UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Humberto Salvi da Carvalheira Bertino

Luan Miranda Castor

RECICLAGEM A FRIO DE PAVIMENTO COM USO DE RECICLADORA DE ASFALTO

RECIFE
2017

Humberto Salvi da Carvalheira Bertino
Luan Miranda Castor

RECICLAGEM A FRIO DE PAVIMENTO COM USO DE RECICLADORA DE ASLFATO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Estradas

Orientador: Prof. Dr. Prof. Maurício R. Pina Moreira

RECIFE

2017

Catalogação na fonte

Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

B544r Bertino, Humberto Salvi da Carvalheira.

Reciclagem a frio de pavimento com uso de recicladora de asfalto / Humberto Salvi da Carvalheira Bertino, Luan Miranda Castor. - 2017.

32 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Renato Pina Moreira.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Civil, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Reciclagem. 3. Pavimentação. 4. Asfalto. 5. Recicladora asfáltica. I. Castor, Luan Miranda. II. Moreira, Maurício Renato Pina. (Orientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2017-71

Humberto Salvi da Carvalheira Bertino

Luan Miranda Castor.

RECICLAGEM A FRIO DE PAVIMENTO COM USO DE RECICLADORA ASFÁLTICA.

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM ENGENHEIRIA CIVIL.

Data da Defesa:

Examinado por:

_____

Prof. Maurício Renato Pina Moreira
(Orientador)

_____

Prof. Maurício Oliveira de Andrade
(Membro)

_____

Prof. Fernando Jordão de Vasconcelos
(Membro)

RECIFE, PE – BRASIL.

FEVEREIRO 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus, por estar sempre presente nos momentos bons e ruins, nos dando forças e saúde para seguirmos em frente em nossas jornadas.

Aos nossos pais, Paulo Antonio Dias Castor, Margareth Miranda Lages Castor, Ricardo Maia Bertino e Andréa Cristina Salvi da Carvalheira por sempre nos apoiarem, ajudando a tornar este sonho em realidade.

Aos nossos irmãos e irmãs, por se fazerem tão presentes, motivando-nos a buscar tudo que almejamos.

Às nossas companheiras, por todo amor, companheirismo, amizade e incentivo.

Ao nosso Professor Maurício Renato Pina Moreira, por quem temos muito respeito, por sua disposição, dedicação, empenho e orientação.

A todos os professores e amigos do curso de Engenharia Civil da UFPE, por todos os ensinamentos e experiências passadas a nós, contribuindo assim para nossa formação e crescimento profissional.

RESUMO

O reuso dos materiais na construção civil é uma das intervenções que vem sendo bastante consideradas na atualidade. Em pavimentações, estas se dão na aplicação sobre a estrutura do pavimento (base e sub-base) e, inclusive, na camada asfáltica.

Uma das maneiras mais difundidas, nesta área, é o uso de agregado reciclado em camadas estruturais do pavimentos. Esse material, que seria descartado em bota-fora, onerando a custo da obra com transporte e destinaçao do resíduo, agora integra um processo que consiste na retirada do pavimento, na sua homogeneização e enriquecimento com outros aditivos, caso necessário, para depois ser aplicado na nova infraestrutura do pavimento.

A difusão dessa forma de reciclagem e a possibilidade de uso dos diversos materiais componentes do resíduo (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.) são aspectos que contribuem para a redução dos custos, aliado a sustentabilidade, maior produtividade e melhores qualidades do produto final.

Para tal, este estudo focará na aplicação da Recicladora Asfáltica na aplicação da reciclagem a frio do pavimento. Também mostrará a importância da investigação da patologia do pavimento, de modo a identificar a intervenção com melhor custo x benefício, levando em consideração a classificação da rodovia, disponibilidade de recursos, os materiais disponíveis na localidade e metas de estabilização.

Palavras-chave: Reciclagem; Pavimentação; Asfalto; Recicladora Asfáltica.

ABSTRACT

The reuse of materials in civil construction is one of the interventions that are being widely considered today. In pavements, it occurs on the structure of the pavement (base and sub-base) and even on the asphalt layer.

One of the most widespread ways in this area is the use of recycled aggregate in structural layers of pavements. This material, which would be discarded in boot-off, costing the work with transportation and destination of the waste, now integrates a process consisting of the removal of the layers, its homogenization and enrichment with other additives, if necessary, and then applied on the new infrastructure.

The diffusion of this form of recycling and the possibility of using the different materials of the waste (concretes, mortars, ceramic materials, sand, stones, etc.) are aspects that contribute to the reduction of costs, together with sustainability, higher productivity and better qualities of the final product.

For now, this study will focus on the application of the Asphalt Recycler in the cold recycling of the pavement. It will also show the importance of investigating the pavement pathology, in order to identify the intervention with the best cost x benefit, taking into account the classification of the highway, availability of resources, materials available in the locality and stabilization goals.

Keywords: Recycling; Paving; Asphalt; Asphalt Recycler.

Lista de Figuras

Figura 1: Camadas de Pavimento 9
Figura 2: Qualidade de rodagem x Tempo/Trânsito 9
Figura 3: Transferência da carga pela estrutura do pavimento 11
Figura 4: Componentes do pavimento 12
Figura 5: Deterioração do pavimento 14
Figura 6: Fluxograma de procedimentos para recuperação do pavimento 16
Figura 7: Opções de recuperação do pavimento 20
Figura 8: Câmara de reciclagem da Recicladora de Asfalto 21
Figura 9: Comboio de Reciclagem 22
Figura 10: Emulsão Betuminosa 27
Figura 11: Espuma de Asfalto 27
Figura 12: Vantagens técnicas BSM x BGS 29

Sumário

1. Pavimentos Rodoviários 9
1.1. Estruturas do Pavimento 10
1.2. Componentes do Pavimento 11
1.2.1. Camada de rolamento 12
1.2.2. Camadas estruturais 12
1.2.3. Subleito 13
2. Deterioração do Pavimento 13
3. Recuperação do Pavimento 15
4. Opções de recuperação do pavimento 18
4.1. Recuperação superficial 18
4.1.1. Recapeamento asfáltico sobreposto 19
4.1.2 Fresagem e substituição 19
4.2. Recuperação estrutural 19
4.2.1. Reconstrução total das camadas 19
4.2.2. Reciclagem em usinas 20
4.2.3. Reciclagem in situ 20
5. Reciclagem a frio In Situ 21
5.1. Equipamentos Auxiliares 22
5.2. Aplicações 23
5.2.1. Homogeinização 23
5.2.2. Estabilização de solo com cal 24
5.2.3. Estabilização de solo com cimento 24
5.3. Vantagens Técnicas 24
6. Agentes estabilizadores 25
6.1. Agentes estabilizadores de cimento 25
6.2. Agentes estabilizadores de betume 26
6.2.1. Emulsão betuminosa 26
6.2.2. Espuma de asfalto 27
6.3. Camada Estabilizada com Betume (BSM) 28
7. Conclusão 31
8. Bibliografia e Materiais de Referência 32

1. Pavimentos Rodoviários

O pavimento rodoviário é formado por camadas. Mas, assim como um iceberg, só é possível enxergar apenas uma pequena parte de sua estrutura, no caso a camada de rolamento, enquanto que a maior parte não é visível. Essa conjuntura leva à prática de métodos equivocados na hora da execução e manutenção das rodovias, pois muitas vezes o problema não é investigado a fundo e foca-se apenas na parte visível.

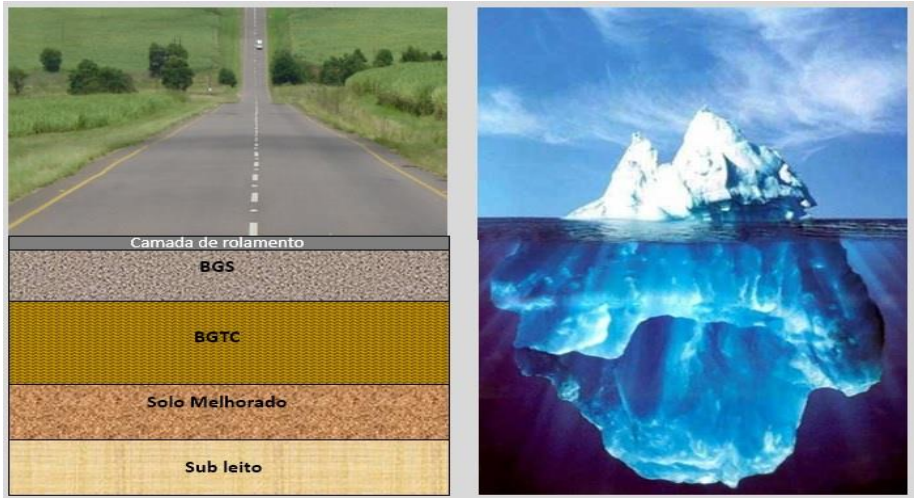

Figura 1: Camadas de Pavimento

A prática mais comum aqui no Brasil é a de remover a camada asfáltica deteriorada e a repor por uma nova, a conhecida e popular “fresa e capa”. Outras vezes é apenas feita uma nova camada asfáltica acima da anterior, deteriorada. Infelizmente essas soluções são totalmente ineficazes, mas, por interesses muitas vezes políticos, essas soluções são adotadas para se ter uma sensação visual de que o problema da rodovia foi resolvido.

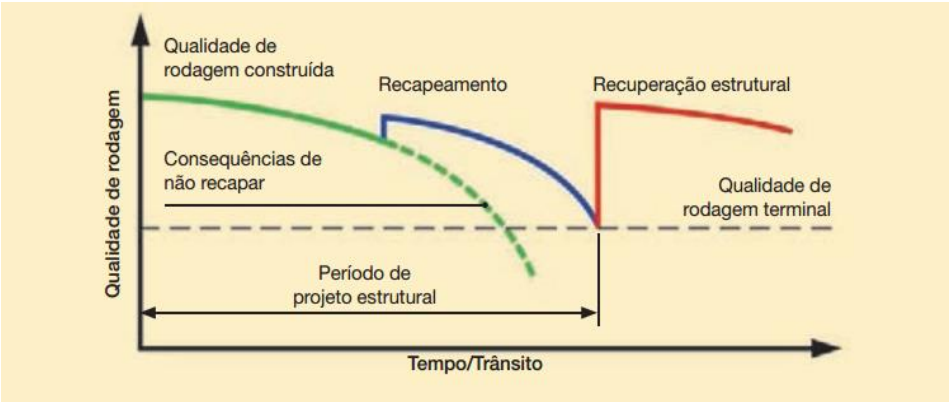

Figura 2: Qualidade de rodagem x Tempo/Trânsito

Segundo dados do DNIT, 70% da malha rodoviária brasileira pavimentada possui idade superior a 40 anos. O problema é que os projetos brasileiros, em sua grande maioria, foram projetados para uma vida útil de 10 anos. Para aumentar ainda mais o problema, o tráfego de carros e caminhões atualmente é muito maior do que aquele que foi utilizado em muitos desses projetos. Além disso, os caminhões atuais conseguem transportar uma carga muito maior do que os existentes à época, sendo bem mais pesados.

Com tudo isso, a situação é crítica na maior parte das rodovias brasileiras. Entretanto, com essa cultura de apenas tratar o que é visível, a conservação de nossas rodovias tem se limitado a fresar uma determinada espessura do asfalto deteriorado e aplicar um novo. Como os problemas na grande maioria as vezes vêm das camadas subjacentes, esse procedimento acaba se tornando inútil e, em alguns casos, basta poucos meses para que os problemas de trincas, fissuras, formações de buracos ou afundamentos voltem a surgir.

A importância das camadas estruturais de base de uma rodovia pavimentada deve sempre ser levada em consideração. Seja em construções de novas rodovias, em projetos de recuperação de estradas deterioradas ou mesmo em pavimentação urbana, pois a origem dos problemas quase sempre se encontra nessas camadas subjacentes.

1.1. Estruturas do Pavimento

Os pavimentos rodoviários são compostos por três componentes básicos:

- Capa: A superfície de rolamento que é normalmente a única parte visível da estrada;
- Camadas estruturais: As camadas que distribuem a carga;
- Subleito: A “terra” existente a qual a estrada é construída.

Normalmente o subleito não tem capacidade de suportar cargas de trânsito diretamente e também não possuem sua superfície plana. Então, são necessários fazer tanto a regularização, quanto o reforço do subleito, antes da construção da estrada. A camada de rolamento é predominantemente funcional, tem como objetivo proporcionar conforto e segurança, inclusive em consideração ambiental, por atenuar o nível de ruído. Já as camadas estruturais, tem a responsabilidade de distribuir as cargas de alta intensidade geradas pelo trânsito sobre uma área mais ampla do

subleito, conforme figura 3, reduzindo o nível de tensão sobre esta camada. Essa camada pode variar em sua composição (tipo de material) e espessura (variam de 125 a 250 mm), de acordo com a demanda da rodovia. A resistência das camadas crescem quanto mais próximas forem da superfície.

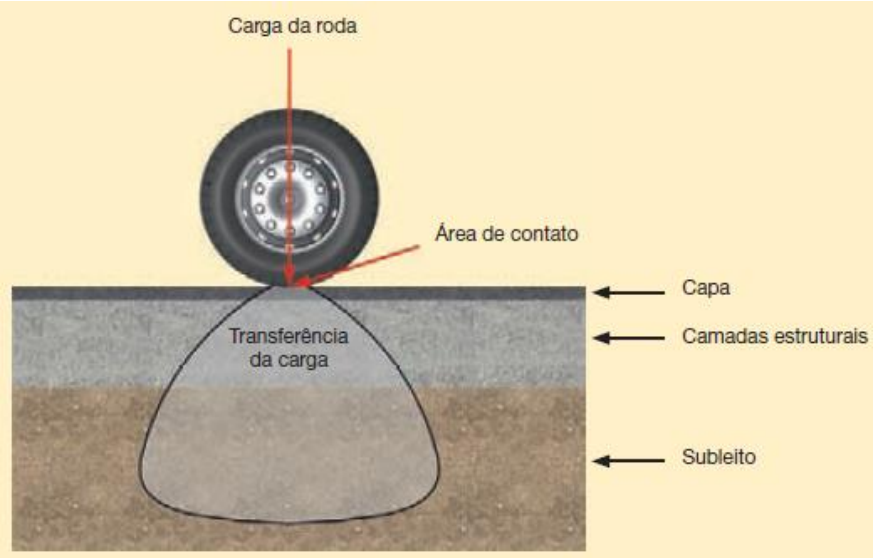

Figura 3: Transferência da carga pela estrutura do pavimento

Basicamente, existem três tipos de pavimentos:

- Pavimentos rígidos: Pavimentos com uma camada espessa de concreto de alta resistência sobre uma camada ligada;
- Pavimentos flexíveis: Estes são construídos a partir de materiais naturais, misturados ou não, com as camadas superiores, às vezes, sendo ligadas (betumes e/ou levemente cimentadas) para alcançar requisitos de resistência mais altos.

Geralmente, apenas os pavimentos flexíveis podem ser reciclados in situ economicamente. Já os rígidos, construídos a partir de concreto de alta resistência, são normalmente demolidos ao final de sua vida útil. Porém os de concreto não armado, têm sido reciclados in situ com sucesso também.

1.2. Componentes do Pavimento

Cada um dos três componentes básicos mencionados tem um propósito específico e único.

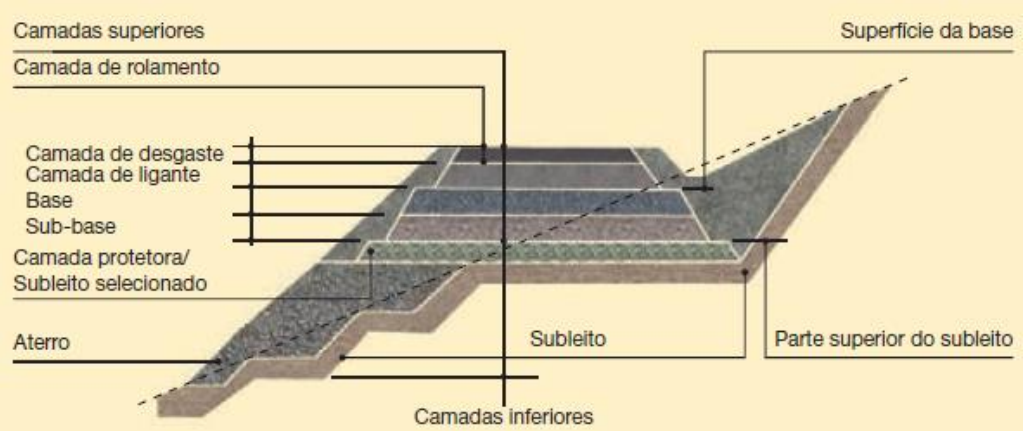

Figura 4: Componentes do pavimento

1.2.1. Camada de rolamento

É a interface do pavimento com o tráfego e o meio ambiente. Tem como objetivo proteger a estrutura do pavimento de ambos, proporcionando durabilidade e impermeabilidade. Contra os efeitos do tráfego, seriam em relação às tensões decorrentes das cargas de rodas na superfície, tanto no plano vertical, como horizontal, devido às ações de frenagem e giro. E também quanto à abrasividade dos pneus em contato com a pista. Contra os efeitos ambientais, seriam em relação aos intempéries. Reproduzindo efeitos térmicos (expansão e retração), oxidação (exposição a agua e agente químicos) e radiação ultravioleta (durabilidade para absorção dos raios). Além da aderência, a camada de rolamento proporciona flexibilidade, durabilidade e impermeabilidade superior.

1.2.2. Camadas estruturais

Estas são responsáveis pela transferência da carga superficial ao subleito. Essas tensões são dissipadas a medida que atravessam estas camadas, atingindo o subleito numa intensidade inferior e abrangindo área mais ampla. A estrutura do pavimento geralmente consiste em várias camadas de materiais com diferentes características de resistência e rigidez. Na parte superior, as camadas estão sujeitas a níveis mais altos de tensão, logo, precisam ser construídos a partir de materiais mais fortes e rígidos. Os pavimentos flexíveis são constituídos a partir de três tipos de material: Não ligados (britas e cascalhos), que transferem as cargas através das partículas individuais. Ligados (materiais estabilizados com cimento e asfalto), que atuam como uma viga larga e os Ligados não continuamente (materiais estabilizados com betume, com espuma de asfalto ou emulsão de betume como ligantes), que

comportam-se como materiais granulares com atrito particular retido mas com aumento de coesão e rigidez.

1.2.3. Subleito

É o responsável por fornecer o suporte à toda a estrutura do pavimento. Pode ser material in situ (de corte) ou importado (aterro). As características (resistência e rigidez) deste material ditam o tipo de estrutura de pavimento necessária para distribuir a carga aplicada.

2. Deterioração do Pavimento

A origem da grande maioria dos problemas estruturais dos pavimentos é encontrada nas camadas abaixo da camada de rolamento. Isso acontece porque os pavimentos submetidos a cargas acabam se deteriorando de baixo para cima. Todo material que recebe uma carga acaba sofrendo compressão nas suas fibras superiores e tração nas fibras inferiores. Essa tração na parte inferior do pavimento faz com que surjam fissuras que com o tempo vão subindo, chegando finalmente até a camada de rolamento.

O pavimento é projetado para resistir um certo número de solicitações de carga, apresentando um comportamento elástico. Ou seja, o material sofre uma deformação com o surgimento de uma carga e depois retorna ao seu estado inicial após a passagem desta carga. Após um certo número de aplicações de carga, esse material não consegue mais retornar ao eu estado original, originando assim a trinca.

Alguns problemas fazem com que esse surgimento de trincas apareça precocemente nas camadas do pavimento, alguns deles são:

- Compactação da base: uma compactação mal executada (supercompactação) pode resultar em afundamentos que danificam as camadas acima;
- Produção do asfalto: o asfalto precisa ser homogêneo e ter uma dosagem correta;
- Espessura da camada asfáltica: é a camada que transmite os esforços para as camadas subjacentes, portanto precisa ser bem dimensionada para resistir aos esforços;

- Limite de peso dos veículos: a falta de controle e fiscalização do peso dos caminhões.

A rachadura por fadiga dos materiais ligados começa na parte inferior da camada, onde a tração causada pelas cargas de rodas atinge seu máximo. Essas rachaduras se propagam até a superfície. A partir do momento que as camadas inferiores do pavimento já sofreram com o início da propagação de fissuras e trincas é inútil realizar a manutenção apenas na camada asfáltica superior, pois em pouco tempo os problemas voltam a ser visíveis na camada de rolamento. A rachadura de cima para baixo pode ocorrer em camadas de asfalto de maior espessura. A deformação permanente do material subjacente acentua as rachaduras efetivamente aumentando a tração imposta pelas cargas de rodas.

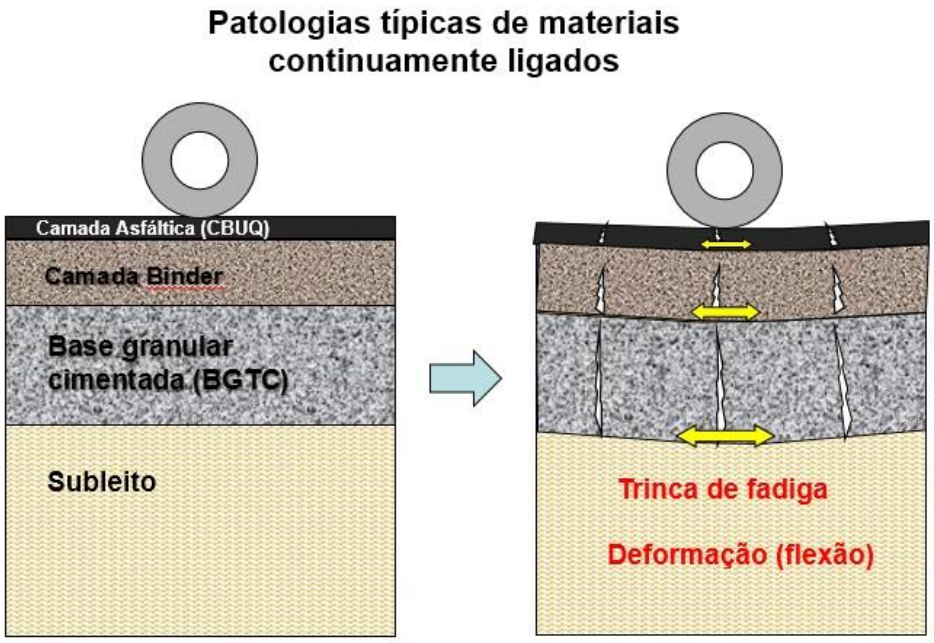

Figura 5: Deterioração do pavimento

Depois que a rachadura penetrar a capa de proteção, a água poderá entrar na estrutura subjacente do pavimento, ocorrendo o efeito de amolecimento, causado pela água, levando a redução da resistência, o que resulta em uma taxa maior de deterioração mediante a repetição de cargas de roda. A água também age, em um material saturado, como um agente destrutivo, quando o pavimento é submetido a cargas, semelhante a um flúido hidráulico, que transmite predominantemente cargas de roda verticais em pressões que rapidamente erodem a estrutura do material

granular e causam a remoção do betume do agregado no asfalto. Por conta disso, os materiais finos são expulsos através das rachaduras por “bombeamento”, criando vazios na estrutura do pavimento, causando a formação rápida de buracos e deterioração generalizada do pavimento.

Outro fator que pode causar rachaduras superficiais, principalmente em capas asfálticas, se dá com a ausência de transito, pois é o contato dos veículos que mantém a vida do betume. A oxidação e endurecimento subsequente causam rachaduras térmicas na superfície do ligante betuminoso. Então, sujeitar o betume a repetições de tensões causa o fechamento destas rachaduras à medida que se formam, assim evitando a sua propagação.

3. Recuperação do Pavimento

O termo “recuperação do pavimento” é utilizado para descrever o trabalho necessário para restaurar uma estrada deteriorada e recuperar a integridade estrutural do pavimento. Se houver um trabalho preventivo, com intervenções de rotina e recapeamento, em tempo hábil, a necessidade de recuperação pode ser postergada. Mas na prática não é o que acontece, o que resulta na necessidade, muitas vezes prematura, da recuperação do pavimento.

Ao final da vida útil do pavimento, a taxa de deterioração da qualidade de rodagem aumenta devido as deformações, rachaduras, buracos e outros sintomas de deterioração. Os esforços necessários para a manutenção da integridade da superfície e de um nível adequado de qualidade tendem a aumentar significativamente, até chegar ao ponto em que faz mais sentido, do ponto de vista econômico, recuperar todo o pavimento em vez de tratar áreas localizadas de deterioração. O consenso geral aponta que alcançados 15% da área superficial com pequenos consertos, é mais econômico recuperar todo o trecho da estrada que continuar aplicando remendos.

Dentre os vários procedimentos do trabalho de recuperação, incluem a coleta de informações (ex: dados de tráfego), a condução de pesquisas e ensaios para identificar e definir a composição e a condição das várias camadas da estrutura do pavimento existente (medição de deflexão), o resumo e a interpretação de todos os dados disponíveis para possibilitar que opções e alternativas de projeto atendam à

vida útil do projeto (capacidade estrutural) a ser formulado e, finalmente, a decisão sobre qual é a melhor opção. O fluxograma apresentando na figura 6, se aplica a todas as obras de recuperação e pode ser ajustado de acordo com as necessidades específicas.

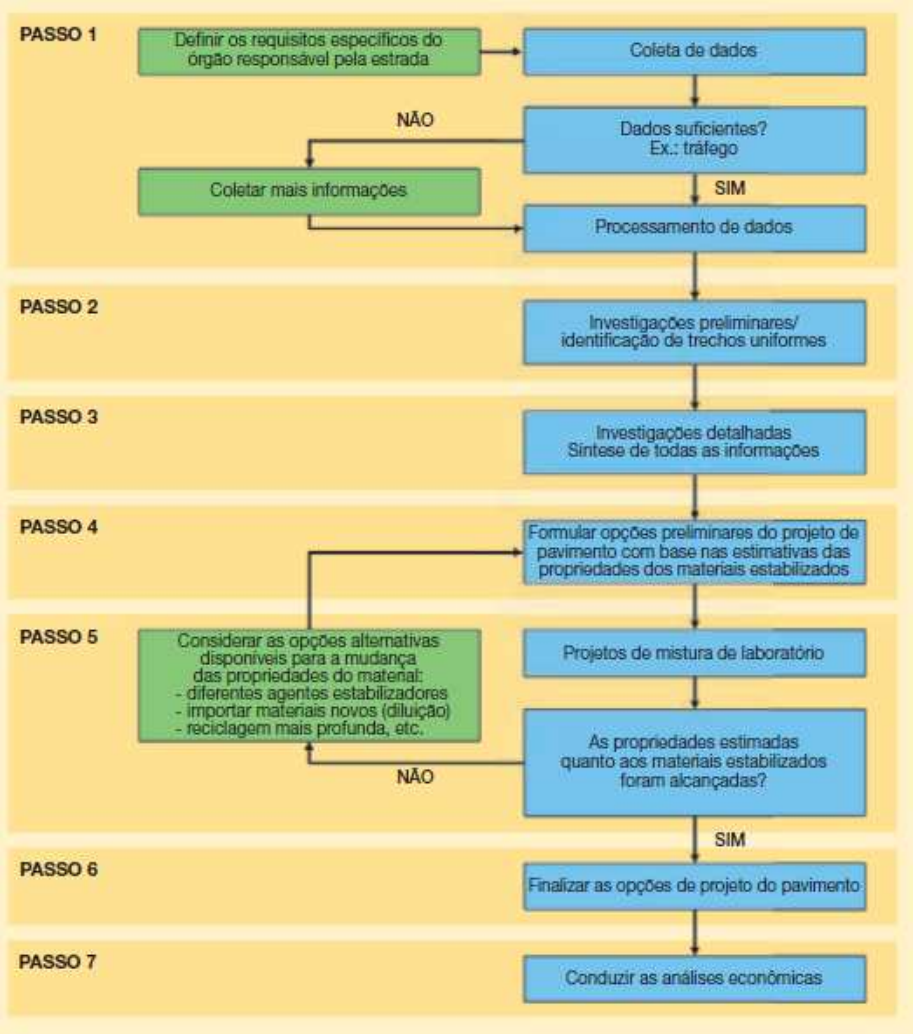

Figura 6: Fluxograma de procedimentos para recuperação do pavimento

- **Passo 1**: Coleta de dados/informações disponíveis ao processo

É identificada qual a vida útil de projeto para saber se a exigência de vida útil é curta ou longa; quais as propriedades funcionais da estrada recuperada (qualidade de rodagem, aderencia e níveis de ruído); o orçamento disponível para a recuperação; os dados de tráfego para definir os requisitos de sua capacidade estrutural; as informações sobre o pavimento existente (espessura das camadas, detalhes dos materiais utilizados, resultados de testes de controle de qualidade); e, por fim, os

dados geológicos ao longo da rota (a proximidade de materiais disponíveis irá influenciar as opções de recuperação) e registros meteorológicos da região.

- **Passo 2**: Investigações preliminares

Definir os trechos uniformes das camadas subjacentes da rodovia analisando-se qualquer dado de deflexão e conduzindo-se uma vistoria ampla. Sintomas semelhantes de deterioração e/ou de medições de deflexão indicam condições semelhantes na estrutura subjacente do pavimento. Essas informações são usadas para identificar os limite entre os diferentes trechos uniformes e os tipos de deterioração (indicando o modo de falha). Também deve ser feita uma inspeção visual, que fornecem pistas em relação à causa da deterioração.

- **Passo 3**: Investigações detalhadas

Nesta fase inicia-se a escavação de poços de ensaio para a descoberta da espessura das camadas do pavimento, o teor de umidade do material, a densidade in situ e as condições do material. É feita a extração de corpos de prova para serem analisados os parâmetros de resistência e outros ensaios de laboratório como a análise de peneiramento.

- **Passo 4**: Opções Preliminares do projeto de recuperação do pavimento

O essencial para definir a melhor solução é a identificação de todas as possibilidades já no começo. Entretanto, a razoabilidade deve prevalecer na identificação de todas as possibilidades, já que algumas destes podem ser obviamentes inadequadas (custos excessivos e invibialidade construtiva) e assim serão descartadas. Após identificar todas as alternativas, um processo subjetivo de seleção é executado para identificar as três opções mais adequadas, assim reduzindo a quantidade de trabalh analítico necessário.

Resumidamente, as fases de investigação e projeto devem ser integradas com o objetivo de entender o comportamento do pavimento existente. O segundo objetivo é determinar o projeto de pavimento com a melhor relação de custo e benefício que satisfaça às expectativas em relação a vida útil e às propriedades funcionais, minimizando as intervenções de manutenção.

- **Passo 5**: Projeto de mistura de laboratório

Projetos de mistura são uma parte fundamental na investigação de pavimentos e do procedimento de projeto, servindo ao objetivo de estabelecer métodos mais eficazes de tratamento de materiais para a melhoria das propriedades. São selecionados, inicialmente, agentes estabilizadores levando em consideração propriedades exigidas em relação ao material estabilizado, a disponibilidade, a qualidade do aditivo e o seu custo. Então busca-se a melhor alternativa de mistura para que a nova camada estabilizada consiga resistir aos esforços solicitantes com um custo-benefício razoável.

- **Passo 6**: Finalização das opções do projeto do pavimento

Em obras de reciclagem, a espessura da camada estrutural deve aumentar. Isso resultará em um corte mais profundo, para que os diferentes materiais possam ser misturados com os agentes estabilizadores. Isto faz com que o pavimento fique mais profundo, reduzindo os níveis de tensão e deformação nas camadas do pavimento.

- **Passo 7**: Análises econômicas

O método de análise econômica normalmente é usado para a comparação de alternativas de recuperação de pavimentos. O nome da técnica utilizada é método Valor Presente de Custo. Este método baseia-se em estimativas de todos os custos que serão decorrentes durante a vida do pavimento (custos integrais que incluem os custos iniciais de construção, mais o custo de toda a manutenção de rotina, mais a recuperação ao final da vida útil), realizando-se o desconto para contabilizar o valor temporal do dinheiro.

4. Opções de recuperação do pavimento

4.1. Recuperação superficial

As medidas de recuperação superficial tratam de problemas que são confinados à parte superior do pavimento. Esses problemas estão normalmente relacionados ao envelhecimento do betume e a fissuras superficiais devido as forças térmicas. Os métodos mais frequentemente utilizados para lidar com esse tipo de problema incluem:

4.1.1. Recapeamento asfáltico sobreposto

É a pavimentação asfáltica sobre a superfície já existente. Esse método ignora a origem dos problemas de fissuração, mas é um método rápido e de impacto mínimo aos usuários da rodovia. As fissuras, porém, logo serão refletidas novamente pelo recapeamento e, assim, precisando ser tratadas uma outra vez. O recapeamento repetido também aumenta as elevações da camada de rolamento que podem causar problemas de escoamento e acesso. Essa técnica também é conhecida por “asfalto eleitoral”, porque muitos políticos o fazem próximo da época de eleição.

4.1.2 Fresagem e substituição

Esse método remove a camada rachada de asfalto e a substitui com asfalto quente novo. O processo é relativamente rápido devido às altas capacidades de produção de fresadoras modernas. Com essa técnica, os problemas com elevação da camada de rolamento é vencido, e também as fissuras superficiais do asfalto. Porém, fissuras com origens mais profundas não são resolvidas, podendo novamente chegar à superfície.

4.2. Recuperação estrutural

A recuperação para lidar com problemas de origens mais profundas no pavimento é normalmente tratada como uma solução de longo prazo. Porém, técnicas de recuperação estrutural do pavimento têm evoluído muito nos últimos anos. Hoje, é possível tratarmos de problemas estruturais no pavimento de forma rápida e prática. Existem várias opções para recuperação estrutural do pavimento: reconstrução total das camadas estruturais; reciclagem em usinas; reciclagem in situ. As técnicas de reciclagem podem também ser subdivididas em a frio ou a quente.

4.2.1. Reconstrução total das camadas

Essa técnica realmente é a que melhor sana qualquer tipo de problema na rodovia pavimentada, mas possui vários fatores negativos envolvidos como um maior custo de aplicação, maior tempo de construção e um problema de acomodação do tráfego visto que é preciso fechar totalmente a rodovia em operação. Esse método é feito escavando-se totalmente as camadas da rodovia e as refazendo por completo.

4.2.2. Reciclagem em usinas

O asfalto é retirado junto com parte da camada estrutural da rodovia e, então, o material retirado é transportado através de caminhões para local próximo ao local de trabalho, onde é feita uma usina de reciclagem asfáltica. Esse material é reciclado e retornado ao local de trabalho para ser despejado e criar uma nova camada estrutural mais resistente e livre de fissuras. Alguns problemas relacionado com esse tipo de reciclagem é o alto custo de transporte de material e a necessidade de um espaço para ser criada a usina de reciclagem.

4.2.3. Reciclagem in situ

Esse tipo de reciclagem é feita com o uso de uma máquina chamada de recicladora asfáltica. O método é bastante interessante pois possibilita uma maior rapidez no processo, um melhor custo-benefício em relação aos outros métodos de recuperação estrutural, além de ser ambientalmente correta.

Neste trabalho é detalhada a recuperação estrutural de rodovias pavimentadas através do método de reciclagem a frio in situ com o uso da recicladora asfáltica. Esse método é uma das opções de reciclagem existente para o tratamento das rodovias.

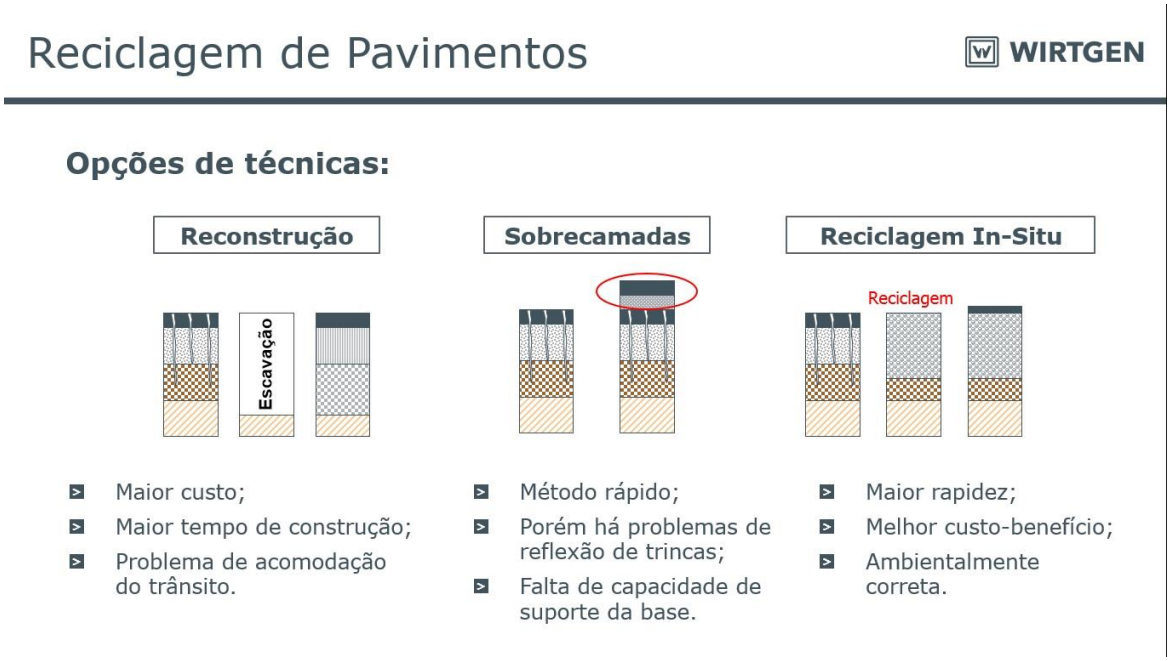

Figura 7: Opções de recuperação do pavimento

5. Reciclagem a frio In Situ

Para a recuperação de rodovias deterioradas a melhor solução é a reciclagem de asfalto. Essa solução ainda tem a possibilidade de utilizar materiais de reforço, tais como cimento, emulsão asfáltica, espuma asfáltica ou agregados para a correção granulométrica da mistura.

A reciclagem asfáltica consiste na reutilização total dos materiais existentes em pavimentos danificados no processo de reabilitação da via. A grande vantagem desse método é justamente de reaproveitar 100% do material e ainda poder reforça-lo com agentes estabilizadores.

O método mais comum e amplamente utilizado em todo o mundo é a reciclagem a frio In Situ. Neste processo é utilizada a Recicladora Asfáltica. Essa máquina possui um cilindro especial dotado de dentes compostos por aço e com sua ponta de tungstênio de alta resistência. A medida em que a recicladora asfáltica passa, o pavimento danificado é cortado, triturado e, com o giro contínuo em sentido ascendente do cilindro, o material é misturado e homogeneizado. A máquina possui cerca de 2,5m de largura podendo trabalhar em apenas uma faixa da rodovia, se tornando assim mais interessante, pois não é necessário o fechamento total do tráfego na via. Tudo é executado em uma única passada da recicladora, portanto o índice de produtividade desse método é altíssimo.

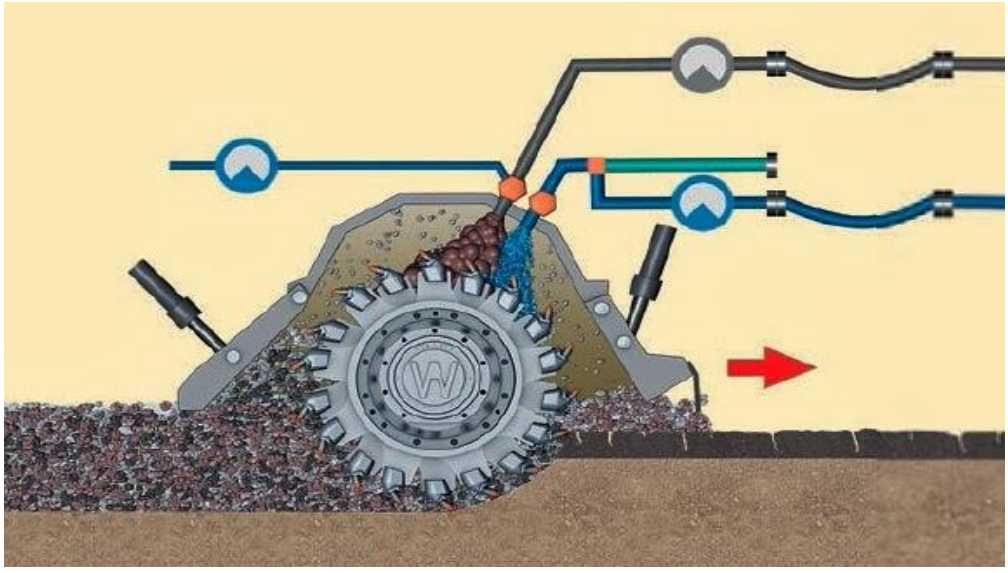

Figura 8: Câmara de reciclagem da Recicladora de Asfalto

A velocidade de avanço depende da profundidade trabalhada e do tipo de material. A restrição existente é a de que a camada de base granular tenha agregados de tamanho máximo de um terço em relação à profundidade de trabalho. A profundidade trabalhada precisa ultrapassar o nível inicial das fissuras.

A recicladora possui uma caixa de reciclagem onde ficam o cilindro de corte juntamente com as barras de espargimento de água e asfalto. É nessa caixa recicladora onde acontece a homogeneização do solo. Os agentes estabilizadores podem também ser lançados sobre a via para que seja misturado junto com o material reciclado na passagem da recicladora asfáltica.

5.1. Equipamentos Auxiliares

A reciclagem de asfalto a frio In Situ não depende apenas da recicladora asfáltica. Os equipamentos que fazem parte do processo de execução da reciclagem são chamados de trem de reciclagem (ou comboio de reciclagem).

Figura 9: Comboio de Reciclagem

À frente da recicladora, um caminhão pipa abastece de forma contínua a máquina, sendo empurrada pela mesma através de uma barra especial. Após a passagem da recicladora, um rolo executa a compactação inicial. Caso o material reciclado for predominantemente granular, este rolo deve ser de cilindro liso. Caso a reciclagem atingir camadas de base com material argiloso, o cilindro de compactação deve ser do tipo pé-de-carneiro.

Após a compactação inicial, o material é nivelado junto às extremidades trabalhadas através de uma motoniveladora; esse equipamento possui uma lâmina disposta horizontalmente e ajustável verticalmente que corta o material exatamente na altura determinada em projeto. Depois do material ser nivelado é hora dos rolos compactadores voltarem para finalizar a compactação e adensamento do pavimento. O recomendado é que os dois últimos rolos compactadores sejam de cilindro liso e de pneus, para que haja uma boa aderência com o material que será colocado acima.

Quando finalmente todo o trem de reciclagem completa o percurso, a superfície está pronta para ser finalizada. Ela então é limpa com jatos de ar comprimido para a remoção de sujeiras e partes do material que ficaram soltas e finalmente recebe uma nova camada asfáltica sobre a camada reciclada. Essa nova camada é feita com a utilização de uma vibroacabadora de asfalto. Esse equipamento possui uma mesa compactadora que tem a tarefa de pré-compactar e nivelar a camada asfáltica assentada. A mesa possui um sistema de placas vibratórias aquecidas que executam esta etapa do processo.

5.2. Aplicações

O processo de reciclagem é uma boa solução técnica e econômica para a melhoria de ruas sem pavimentação (chão batido). Em épocas de seca a passagem de veículos provoca nuvens de poeira, enquanto que nas épocas de chuva estas vias tornam-se quase que intransitáveis.

Com a utilização da recicladora asfáltica o material existente é misturado e homogeneizado, podendo ser adicionado britas e outros materiais para que haja uma melhor trafegabilidade.

O uso da recicladora asfáltica também é interessante para a restauração de rodovias pavimentadas que já possuem seu pavimento degradado, seja pelo tempo, seja por fissuras e trincas em qualquer de suas camadas. Uma camada com alto grau de degradação pode ser completamente recuperada com apenas uma única passada da recicladora asfáltica. Se há um alto grau de degradação em ambas as camadas (camada asfáltica e a camada de base granular abaixo), o uso da reciclagem a frio In Situ com uso da recicladora asfáltica é sem dúvidas o melhor método para a sua recuperação.

5.2.1. Homogeinização

Para homogeinizar solo existente, a recicladora solta o material sem a adição de agentes ligantes. Seguido, logo depois, por um rolo compactador pé de carneiro, de modo a garantir a compactação ideal de projeto. A motoniveladora é utilizada para terminar a série previamente estabilizada. A mistura homogênea e a compactação do solo é feita por vários rolos compactadores lisos.

5.2.2. Estabilização de solo com cal

Para estabilizar o solo, o agente ligante, em uma primeira etapa, pode ser préviamente espalhado por um distribuidor de agente ligante. Seguindo logo atrás do espargidor, a recicladora homogeiniza o material ligante com o solo existente. O solo é compactado através de rolos compactadores pé de carneiro. A motoniveladora é usada para acabamento final do solo previamente estabilizado, e a compactação é feita por vários rolos compactadores lisos.

5.2.3. Estabilização de solo com cimento

Para produzir uma camada de ligantes hidráulicos, usa-se um espargidor de ligantes rebocável distribuindo o cimento previamente, seguido de um tanque de água. A recicladora mistura o material existente com cimento previamente espalhado para produzir uma mistura homogênea. Ao mesmo tempo, a água é injetada na câmara de mistura através de uma barra de injeção. Para acabamento, utiliza-se uma motoniveladora e, em seguida, a compactação é feita por rolos compactadores.

- Espessura de camada asfaltica reciclável: de 10 a 25 cm.
- Profundidade de trabalho: 0 a 560 mm.
- Faixa de desempenho ideal na estabilização do solo: 1000 a 12000 m²/dia
- Faixa de desempenho ideal para reciclagem a frio: 400 a 1200 m²/dia
- Velocidade de avanço máximo: 8,0m/min (não comprometer o corte, desbaste, mistura e homogeneização)

5.3. Vantagens Técnicas

1. Ótima mistura dos materiais, utilizando novos agregados ou agentes estabilizadores;
2. A adição de água e agentes estabilizadores é controlada eletronicamente através de computador de bordo;
3. Controle total da espessura da camada trabalhada;
4. Reaproveitamento de todo o material degradado existente;
5. Elevadíssima taxa de produtividade;

6. Poder ser executada durante períodos de tempo incertos, com sol ou chuva (desde que não seja em excesso);
7. Pela largura dos equipamentos existentes que vão de 2,0 m a 2,5 m de largura, sendo possível trabalhar em uma faixa de rolagem apenas, liberando as demais para o tráfego;
8. Aumento de 30% a 40% da duração da vida útil do asfalto.

6. Agentes estabilizadores

Todos os agentes estabilizadores têm como objetivo ligar as partículas de agregados individuais para aumentar a resistência e a rigidez e/ou aumentar a impermeabilidade e durabilidade dos materiais. Alguns agentes são mais eficazes que outros quando usados com materiais específicos e alguns apresentam claras vantagens de custo. A decisão sobre a melhor escolha devem ser influenciadas pelos seguintes critérios:

- Preço: O custo unitário da estabilização sempre será uma preocupação primária;
- Disponibilidade: Alguns agentes estabilizadores podem não estar disponíveis em algumas regiões;
- Características materiais: Alguns agentes estabilizadores são mais eficazes que outros em relação ao tipo de material (ex: a cal deve ser usada preferencialmente ao cimento para tratar de solos com alta plasticidade IP>10)
- Durabilidade: Os efeitos desejados da estabilização devem permanecer eficazes durando o período de serviço;
- Política: Alguns órgãos responsáveis pelas estradas têm políticas rígidas em relação ao uso de certos agentes.

6.1. Agentes estabilizadores de cimento

A principal função desses agentes é aumentar a resistência à carregamentos. Isso pode ser alcançado com o aumento significativo da resistência à tração e à compressão do material, ou com a redução de sua plasticidade. O cimento é o estabilizador que fornece o melhor resultado no aumento da resistência. A cal liberada durante o processo de hidratação reage com quaisquer partículas de argila que

possam estar presentes, assim reduzindo sua plasticidade. A cal, entretanto, é composta predominantemente de cal livre, sendo utilizada preferencialmente como agente estabilizador para materiais mais plásticos.

Os agentes estabilizadores cimentados produzem materiais quase quebradiços. O aumento da resistência de uma camada estabilizada resulta no aumento de sua fragilidade, com uma consequente redução de sua flexibilidade. Por isso a preocupação no momento de projetar o traço ideal, levando em consideração os requisitos de desempenho da camada estabilizada.

6.2. Agentes estabilizadores de betume

Embora existam muitas formas de betume, somente duas delas são usadas como agentes estabilizadores: Emulsão betuminosa e espuma de asfalto, ambas as formas podem ser usadas para tratar uma ampla série de materiais de pavimento, dispersando o betume de maneira não contínua, a marca dos materiais estabilizados com betume. Já com betume diluído não é considerado processo de estabilização, já que o betume se dispersa de maneira contínua, como no asfalto.

Uma camada construída a partir de materiais estabilizados com betume é relativamente flexível comparada a uma tratada com cimento. Esta não sofre tanto o fenômeno de rachadura por contração, como no cimento. A estabilização com esse tipo de material permite o tráfego de forma imediata após sua construção, devido ao rápido aumento da coesão. Essa propriedade reduz a tendencia do material a se esfacelar mediante a ação do trânsito. A estabilização de um material por betume melhora a resistência e reduz os efeitos adversos da água.

6.2.1. Emulsão betuminosa

Esse ligante é produzido em uma usina especializada. Quando uma emulsão é misturada com agregados, as gotículos betuminosas carregadas são atraídas às particulas dos agregados de carga oposta. A umidade e o tipo de agregado desempenham um papel importante na dispersão da emulsão betuminosa. O material estabilizado com emulsão betuminosa é chamado de emulsão BSM (materiais estabilizados com betume).

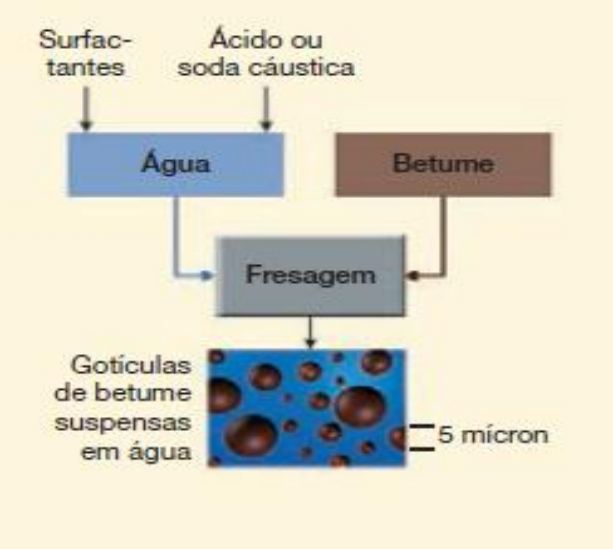

Figura 10: Emulsão Betuminosa

6.2.2. Espuma de asfalto

O ligante é produzido pela injeção de água no betume quente, resultando na espuma espontânea. As propriedades físicas do betume são temporariamente alteradas com a invejação de água que, em contato com o betume quente, é explosivamente transformada em vapor, que é preso em milhares de pequenas bolhas betuminosas. O processo de espuma ocorre em uma câmara de expansão em que betume e água são injetados a alta pressão. As bolhas de espuma de asfalto se desmancham em menos de um minuto. Quanto maior o volume da espuma, melhor será a distribuição do betume no agregado. Os materiais estabilizados com a espuma de asfalto também são chamados de BSM.

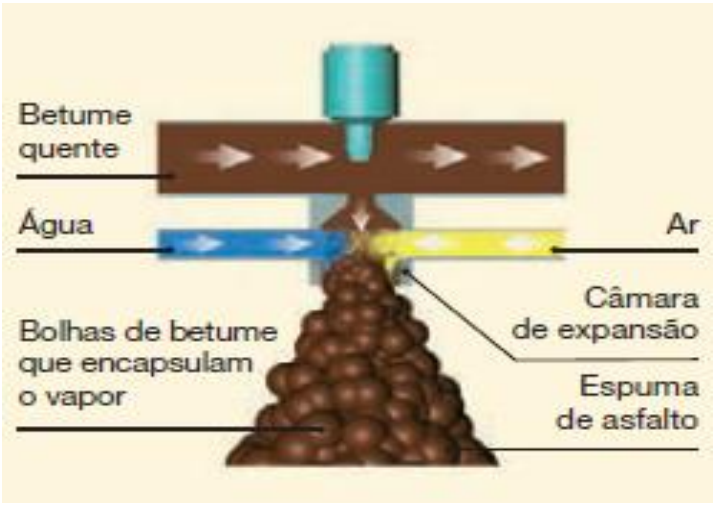

Figura 11: Espuma de Asfalto

A prática atual prefere tratar a emulsão de BSM e espuma de BSM igualmente em termos de propriedades de desempenham. As principais características são:

- Um aumento significativo na coesão em relação aos materiais granulares, sem nenhuma redução do angulo de atrito;
- Aquisição de resistência de flexão devido às propriedades viscoelásticas do betume;
- A melhoria da resistência à umidade e a durabilidade em relação ao material granular.

6.3. Camada Estabilizada com Betume (BSM)

Com o processo realizado pela recicladora asfáltica de corte e reprocessamento do material existente na rodovia, e na sequência a mistura de todo esse material ao betume em forma de emulsão asfáltica ou espuma de asfalto, é criada uma nova camada intermediária chamada de BSM (Bitumen Stabilized Material), que significa camada estabilizada com betume, como já foi dito anteriormente. A mistura com espuma de asfalto é mais utilizada por possuir quesitos técnicos levemente melhores que a emulsão asfáltica.

A camada BSM é composta por um material granular que não é ligado continuamente. Nessa mistura há inúmeros pontos de contato entre uma fina película de betume e as partículas, com cobertura apenas parcial dos agregados.

Numa camada ligada continuamente todas as partículas são unidas umas às outras, fazendo com que o fenômeno das trincas por fadiga que ocorram na parte inferior da camada sejam diretamente propagada em direção a parte superior.

Sem uma intervenção correta para recuperar esta camada, as trincas e fissuras começam a se propagar por toda a camada de forma a tornar a mesma com comportamento de material granular solto, o que compromete totalmente a capacidade estrutural da rodovia e acelera o processo de degradação da capa de rolamento.

Por conta deste comportamento das estruturas ligadas continuamente estudos foram desenvolvidos a procura de uma outra alternativa técnica até se chegar ao BSM. Embora o BSM tenha suas partículas ligadas parcialmente (não-continuamente), o comportamento da camada é semelhante ao de uma camada não-ligada, o que

elimina a propagação de trincas e fissuras típicas de camadas ligadas continuamente. Essa característica faz com que a camada BSM sirva como um protetor da camada de rolamento em relação a fissurações oriundas de camadas inferiores. As propriedades de resistência à flexão, coesão e de um melhor comportamento com a umidade são todas melhoradas pela presença da espuma de asfalto disperso entre as partículas. Essas melhoras garantem uma maior durabilidade do material em relação a outros tipos de camada de base.

Como já explicado, na etapa de investigação pré-projeto são definidas algumas características importantes como a quantidade de espuma de asfalto necessária, a efetividade da dispersão desta espuma, o uso de cimento e sua quantidade caso necessário, a densidade máxima a ser atingida pela compactação, teor de umidade, etc. Amostras são criadas para os ensaios de laboratório que definirão os resultados que mostrarão quais são os teores ideais de cada insumo para elaborar um projeto adequado. Existem casos onde a adição de espuma de asfalto e cimento chegam a aumentar em mais de 6 vezes o valor de coesão do material, consequentemente aumentando também sua resistência ao cisalhamento.

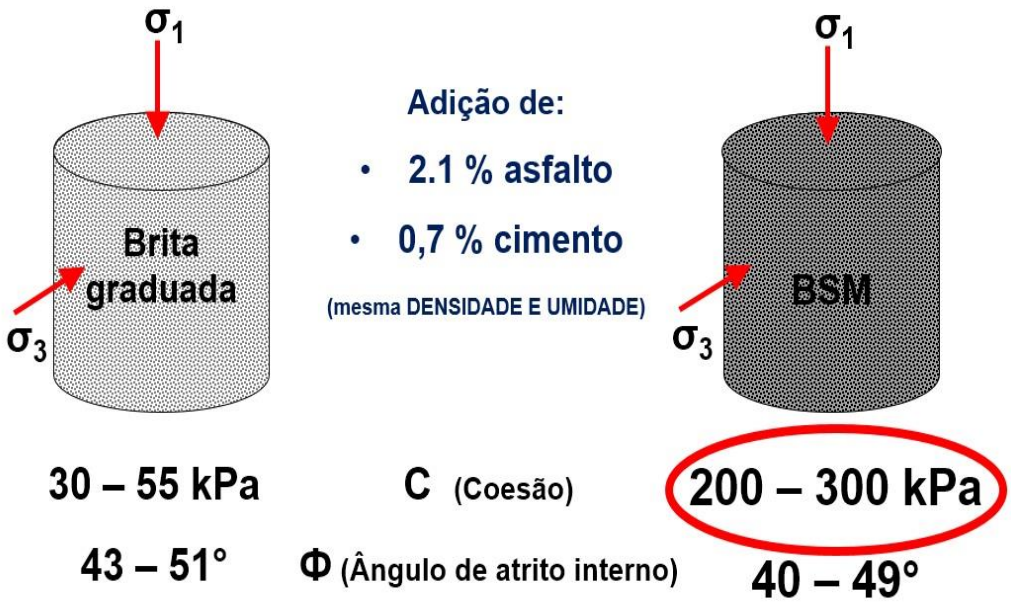

Figura 12: Vantagens técnicas BSM x BGS

Com todos os ensaios de laboratório completos e o projeto definido é muito importante ter muito cuidado na execução. Uma aplicação mal feita pode comprometer todo o projeto. É importante estar atento a velocidade de avanço da recicladora

asfáltica que nunca deve exceder os 8 metros por minuto para não comprometer o corte, desbaste, mistura e homogeneização do material. O uso de espuma de asfalto exige um controle constante da pressão e temperatura do ligante asfáltico, da água e dos medidores de vazão.

7. Conclusão

O transporte rodoviário é o principal modal no Brasil, mas sua situação é bastante deficitária. Basta uma comparação com outros países e podemos perceber o quão defasado o Brasil está em questão de quilometragem e qualidade das rodovias. No Brasil apenas 12% das rodovias são pavimentadas, e deste 12%, 58% estão em estado regular, ruim ou péssimo. Isto significa que dos 210.200 km pavimentados, cerca de 121.800 km necessitam ser recuperados imediatamente.

Os Estados Unidos possuem uma área territorial cerca de 10% maior que o Brasil e a diferença em relação a extensão da malha viária é 369% superior. Sabendo que os Estados Unidos têm 65% de suas rodovias pavimentadas enquanto que o Brasil tem apenas 12%, a diferença entre a extensão da malha pavimentada americana com a brasileira é 20 vezes maior. Estes números comprovam o atraso em que o Brasil se encontra.

Nas cidades a situação não é diferente. As chamadas operações “tapa-buracos” são comuns em todo o Brasil. A cultura de “jogar asfalto” no buraco e considerar isto como um trabalho de recuperação da pista é comum em qualquer prefeitura. A recuperação do pavimento não é feita corretamente apenas com “tapa-buracos”, é preciso uma investigação mais a fundo do problema e buscar soluções realmente eficazes no combate a trincas e rachaduras na camada asfáltica. Enquanto o pavimento asfáltico tem vida útil de 10 a 15 anos se for bem produzido e aplicado, nas cidades brasileiras muitas vezes não duram nem 6 meses.

Essa cultura de “jogar asfalto” no buraco precisa terminar, e apenas através da disseminação do conhecimento de técnicas e procedimentos verdadeiramente corretos é que poderemos recuperar nossas vias de forma que elas sobrevivam um tempo de vida útil aceitável e com boa qualidade.

8. Bibliografia e Materiais de Referência

Norma DNIT 031/2006 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.

BRASIL. Resolução no 416. Brasília, DF: CONAMA, 30/09/2009. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/.

NR-18 “Condições e meio ambiente do trabalho na indústria da construção”, que é a norma regulamentadora do ministério do trabalho.
DECRETO Nº 48.075, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2006 Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da constr. civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas

LEI Nº 14.015, DE 28 DE JUNHO DE 2005 para a execução dos serviços de coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos de misturas asfálticas extraídas do pavimento urbano.
Pavimentação Asfáltica para – Formação Básica para engenheiros. Abeda – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos; 2007 Liedi Bariani Bernucci, Laura Maria Goretti da Motta, Jorge Augusto Pereira Ceratti e Jorge Barbosa Soares.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP ET-DE-P00/033**. Pavimentação:
Reciclagem de pavimento “in situ” com espuma de asfalto. São Paulo, 2006.

NBR 14756: Materiais betuminosos - determinação da viscosidade cinemática. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 11p, 2001.

NBR 6576: Materiais betuminosos – determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 7p, 2007.