud REZENDE et. al., 2000 e ODA, 2000)

Este método serve para determinar a viscosidade dos materiais betuminosos através da penetração, distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra do material betuminoso sob condições específicas de temperatura (25°C), carga (100 g) e tempo (5 seg). O equipamento para ensaio de penetração pode ser visto na figura 4.7.2a.

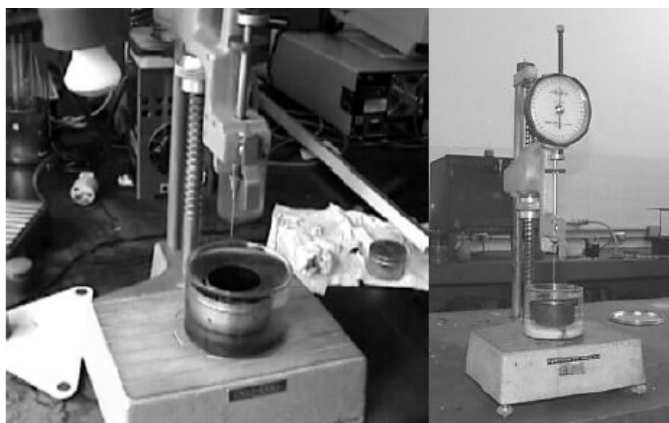


Figura 4.7.2a- Equipamento utilizado no ensaio da penetração dos ligantes asfáltico. (ODA, 2000)

- Determinação do ponto de fulgor (ABNT/MB-50/1972-NBR 11341/1990 apud REZENDE et. al., 2000 e ODA, 2000).

Ponto de fulgor de um ligante asfáltico é a temperatura na qual ocorre uma liberação de vapores do produto suficiente para, em mistura com ar e na

presença de uma chama, provocar uma centelha. Portanto, indica a temperatura acima da qual o asfalto deve ser manuseado como produto inflamável, desde que haja uma fonte de ignição (faísca, chama, raios, tempestade magnética). É um ensaio muito prático que permite, também, verificar possíveis contaminações do asfalto por solventes, cujo ponto de fulgor é mais baixo do que aquele fixado para o asfalto. A figura 4.7.2b ilustra o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 4.7.2b- Equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor dos ligantes asfálticos. (ODA, 2000)

- Determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos (método do anel e bola – ABNT/MB-164/1972-NBR6560/1972; ASTM/D-36 apud REZENDE et. al.; 2000 e ODA, 2000).

O ponto de amolecimento de um material betuminoso é considerado como sendo o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido, Coelho (1996) apud ODA (2000), e isto acontece na faixa entre 30°C e 175°C. A figura 4.7.2c ilustra o equipamento utilizado.



Figura 4.7.2c- Equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento do ligantes asfáltico – Método anel e bola . (ODA, 2000)

- Determinação da viscosidade saybolt-Furol de materiais betuminosos (ABNT/BP/P-MB-517 apud REZENDE et. al., 2000 e ODA, 2000).

A viscosidade Saybolt de materiais betuminosos (expressa em segundos) é o tempo necessário para o escoamento de 60ml de material, no viscosímetro de Saybolt-Furol, (Figura 4.7.2d), sob determinadas condições de temperatura. Geralmente, essa temperatura varia com o tipo de asfalto que é utilizado (para os CAP's são utilizados temperaturas entre 135°C e 177°C).



Figura 4.7.2d: Viscosímetro de Saybolt-Furol. (ODA, 2000)

➤ Ductibilidade (ABNT/MB-167/1971; ASTM/D-113 apud ODA, 2000).

Define-se ductibilidade como a capacidade de um asfalto sofrer deformações de sua massa. O ensaio mede a deformação em que um corpo de prova padrão de asfalto é alongado até seu rompimento. Asfaltos empregados na construção rodoviária devem apresentar ductibilidade elevada, ou seja, deformação maior que 1,0m. A figura 4.7.2e ilustra o equipamento utilizado.

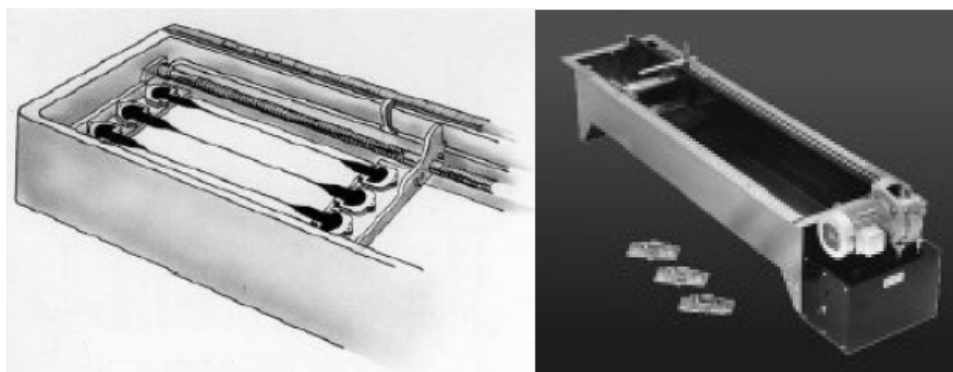


Figura 4.7.2e- Equipamento utilizado na determinação da ductibilidade. (ROBERTS et al., 1998 apud ODA, 2000)

4.8 - CONDIÇÃO DE TRABALHO NO INVERNO

Em situações de trabalho, com temperatura ambiente em torno de 15° C, a eficiência da compactação deve ser otimizada. A acabadora não pode parar e a troca de caminhões abastecedores deve ser imediata.

Para a manutenção da temperatura após a usinagem devem-se manter enlonados os caminhões de transporte de massa e deve-se dispor de pelo menos dois rolos compactadores pneumáticos e um rolo tipo tandem para execução das juntas e um rolo metálico liso mais pesado para agilizar a compactação.

Quando a acabadora interrompe seu ritmo por falta de alimentação ocorre um acúmulo de atrasos: o rolo chapa que faz a emenda longitudinal não avança e atrasa os rasteiros e conseqüentemente os rolos não podem prosseguir e encostar na acabadora e a eventual perda de eficiência nessas fases esfria a massa. Ressalte-se que o vento esfria por corrente de ar a massa asfáltica delgada, independentemente da temperatura ambiente.

Não existe um número de fechadas por rolo compactador mínima. Deve-se atentar que cada tipo de mistura apresenta uma forma de empacotamento característica em função do tipo de agregado e do tipo de ligante, além de outras variáveis intervenientes na compactação como temperatura, peso do equipamento compactador, forma de compactação (estática ou vibratória), etc. Portanto o grau de compactação será definido no campo por meio de observação e checagem com sonda rotativa do serviço executado.

4.9 - ASFALTO TRADICIONAL X ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)

O objetivo é apresentar argumentos objetivos e concretos para a justificativa do uso de asfalto modificado com pó de borracha de pneu como uma alternativa técnico/econômica e altamente viável, no processamento de misturas asfálticas destinadas à recomposição e correção de perfis deformados pela ação do tráfego e recapeamento de vias urbanas e rodoviárias. Conforme uma pesquisa realizada pela empresa GRECA Asfaltos e LAPAV - Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, iniciada em 2000.

Foram realizados estudos de laboratório em torno de ligantes e de misturas asfálticas. Em meados de agosto de 2001, foi implantado o trecho experimental de CBUQ confeccionado com ASFALTO BORRACHA na rodovia BR 116/RS, trecho Guaíba Camaquã, consolidando efetivamente uma iniciativa pioneira de aplicação desta técnica. O segmento teste localizado no km 319 foi monitorado para avaliação de desempenho da camada aplicada de aproximadamente 3 cm de mistura asfáltica densa. Obtendo os seguintes resultados.

- Seu comportamento em termos de retardar a reflexão de trincas é bem superior ao dos revestimentos construídos com ligante tradicional e com ligante modificado por 3% de SBS localizados no mesmo segmento teste;

- O segmento executado com ligante CAP 20 apresentou trincamento bastante acentuado enquanto o segmento com Ecoflex apresentava-se praticamente sem trincas por fadiga.

Em maio de 2003 foram construídas duas pistas experimentais, uma com revestimento em CBUQ com ligante CAP 20 e outra com ASFALTO BORRACHA. Nestes dois tipos de revestimento, para obtenção de resultados em curto prazo, foi aplicado a técnica de ensaios acelerados, com emprego do simulador de tráfego linear DAER/UFRGS. Algumas conclusões dos estudos foram:

- O recapeamento em concreto asfáltico com ligante modificado com borracha (AB) teve um comportamento muito superior ao recapeamento com asfalto convencional (AC).
- Praticamente não houve reflexão de trincas quando o ligante empregado na mistura asfáltica foi modificado pela adição de borracha (AB), enquanto no recapeamento em (AC) houve reflexão total de trincas e surgimento de trincas de fadiga em áreas não trincadas.

Conclui-se que o emprego de ligante asfáltico modificado com borracha em misturas asfálticas para recapeamento de pavimentos trincados se mostra como uma técnica promissora. A quantificação da vida útil de um recapeamento em AB (e a inevitável comparação com a correspondente ao recapeamento em AC).

Outro estudo bastante interessante, foi realizado no Laboratório de Tecnologia de

Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo elaborada pela Profª Dra Liedi Bernucci e por Edson Moura.

Os estudos da USP analisaram o comportamento, com relação à deformação permanente, de duas misturas asfálticas dentro da Faixa III da PMSP. Uma mistura asfáltica foi elaborada com CAP - 20 tradicional e a outra com

ASFALTO BORRACHA. Neste estudo a mistura com ASFALTO BORRACHA mostrou-se menos suscetível a formação de trilhas de roda.

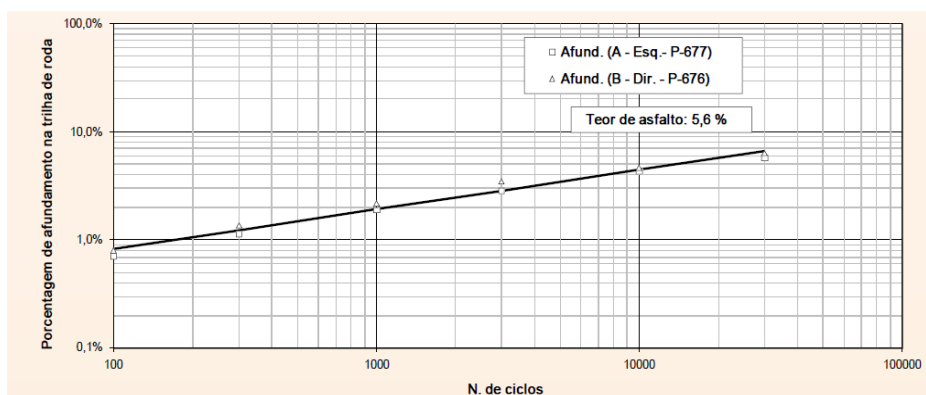


Gráfico 5.0a- Ensaios de Deformação Permanente - N. de ciclos x afundamento
Corredor de ônibus da Av. Faria Lima - SP
Ligante asfáltico - CAP-20 - t=60 Cº

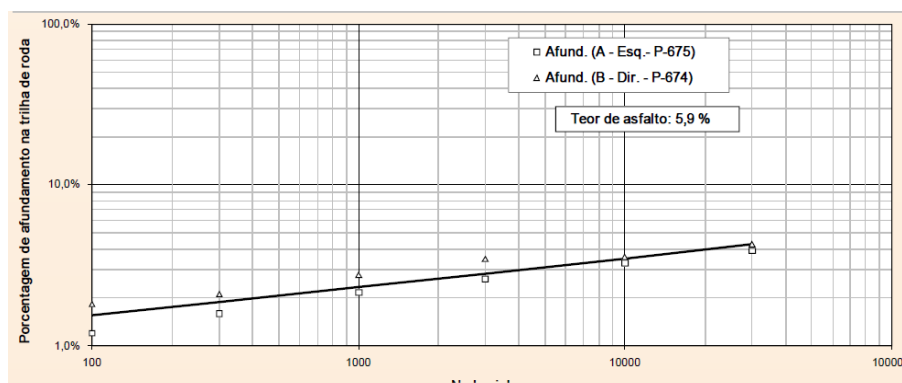


Gráfico 5.0b- Ensaios de Deformação Permanente - N. de ciclos x afundamento
Corredor de ônibus da Av. Faria Lima - SP
Ligante asfáltico - Ecoflex-B - t=60 Cº

Observando os gráficos acima, obtidos através do simulador tipo LCPC no ensaio de deformação permanente, temos os seguintes resultados:

- CAP 20 = 6,5 % de afundamento para 30.000 ciclos;
- ECOFLEX= 4,2% de afundamento para os mesmos 30.000 ciclos.

Estes resultados indicam, que valor de afundamento aos 30.000 ciclos inferior a 5%, como obtido na mistura com ASFALTO BORRACHA, não apresentarão deformação permanente nas trilhas de roda pela ação do tráfego.

5.0 – CONCLUSÃO

O pneu possui papel fundamental e insubstituível em nossa vida diária, tanto no transporte de passageiros quanto no de cargas. Entretanto, quando tornam-se insersíveis, acarretam uma série de problemas: são objetos perceptíveis e incomodamente volumosos, que precisam ser armazenados em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de mosquitos e roedores. A disposição em aterros torna-se inviável, já que apresentam baixa compressibilidade e degradação muito lenta. Além disso, quando enterrados, tendem a subir e sair para a superfície. Foi pensando em uma solução adequada à sua destinação final de alguns resíduos sólidos que resolvi realizar esta pesquisa, e pelos estados lastimáveis que se encontram nossas rodovias hoje.

O asfalto de borracha é uma forma de preparo da mistura asfáltica aproveitando resíduos sólidos (pneus, nesse caso) para aprimorar características como resistência, permeabilidade e aderência. O asfalto leva o nome de ecológico por receber 20% de borracha de pneu velho triturado, contribuindo para o reaproveitamento desse resíduo de difícil destinação.

A borracha altera as características de deformação na tração e compressão do concreto asfáltico, incrementando as deformações admissíveis e reduzindo sensivelmente a formação de trincas, buracos e outros problemas comuns em rodovias e vias urbanas; ao mesmo tempo são incorporados agentes antioxidantes e inibidores de raios ultravioleta que reduzem drasticamente a degradação do ligante asfáltico por fatores ambientais, como o sol forte e a infiltração da água da chuva. O resultado final é que um pavimento projetado para durar 10 anos (sem borracha) irá durar 20 anos, enquanto o acréscimo de 6% no custo do concreto asfáltico irá representar menos de 1% no valor total de construção de uma rodovia. Por outro lado, pode-se projetar o asfalto-borracha para se obter os mesmos 10 anos de vida útil e, então, reduzir a espessura e obter pavimentos mais baratos que os tradicionais. Além da

melhoria na durabilidade do pavimento, esta tecnologia agrega uma série de outros benefícios igualmente importantes, facilmente percebidos pelos os usuários das rodovias. O efeito de emborrachamento do asfalto-borracha reduz em até 90% o nível de ruído produzido pelo atrito pneu-pavimento, hoje um importante problema urbano, e melhora a segurança, diminuindo em 30% as distâncias de frenagem. O reaproveitamento racional e economicamente sustentável dos pneus velhos é uma tendência mundial. Segundo Salini "a borracha de pneus é uma matéria-prima extremamente nobre, com enorme potencial econômico, mas que hoje constitui-se num sério problema ambiental e de saúde pública no país", referindo-se à dengue.

A utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação é extremamente aconselhável em virtude de todos os benefícios apresentados. Contudo a tecnologia desse tipo de asfalto ainda é nova em nosso país, o que requer investimentos para que possa progredir e alcançar níveis de países que utilizam o asfalto-borracha há bastante tempo. Mas as expectativas futuras são ótimas.

A tecnologia não é tão nova assim, porém em termos de experimentos e aplicações em nosso país, trata-se de algo inusitado e de alto ganho econômico. Portanto, ainda é preciso investir mais, criar mais parcerias, para alcançarmos melhores resultados.

6.0 – VISITA TÉCNICA AO CANTEIRO DE OBRA DO TRECHO DA ESTRADA DE ITABIRA/MG



Armazenamento de material



Silo com o material asfático



Silo de armazenagem do material



Silo com aditivo “borracha”



Derramamento em caminhão



Pó de brita



Transporte de material



Tanque de despejo dos materiais



Pavimento sendo recapeado



Pavimento sendo recapeado



Pavimento sendo recapeado



Asfalto tradicional x Asfalto borracha

6.1- Comentários das fotos do trecho de Itabira/MG

No dia 16/12/11, foi realizada uma visita no canteiro de obras do trecho de Itabira/MG. O trecho de Itabira/MG a Belo Horizonte/MG estava sendo pavimentado utilizando o pavimento asfáltico Ecoflex ou mais conhecido como pavimento asfáltico borracha, sendo que a borracha estava sendo utilizada como aditivo na produção do asfalto.

Para a produção do asfalto foi montada uma usina próximo a estrada a ser pavimentada. O agregado asfalto borracha ou Ecoflex estava sendo entregue pela empresa GRECA ASFALTO, para ser misturado ao asfalto como aditivo, este aditivo fica armazenado em tanques mantendo sua temperatura e seu estado sólido.

As etapas para a produção são armazenamento do material, misturas dos materiais para a produção do asfalto em tanques, estes mesmo materiais são transportados para os silos, nestes silos ocorrem a mistura do material asfáltico com o agregado borracha, deste mesmo silos é realizado o carregamento dos caminhões para transporte do material até a estrada a ser pavimentada, este material deve ser transportado até o local mantendo sua temperatura e deve ser transportado o mais rápido o possível para o trecho,.

As fotos demonstram o espalhamento do material na estrada (asfalto borracha (Ecoflex)), o pavimento sendo compactado através de rolos e na última foto denominada como asfalto tradicional x asfalto borracha, pode ser ter uma idéia visual da diferença entre os dois tipos de asfalto sendo que o asfalto borracha (Ecoflex) possui como característica visual uma cor mais escura e nítida devido o uso da borracha e possui mais brilho. Ao se transitar pela via também é possível verificar que o ruído do atrito entre o pneu e asfalto é bem menor devido a elastômeros da borracha.

7.0 – BIBLIOGRAFIA

- GIACOBBE, Sílvia. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento portland com adição de borracha de pneus.** (Programa de mestrado). Escola Politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo,2008. Acesso em agosto de 2010.
- MARTINS, Haroldo. **A utilização da borracha de pneu na pavimentação asfáltica.** (Programa de graduação) – Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2004. Acesso em agosto de 2010.
- RIBEIRO, Cléa. **Gerenciamento de pneus inservíveis: Coleta e destinação final.** (Programa de mestrado). Centro Universitário SENAC. São Paulo, 2005. Acesso Setembro de 2010.
- MACEDO, Denízia. **Compósitos de serragem de madeira e resíduos de recauchutagem de pneu.** (Tese de doutorado) . Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2008. Acesso em setembro de 2010.
- MONTENEGRO, Nadja; LOPES,Harlenn; ROCHA, Bruno.**Estudo de viabilidade logística da utilização do asfalto-borracha na pavimentação no estado do Ceará.** (programa de mestrado) – Universidade Federal de Ceará (UFC).Ceará. Acesso em outubro de 2010.
- GRUPO GRECA ASFALTOS. **Informativo trimestral Greca Asfalto –** Eng. Armando Morilha – Direto do grupo Greca Asfalto. Setembro,2007 Ano 4 – Número 11. Acesso em Setembro de 2010.

- GOMES, Renato; LIMA, Wagner; LIMA, Márcia. **Avaliação da situação para destinação final de pneus Insertsíveis no município de Vitória/ES.** 23º Congresso Brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. – Universidade Federal de Espírito Santo (UFES) – Acesso em dezembro, 2010.
- DNIT. **Manual de pavimentação.** Publicação IPR-719.3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006. Acesso em Dezembro, 2010.
- GRUPO GRECA ASFALTO. **Estudo comparativo do desempenho de um recapeamento utilizando asfalto borracha.** Porto Alegre, 2006. Acesso em dezembro, 2010.
- GRUPO GRECA ASFLATO. **Ecoflex B – Ligante asfáltico modificado por borracha de pneus.** Belo Horizonte, 2008. Acesso em dezembro, 2010. **Aplicação da mecânica de pavimentos na análise de fadiga das misturas asfálticas com adição de borracha.** Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul (Programa de graduação). Acesso em dezembro, 2010.
- BERTOLLO, Sandra; JUNIOR, José; VILLAVERDE, Romulo; FILHO, Delchi. **Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados.** São Paulo, 2000. Acesso em Janeiro, 2011.
- OLIVEIRA, Francisco; JUNIOR, Ernesto. **Acúmulo em remoção de borracha em pavimentos asfálticos do aeroporto internacional de Fortaleza.** Universidade Federal de Ceará. Fortaleza. Acesso em janeiro, 2011.

- DER/SP. **Concreto asfáltico com asfalto borracha (processo úmido)** Especificação técnica. Fevereiro, 2007. Acesso em fevereiro, 2011.
- ODA, Sandra. **Borrachas de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação.** Universidade estadual de Maringá. Paraná, 2001. Acesso em fevereiro, 2011.
- CARVALHO, Clara. **Inovações tecnológicas, reciclagem e redução de custos na indústria da construção civil.** Universidade estadual paulista. São Paulo, 2003. Acesso em março de 2011.
- GIULIO, Gabriela. **Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto.** Acesso em março, 2011.
- SOARES, Rodrigo; ASSIS, Edilson. **O uso da borracha de pneu na pavimentação como uma alternativa ecologicamente viável.** Acesso em setembro 2010.
- ORSI, Alvares; SIMON, Cristiana. **Asfalto borracha: Uma alternativa ambiental para pneus em desuso.** Acesso em outubro de 2011.
- IZIDORO, Natália. **Asfalto com borracha de pneu dura 30% mais que o asfalto comum.** Acesso em outubro de 2011.
- VASCONCELOS, Fabiana. **Asfalto misturado com borracha resiste 16 vezes mais.** Universidade de Brasília. Brasília, 2008. Acesso em novembro de 2011.