

**FACULDADE MINAS GERAIS**



**ESTUDO DA PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS**

**ANDERSON OLIVEIRA DOS SANTOS SILVA**

**VITÓRIA DA CONQUISTA-BAHIA**

**2023**

ANDERSON OLIVEIRA SANTOS SILVA

**ESTUDO DA PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Agrimensor pela Faculdade Minas Gerais.

Área de concentração: Ciências exatas e da terra

**VITÓRIA DA CONQUISTA-BAHIA**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

## RESUMO

O projeto de graduação interdisciplinar proposto oferece uma visão abrangente e abrangente do estudo de terraplenagem e pavimentação de rodovias. Esta pesquisa tem como objetivo detalhar as etapas envolvidas na construção do pavimento, desde a preparação do solo subjacente até a aplicação da camada final.

Além disso, o projeto também explora brevemente a história das patologias que afetam os pavimentos flexíveis, proporcionando um contexto histórico para entender os desafios enfrentados na manutenção e durabilidade das estradas.

No anexo, serão incluídos estudos realizados por pesquisadores que se debruçaram sobre materiais alternativos para pavimentação, bem como práticas de reciclagem aplicadas a esse contexto. Imagens ilustrativas das várias fases que compõem as camadas de um pavimento também serão disponibilizadas para uma compreensão visual mais clara.

Este projeto visa preencher uma lacuna de conhecimento ao reunir informações sobre terraplenagem e pavimentação de rodovias em um único corpo de trabalho. Ao detalhar cada estágio da construção do pavimento, desde a preparação inicial até os toques finais, ele oferecerá uma visão completa do processo. Ao abordar as patologias históricas, fornecerá insights sobre como a indústria evoluiu para lidar com os desafios.

Além disso, a pesquisa sobre materiais alternativos e reciclagem trará à tona abordagens inovadoras que buscam melhorar a sustentabilidade e a eficiência dos pavimentos rodoviários. A inclusão de imagens explicativas não apenas ajudará a visualizar melhor cada fase da construção do pavimento, mas também enriquecerá o entendimento do leitor sobre os conceitos abordados.

**Palavras-chave:** Pavimentação; Terraplenagem; Asfalto;

## SUMÁRIO

Introdução.....	8
1.1 Problema.....	9
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Geral .....	9
1.3.2 Específicos.....	9
Metodologia.....	9
2 – Capítulo 2 .....	10
2.1 Generalidade.....	10
2.2 Pavimento Rodoviário .....	11
2.2.1 As camadas que constituem um pavimento.....	12
2.2.2 Estudo do Subleito.....	13
2.2.3 Estudo da Sub-base.....	14
2.2.4 Estudo da base .....	15
2.2.5 Base estabilizada granulometricamente.....	16
2.2.6 Bases de macadame hidráulico.....	16
2.2.7 Bases Betuminosas .....	17
2.2.8 Base de solo cimento .....	17
3 – Capítulo 3 .....	18
3.1 Revestimentos.....	18
3.1.1 - Materiais Betuminosos .....	18
3.1.2 – Cimento Asfáltico de Petróleo.....	19
3.1.3 – Emulsão Asfáltica.....	20
3.1.4 – Imprimação com Emulsão Asfáltica .....	22
3.1.5 – Tratamento Superficial .....	22
3.1.6 – Pré-mistura a frio (PMF) .....	23
4 - Capítulo 4.....	24
4.1 - Patologia dos Pavimentos Rígidos e Flexíveis.....	24
4.2 – Impactos Ambientais .....	33
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## **Introdução**

A infraestrutura rodoviária desempenha um papel vital no desenvolvimento econômico e na conectividade de uma nação, facilitando o transporte eficiente de pessoas e mercadorias. A construção e manutenção de estradas exigem uma abordagem abrangente que abarque desde a preparação do terreno até a aplicação de pavimentos duráveis e seguros. Nesse contexto, um tema de relevância indiscutível é o "Estudo para Terraplenagem e Pavimentação de Rodovias". Este projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) busca lançar luz sobre as complexidades desses processos, investigando suas nuances técnicas, os desafios enfrentados e as inovações que moldam o campo da engenharia rodoviária.

Através de uma revisão bibliográfica detalhada, este TCC pretende explorar as melhores práticas e os principais conceitos envolvidos na terraplenagem e pavimentação de rodovias. A terraplenagem, que engloba a preparação do terreno, a drenagem adequada e a proteção contra erosões, é um passo crucial na formação da base rodoviária. Por outro lado, o pavimento, como uma estrutura que suporta as cargas do tráfego e proporciona uma superfície de rolamento segura, é uma das partes mais essenciais de uma estrada bem construída.

Ao compreender profundamente os princípios da terraplenagem, os tipos de materiais utilizados na pavimentação, bem como as técnicas modernas de construção e manutenção rodoviária, os profissionais da área podem desenvolver soluções sustentáveis e eficazes. Além disso, a adoção de abordagens inovadoras, como materiais alternativos e práticas de reciclagem, pode não apenas aprimorar a qualidade das estradas, mas também contribuir para a sustentabilidade ambiental.

Este projeto de revisão bibliográfica não apenas oferecerá uma visão aprofundada sobre a ciência por trás da terraplenagem e pavimentação, mas também explorará as implicações econômicas, ambientais e sociais desses processos. Através da análise crítica de estudos de caso e da avaliação das normas regulatórias, espera-se fornecer insights valiosos para profissionais, pesquisadores e tomadores de decisão que desejam melhorar a qualidade e a durabilidade das rodovias.

Em última análise, este TCC aspira a se tornar uma fonte confiável de conhecimento, abrindo caminho para discussões informadas e tomadas de decisão embasadas no campo da engenharia rodoviária. Ao enfrentar os desafios presentes e futuros na construção e manutenção de rodovias, este trabalho busca contribuir para o avanço contínuo da infraestrutura viária, beneficiando a sociedade como um todo.

## **1.1 Problema**

Qual a importância do estudo detalhado sobre a pavimentação de rodovias, desde seu estado embrionário até sua fase de finalização?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

O presente trabalho tem como objetivo analisar os princípios fundamentais da terraplanagem e compactação do solo, investigar as normas técnicas, regulamentações e impactos ambientais, vigentes para construções de rodovias.

### **1.3.2 Específicos**

- I. Busca de trabalhos na literatura acadêmica, normas técnicas e regulamentações relacionadas à terraplanagem e pavimentação de rodovias;
- II. Estudo de projetos de terraplanagem e pavimentação, abordando os desafios enfrentados, soluções aplicadas e resultados alcançados;
- III. Projetar uma análise ambiental e os impactos sofridos nas construções das rodovias;

## **Metodologia**

Este projeto é teórico e será desenvolvido basicamente na leitura/estudo de livros e artigos científicos disponíveis nos periódicos nacionais e internacionais. No trabalho será realizado a priori um estudo dos fundamentos da pavimentação. Prossegue-se com estudos de fundamentos, mas desta vez analisando o processo de terraplanagem, os problemas que o cercam e os impactos ambientais e financeiro envolvidos no processo.

## 2 – Capítulo 2

### 2.1 Generalidade

As estradas recebem diferentes tipos de carga provenientes dos veículos em trânsito. Essas cargas são divididas da seguinte maneira:

- Automóveis (P) – Veículos com dois eixos e quatro rodas projetados para o transporte de pessoas.
- Ônibus (O) – Veículos com dois ou três eixos, com duas rodas no eixo dianteiro e quatro rodas nos demais.
- Caminhões leves (CL) – Veículos com dois eixos e quatro rodas destinados ao transporte de cargas leves.
- Caminhões médio (CM) – Veículos de carga com dois eixos, sendo o traseiro com rodas duplas.
- Caminhões pesados (CP) – Veículos com dois eixos traseiros, cada um com quatro rodas, e o eixo dianteiro com duas rodas.
- Reboques (R) e semi-reboques (SR) – Unidades veiculares compostas por mais de uma parte. O primeiro eixo do veículo trator possui duas rodas, enquanto os demais têm quatro rodas, podendo ser simples ou configurados como tandem duplo ou triplo

Em diversos países, incluindo o Brasil, as cargas transmitidas ao pavimento estão sujeitas a regulamentações legais. No Brasil, por exemplo, o peso máximo permitido por eixo simples é de 10 toneladas. Os limites para cargas máximas por eixo simples e em tandem ou triplo são estabelecidos por meio de decretos governamentais.

Entende-se por configuração em tandem dois ou mais eixos que constituem uma única unidade de suspensão, podendo cada eixo ser motriz ou não.

É crucial entender que o impacto do aumento das cargas por eixo nos pavimentos acontece de maneira exponencial. Assim sendo, é de suma importância evitar o uso de veículos sobrecarregados, uma vez que isso pode resultar em danos graves às estradas. Nesse contexto, muitos órgãos responsáveis pela manutenção rodoviária monitoram de

perto os pesos que os eixos de veículos de carga e certos tipos de ônibus transmitem. Para isso, utilizam balanças fixas em pontos estratégicos e balanças móveis.

Manter um controle rigoroso sobre as cargas veiculares é essencial para a preservação e a durabilidade das rodovias, já que excessos de carga podem causar desgaste precoce e danos significativos aos pavimentos, ocasionando operações de reparo e manutenção dispendiosas. Portanto, o gerenciamento eficiente das cargas é uma medida crucial para garantir a qualidade e a segurança das estradas.

## **2.2 Pavimento Rodoviário**

O termo "pavimento" abrange o conjunto de elementos estruturais presentes nas vias públicas projetadas para a locomoção de veículos, pedestres, ciclistas e outros meios de transporte. Nesse contexto, podemos definir pavimento como uma complexa estrutura composta por diversas camadas de espessura controlada, construída sobre uma base de terraplenagem final. Essa estrutura é concebida com o objetivo econômico e técnico de resistir eficazmente às cargas impostas pelos veículos que transitam sobre ela, independentemente das condições climáticas. O pavimento desempenha um papel crucial ao proporcionar aos usuários das vias melhorias significativas nas condições de deslocamento, além de garantir economia, conforto e segurança. Ele é projetado para suportar as demandas do tráfego, mantendo sua integridade sob cargas diversas, ao mesmo tempo em que oferece uma superfície de rolamento que promove a eficiência e a segurança do trânsito. Portanto, o pavimento é muito mais do que apenas uma camada de asfalto; é uma infraestrutura complexa e estratégica que sustenta a mobilidade e o desenvolvimento das áreas urbanas e rurais.

Neste sentido segundo Bernucci et al. (2006), pavimento é:

[...] Uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finas, construída sobre a superfície final da terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundo do tráfego dos veículos e do clima, e a propiciar ao usuário melhorias nas condições de rolamento, com conforto economia e segurança.

O pavimento, com sua complexa estrutura, desempenha um papel fundamental na infraestrutura rodoviária, projetado para enfrentar desafios provenientes do tráfego de veículos automotores, bem como das intempéries climáticas e precipitações pluviais. O seu propósito primordial é proporcionar aos usuários da via condições ótimas de conforto e segurança durante suas jornadas (Conselho Nacional de Trânsito - CNT, 2007). Segundo Pinto et al. (2002), um

pavimento rodoviário é uma sofisticada construção composta por uma ou mais camadas, cada uma delas com características específicas para receber e distribuir eficientemente as cargas aplicadas na sua superfície. A engenharia por trás dessa estrutura é minuciosamente projetada para garantir que as tensões resultantes das cargas estejam sempre dentro dos limites de resistência dos materiais que constituem o pavimento. Esse projeto meticuloso visa não apenas suportar as demandas do tráfego, mas também prolongar a vida útil do pavimento, reduzir custos de manutenção e assegurar a segurança dos usuários da via.

Assim, o pavimento rodoviário é muito mais do que apenas uma superfície sobre a qual dirigimos nossos veículos; é uma infraestrutura altamente especializada e estratégica, cuja concepção e manutenção demandam conhecimento técnico avançado para atender às necessidades de uma sociedade cada vez mais móvel e dependente das estradas.

### **2.2.1 As camadas que constituem um pavimento**

Um pavimento rodoviário é uma estrutura complexa composta por várias camadas cuidadosamente projetadas para desempenhar funções específicas. Essas camadas são organizadas de maneira hierárquica, com cada uma delas contribuindo para a integridade e a durabilidade geral do pavimento. Em sua configuração típica, um pavimento pode ser dividido em quatro camadas principais:

- **Revestimento (Camada de Rolamento)** – Esta é a camada superior do pavimento, também conhecida como revestimento. Ela é a parte que entra em contato direto com os pneus dos veículos. A função principal do revestimento é fornecer uma superfície de rolamento suave e segura, garantindo aderência e conforto para os usuários da estrada.
- **Base** – Logo abaixo do revestimento, encontramos a camada da base. Esta camada é projetada para distribuir as cargas transmitidas pelo tráfego de maneira uniforme, protegendo as camadas inferiores do pavimento. A base contribui para a resistência estrutural do pavimento e ajuda a prevenir deformações prematuras.
- **Sub-base** – Abaixo da base, temos a sub-base. Sua principal função é proporcionar suporte adicional à base e, portanto, ao revestimento. Ela atua como uma camada de transição que ajuda a distribuir as cargas de maneira ainda mais uniforme e a estabilizar o solo subjacente.
- **Subleito** – A camada mais profunda do pavimento é o subleito, que constitui a infraestrutura subjacente. Dependendo das condições do solo e das necessidades do projeto, o

subleito pode ser preparado, regularizado ou reforçado. Ele desempenha um papel fundamental na distribuição das cargas para o solo natural, evitando afundamentos e deformações do pavimento.

A eficácia e a durabilidade de um pavimento dependem da engenharia detalhada por trás do design e da construção de cada uma dessas camadas. O equilíbrio entre essas camadas é fundamental para garantir a integridade do pavimento, proporcionando uma superfície de rolamento segura e resistente ao desgaste. Portanto, a compreensão da função de cada camada e sua construção adequada são cruciais para a construção e manutenção de rodovias de alta qualidade.

### **2.2.2 Estudo do Subleito**

O subleito de uma estrada é o alicerce fundamental no qual o pavimento repousa. Visualmente, ele é uma representação tridimensional do suporte subjacente, enquanto o leito é a sua projeção bidimensional na superfície.

O estudo detalhado do subleito desempenha um papel crítico no planejamento e na construção de pavimentos rodoviários duráveis e seguros. Para caracterizar o subleito, uma série de ensaios é conduzida. Isso inclui a análise granulométrica (GR) para avaliar a distribuição de tamanhos das partículas, os limites de liquidez (WL) e de plasticidade (WP) para entender as propriedades de plasticidade do solo, bem como a determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC), conhecido como Califórnia Bearing Ratio (CBR). Com base nos resultados desses ensaios, tomamos decisões críticas sobre a necessidade de reforço ou regularização do subleito.

O processo de reconhecimento do subleito começa com sondagens realizadas no eixo da estrada e em suas margens, geralmente conduzidas com trado. Essas sondagens fornecem informações sobre as várias camadas do solo. Posteriormente, amostras de solo são coletadas para ensaios de caracterização e classificação, seguindo as diretrizes do Highway Research Board (H.R.B.), permitindo traçar um perfil característico do solo.

Com o solo caracterizado e classificado, determinamos se a regularização do subleito é necessária. A regularização envolve a preparação da superfície da estrada, tanto em termos longitudinais quanto transversais. Ela é realizada antes da construção de outras camadas do pavimento e pode variar em espessura, geralmente não excedendo 20 centímetros. Importante ressaltar que a regularização não é considerada uma camada do pavimento, pois sua espessura é variável e pode, em alguns pontos, ser nula.

Os materiais usados na regularização são geralmente obtidos do próprio subleito. Se houver necessidade de substituição ou adição de material, esses novos materiais devem atender a critérios específicos (DNIT, 2019).

### **2.2.3 Estudo da Sub-base**

A sub-base é uma camada vital que complementa a base do pavimento rodoviário. A necessidade de incluí-la surge em situações técnicas ou econômicas, quando é preciso reduzir a espessura da base. É importante destacar que a espessura da sub-base deve ser determinada por meio de um projeto específico.

Os materiais usados na composição da sub-base podem ser obtidos de diversas maneiras, incluindo escavações na própria estrada, empréstimos de materiais de outras fontes ou pela estabilização granulométrica do solo disponível. Esses materiais podem variar, incluindo terra, argila arenosa, brita selecionada ou qualquer outra substância que atenda às necessidades do solo existente. Nesse contexto, as sub-bases podem ser categorizadas como granulares ou estabilizadas.

As sub-bases granulares consistem em camadas formadas por solos, pedra britada ou escória de alto forno, podendo também envolver misturas desses materiais. Um exemplo é a sub-base corrigida granulométricamente, que é composta por camadas de solos, misturas de solos e materiais britados, seguindo uma faixa granulométrica específica de acordo com as especificações do projeto. Quando utilizamos materiais naturais em combinação com pedra britada, obtemos o que chamamos de solo-brita, e quando empregamos apenas pedra britada, denominamos de brita graduada.

Por outro lado, as sub-bases estabilizadas são aquelas que recebem agentes estabilizantes, como cimento Portland, cal, betume e outros materiais que aprimoram as características do solo para uso no pavimento. Um exemplo é a sub-base melhorada com cimento, na qual o solo, o cimento e a água são misturados e compactados de acordo com uma proporção pré-determinada, de acordo com as necessidades do projeto. A adição de cimento tem como objetivo melhorar as propriedades do solo, alterando sua consistência, tornando-o menos sensível à água e aumentando sua resistência ao cisalhamento.

Os solos utilizados na construção de sub-bases melhoradas com cimento devem atender a critérios específicos:

- Porcentagem que passa na peneira nº 200 (máximo): 50%
- Limite de liquidez (máximo): 40%
- Índice de plasticidade: 18%

A escolha entre sub-bases granulares ou estabilizadas depende das condições locais, dos materiais disponíveis e das necessidades do projeto. Essa decisão desempenha um papel crucial na construção de pavimentos rodoviários duráveis e seguros.

#### **2.2.4 Estudo da base**

A camada de base é um componente essencial na estrutura do pavimento, localizada diretamente abaixo da camada de revestimento e acima da sub-base, quando presente, ou diretamente sobre o subleito. A camada de base desempenha um papel crucial na resistência estrutural do pavimento, sendo responsável por suportar e distribuir as cargas geradas pelo tráfego de maneira eficaz.

A principal função da base é reduzir as tensões de compressão no subleito e, quando aplicável, na sub-base, para níveis aceitáveis. Isso significa que ela tem a responsabilidade de distribuir as cargas de maneira uniforme pela superfície do pavimento, minimizando ou eliminando deformações de consolidação e cisalhamento no subleito ou na sub-base.

Os materiais mais comumente empregados na construção da camada de base incluem produtos de britagem, misturas de solos e combinações de solos e materiais britados. Além disso, a base pode ser construída utilizando materiais tratados ou estabilizados com agentes aglomerantes, como cimento, betume, cal, cinzas volantes e combinações desses aglomerantes.

É importante observar que, no caso de pavimentos não revestidos, como estradas de terra, as bases devem possuir algumas propriedades de coesão para manter a estabilidade e resistência necessárias.

Assim como as sub-bases, as bases podem ser classificadas como estabilizadas ou granulares, seguindo os mesmos princípios e conceitos anteriormente discutidos. A escolha entre essas categorias depende das condições específicas do local, dos materiais disponíveis e

das exigências do projeto, sendo essencial para a construção de pavimentos rodoviários duráveis e confiáveis.

### **2.2.5 Base estabilizada granulometricamente**

As bases estabilizadas granulometricamente representam uma categoria importante de camadas de base em pavimentos rodoviários. Elas são essencialmente constituídas por camadas de solo, misturas de solos ou materiais britados. Dentro dessa categoria, duas variantes se destacam: a base de solo-brita, composta por uma combinação de solo e pedra britada, e a base de brita graduada, que consiste exclusivamente em pedra britada.

Para garantir a qualidade na construção dessas bases, é imperativo seguir critérios rigorosos, tais como:

- 1- A composição granulométrica deve estar de acordo com as faixas A e D, conforme estabelecido pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem).
- 2- A fração que atravessa a peneira n° 40 deve apresentar um limite de liquidez igual ou inferior a 25% e um índice de plasticidade igual ou inferior a 6%.
- 3- A quantidade de material que passa pela peneira n° 200 não pode ultrapassar  $\frac{2}{3}$  da quantidade que passa pela peneira n° 40.

Estabelecer e cumprir esses critérios é fundamental para garantir a durabilidade e a eficácia das bases estabilizadas granulometricamente em pavimentos rodoviários. A escolha adequada entre as variantes de base, dependendo das condições locais e das especificações do projeto, desempenha um papel crucial na construção de estradas seguras e confiáveis.

### **2.2.6 Bases de macadame hidráulico**

As bases de macadame hidráulico representam uma abordagem especial na construção de pavimentos rodoviários. Elas são formadas por camadas de agregados britados com uma granulometria mais ampla, complementadas com material de preenchimento e água. O processo de construção dessas bases é baseado no princípio da arrumação cuidadosa das partículas, onde a camada de agregado britado é submetida a compressão, alinhando de maneira precisa seus grãos.

Posteriormente, são acrescentadas camadas de material de preenchimento para ocupar os espaços vazios entre os agregados. Esse processo é seguido pela adição de água e pela compactação da base usando equipamentos que empregam pneus.

Os agregados graúdos utilizados podem ser compostos por pedra britada, escória, pedregulho ou cascalho britado, desde que atendam às faixas granulométricas específicas.

As bases de macadame hidráulico oferecem uma alternativa sólida para a construção de pavimentos rodoviários, proporcionando uma estrutura durável e resistente que se adapta bem a diferentes condições de tráfego. A aplicação correta dessa técnica é crucial para garantir a eficácia e a longevidade da superfície do pavimento.

### **2.2.7 Bases Betuminosas**

As bases de macadame betuminoso são uma técnica especializada na construção de pavimentos rodoviários. Essa abordagem envolve a criação de uma camada composta por brita com granulometria específica, que é compactada de maneira adequada. Posteriormente, essa camada recebe a aplicação de material betuminoso, que preenche os vazios por meio de penetração direta. Para finalizar o processo, uma camada adicional de brita miúda é aplicada e compactada para preencher os vazios superficiais.

Essa técnica é particularmente eficaz na criação de uma base sólida e resistente para pavimentos rodoviários. Ela garante uma distribuição uniforme das cargas e ajuda a melhorar a durabilidade do pavimento. A aplicação precisa de material betuminoso desempenha um papel fundamental na criação de uma superfície resistente ao desgaste e ao tráfego constante. Portanto, a escolha adequada dessa técnica é crucial para a construção de pavimentos rodoviários duráveis e de alta qualidade.

### **2.2.8 Base de solo cimento**

As bases de solo-cimento constituem uma técnica essencial na construção de pavimentos rodoviários. Elas são criadas através da mistura controlada de solo, cimento e água em proporções previamente definidas. Essa mistura é minuciosamente homogeneizada e, em seguida, submetida a compactação, cura e, finalmente, revestida com uma camada de rolamento. O processo resulta na formação de uma base robusta que oferece excelentes condições de durabilidade e resistência ao tráfego rodoviário.

É crucial destacar que a escolha entre os diversos tipos de base disponíveis depende das características específicas do local, da disponibilidade de materiais e dos requisitos do projeto de pavimentação rodoviária. Cada tipo de base apresenta particularidades que podem ser adaptadas para atender às variadas demandas de engenharia em projetos rodoviários.

### **3 – Capítulo 3**

#### **3.1 Revestimentos**

##### **3.1.1 - Materiais Betuminosos**

Os materiais betuminosos desempenham um papel crucial em diversas aplicações, tendo sua composição e origem como pontos de destaque. Conforme definido, esses materiais consistem em misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>), com notáveis propriedades aglutinantes (Silva, 2019).

Esses materiais betuminosos se subdividem em duas categorias principais: os asfaltos e os alcatrões. É importante ressaltar que, ao contrário dos asfaltos, os alcatrões não ocorrem naturalmente e são produtos resultantes de transformações químicas complexas, como a destilação de matéria orgânica, incluindo carvão, linhito, xisto e matéria vegetal (Santos, 2020). Dentro da categoria de asfaltos, encontramos um componente predominante conhecido como betume, representando aproximadamente 99,5% da composição. Este betume, frequentemente utilizado como sinônimo de asfalto, é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, que apresenta total solubilidade em dissulfeto de carbono.

Os asfaltos têm uma vasta gama de aplicações, desde a impermeabilização de construções civis até sua função preponderante em obras de pavimentação. É interessante notar que existem duas origens principais para os asfaltos: o asfalto natural (AN) e o asfalto obtido através do refino do petróleo (AP).

O asfalto natural é resultado do processo de elevação do petróleo à superfície, sujeito a uma destilação natural pela ação combinada do sol e do vento, que removem os gases e óleos leves, deixando para trás um resíduo de extrema dureza. Exemplos notáveis de asfalto natural incluem os depósitos em Trinidad e no Lago Bermudez, muitos dos quais ocorrem na forma de rochas porosas impregnadas naturalmente por asfalto, como arenitos, xistos e calcários asfálticos (Silva, 2019; Santos, 2020).

Por outro lado, os asfaltos de petróleo são obtidos por meio de um processo de destilação fracionada de determinados tipos de petróleo. Isso nos leva a compreender que a origem desses materiais betuminosos está intrinsecamente ligada à matéria orgânica e animal, bem como a produtos específicos do metabolismo de seres vivos presentes no petróleo.

Portanto, a complexidade e a variedade desses materiais betuminosos refletem a necessidade de uma análise detalhada e embasada em suas origens e propriedades, assim como na abordagem de tópicos igualmente complexos.

### **3.1.2 – Cimento Asfáltico de Petróleo**

A sigla CAP, que representa o Cimento Asfáltico de Petróleo, descreve um tipo de asfalto especialmente formulado para atender às exigências da construção de pavimentos. A complexidade do CAP é evidenciada por suas características intrínsecas, que envolvem um comportamento viscoso e uma suscetibilidade térmica notáveis, como mencionado por (PINTO, S; PINTO, I. E 2019) ao destacar que "o CAP é um material complexo que apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica, caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura.

" Este material desempenha um papel fundamental na indústria de pavimentação, fornecendo as características necessárias para resistir ao tráfego constante e às variações de temperatura ao longo das estações do ano. De acordo com, "o CAP é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de

pavimentos." Esta citação ressalta a importância do CAP como um elemento vital na infraestrutura rodoviária, proporcionando a estabilidade e a durabilidade necessárias às estradas.

Além disso, é crucial reconhecer que a complexidade do CAP está ligada à sua natureza viscosa e à forma como suas propriedades se alteram em resposta às variações térmicas. Como mencionado por, "a susceptibilidade térmica" do CAP resulta em mudanças notáveis em sua viscosidade, rigidez e consistência com base na temperatura. Isso evidencia a importância de compreender e controlar essas propriedades para garantir a qualidade e a eficácia dos pavimentos construídos com CAP.

Em resumo, o CAP é um material asfáltico de grande relevância na construção de pavimentos, cujas características complexas, incluindo seu comportamento viscoso e sua suscetibilidade térmica, devem ser cuidadosamente consideradas e gerenciadas para assegurar a eficácia das estruturas rodoviárias (Silva, 2019; Santos, 2020).

### **3.1.3 – Emulsão Asfáltica**

As emulsões asfálticas desempenham um papel fundamental na construção de pavimentos, sendo caracterizadas como dispersões coloidais que compreendem uma fase asfáltica em uma fase aquosa, com a ajuda de um agente emulsificante. Como salientado por (PINTO, S; PINTO, I. E 2019), "a emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, obtida combinando o asfalto aquecido com água, em um meio agitado, denominado moinho coloidal, na presença dos emulsificantes.

" Este processo é essencial para conferir estabilidade à emulsão, favorecer a dispersão e revestir os glóbulos de betume com uma película protetora, mantendo-os em suspensão. O emulsificante desempenha um papel crucial nesse contexto. De acordo com (Santos 2020), "o emulsificante é um importante componente, e, de acordo com suas propriedades químicas e estrutura molecular, obtém-se emulsões com características físico-químicas particulares." O emulsificante atua de várias maneiras, incluindo a redução da tensão superficial entre o asfalto e a água, a estabilização da emulsão pela fixação na periferia dos glóbulos de asfalto dispersos e a prevenção da aglomeração (coalescência) que levaria à ruptura da emulsão.

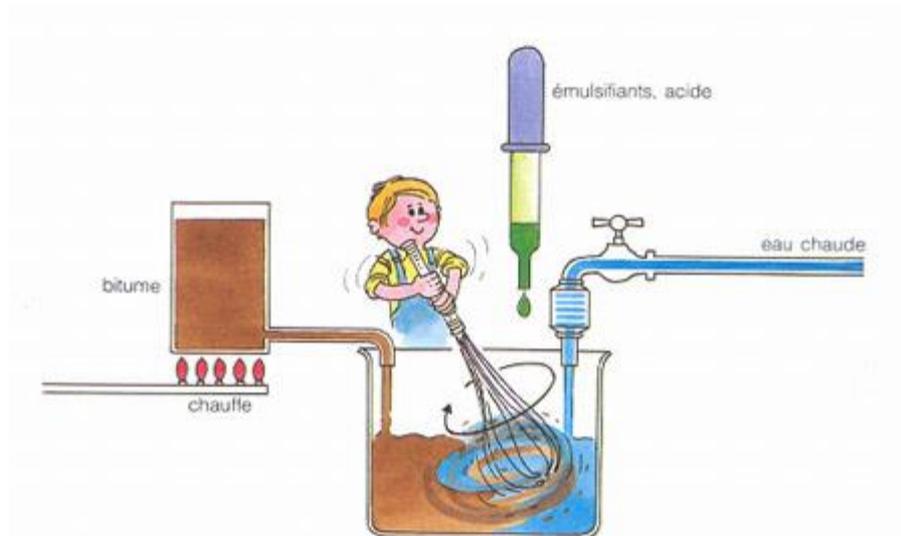


Figura 1 – Ilustração do processo de produção da emulsão asfáltica retirada de (OLIVEIRA,2014).

Os emulsificantes podem ser categorizados com base em seu caráter iônico, dividindo-se em aniônicos, catiônicos e não iônicos. Segundo (PINTO, S; PINTO, I. E 2019), "os aniônicos são sabões em que um ânion orgânico está associado a um álcali, como é o caso do estearato de sódio." Estes emulsificantes conferem carga elétrica negativa aos glóbulos de CAP na emulsão, tornando-os compatíveis com agregados de natureza calcária. Em contraste, os emulsificantes catiônicos consistem geralmente em sais de amina, conferindo uma carga elétrica positiva aos glóbulos da emulsão, o que a torna aderente a agregados com cargas elétricas superficiais negativas, como os arenitos e granitos, que possuem alta concentração de sílica (Santos, 2020; Silva, 2019).

É importante destacar que a ruptura ou quebra de uma emulsão é um fenômeno relevante, que pode ser desencadeado por diversos fatores, como a evaporação da água, alterações no equilíbrio elétrico devido a mudanças na acidez ou alcalinidade, ou ação dos agregados. Conforme (Santos 2020) afirma, "uma característica visual da ruptura é a mudança de coloração da emulsão, que passa de marrom a preta." É fundamental que as emulsões apresentem uma resistência mínima à ruptura para permitir seu transporte e armazenagem, o que é alcançado com o uso adequado de agentes emulsificantes. Com base na velocidade de ruptura, as emulsões podem ser classificadas em Ruptura Rápida (RR), Ruptura Média (RM) e Ruptura Lenta (RL).

A Ruptura Rápida, com uma baixa porcentagem de emulsificante, é a menos estável e se separa logo após a aplicação, sendo indicada para tratamentos superficiais e pinturas de ligação. A Ruptura Média é utilizada principalmente em misturas com agregados limpos, enquanto a Ruptura Lenta é empregada na estabilização de solos e na preparação de lamas asfálticas (Silva, 2019). Em resumo, as emulsões asfálticas desempenham um papel crucial na construção de pavimentos, e a seleção adequada de emulsificantes e a compreensão das características físico-químicas das emulsões são essenciais para garantir a eficácia e a durabilidade das estruturas rodoviárias (Santos, 2020; Silva, 2019).

### **3.1.4 – Imprimação com Emulsão Asfáltica**

A imprimação com emulsão asfáltica representa um procedimento essencial na construção de pavimentos, caracterizado pela aplicação de uma camada de material betuminoso sobre a superfície de uma base concluída, antes da execução de qualquer revestimento betuminoso subsequente.

Como mencionado por (Silva 2019), "a imprimação com emulsão asfáltica consiste na aplicação de uma camada de material betuminoso sobre a superfície de uma base concluída." Este processo desempenha um papel crítico não apenas na adesão entre as camadas do pavimento, mas também na preservação de pavimentos acabados em pedras poliédricas ou paralelepípedos, como destacado por (Santos 2020), que menciona que "também poderá ser executada, a critério da Fiscalização, para selagem de pavimentos acabados em pedra poliédricas ou paralelepípedos.

" Em resumo, a imprimação com emulsão asfáltica é um procedimento fundamental na construção de pavimentos, proporcionando aderência e selagem em diversas situações, desde bases concluídas até pavimentos com acabamentos específicos em pedra (Silva, 2019; Santos, 2020).

### **3.1.5 – Tratamento Superficial**

O tratamento superficial é uma técnica crucial na construção de pavimentos, envolvendo a aplicação de material betuminoso em camadas, cobertas por agregados minerais. Como ressaltado por Silva (2019), "antes da primeira aplicação de material betuminoso, deverá a base ser coberta com imprimação", destacando a importância da etapa de imprimação como

preparação fundamental para o tratamento superficial. Existem diferentes tipos de tratamento superficial, cada um com características específicas:

**1. Tratamento Superficial Simples:** O tratamento superficial simples consiste na aplicação de material betuminoso e agregado em uma única camada, onde o agregado é uniformemente distribuído sobre o material betuminoso. A penetração ocorre pelo processo invertido, promovendo a aderência e a proteção da base.

**2. Tratamento Superficial Duplo:** No tratamento superficial duplo, de penetração invertida, são realizadas duas aplicações de material betuminoso. A primeira aplicação é feita diretamente sobre a base imprimida, coberta imediatamente com agregado graúdo, constituindo a primeira camada do tratamento. A segunda camada é semelhante à primeira, porém, utiliza-se agregado miúdo.

**3. Tratamento Superficial Triplo:** O tratamento superficial triplo, também de penetração invertida, envolve duas aplicações de material betuminoso, cada uma coberta por agregados minerais. A primeira aplicação de betume é realizada diretamente sobre a base imprimida e coberta imediatamente com agregado graúdo, formando a primeira camada. A segunda e terceira camadas são semelhantes à primeira, com a utilização de agregados médio e miúdo, respectivamente.

**4. Capa Selante:** A capa selante é uma etapa adicional que consiste na aplicação de ligante betuminoso sobre o tratamento superficial (simples, duplo ou triplo). Este ligante é espargido na última camada de agregados e complementado com a dispersão de pó de pedra ou areia, finalizando com a compressão final. Esta técnica contribui para a selagem e proteção das camadas subjacentes (PINTO, S; PINTO, I. E, 2019).

Em resumo, o tratamento superficial é uma técnica versátil e essencial na construção de pavimentos, com diferentes variantes que oferecem características específicas de aderência, proteção e durabilidade. A preparação adequada da base por meio da imprimação, conforme destacado por (Silva ,2019), é um passo fundamental para garantir a eficácia dessas técnicas e a qualidade da infraestrutura rodoviária.

### **3.1.6 – Pré-mistura a frio (PMF)**

A pré-mistura a frio é um revestimento flexível de suma importância na construção de pavimentos. Ela se concretiza por meio da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado mineral graduado, material de enchimento e material betuminoso, com a aplicação e

compactação subsequentes a frio. Conforme enfatizado por (PINTO, S; PINTO, I. E 2019), "a pré-mistura a frio é o revestimento flexível resultante da mistura a quente em usina apropriada, de agregado mineral graduado, material de enchimento e material betuminoso, espalhada e comprimida a frio".

Essa abordagem destaca a importância de realizar a mistura a quente em uma usina adequada para garantir a homogeneidade e a qualidade do revestimento final. Essa técnica oferece benefícios significativos na construção de pavimentos, proporcionando uma camada durável e resistente às solicitações do tráfego, ao mesmo tempo em que é aplicada e compactada a frio, o que simplifica o processo construtivo e economiza energia.

Em síntese, a pré-mistura a frio é uma abordagem eficaz para a criação de revestimentos flexíveis de qualidade, resultando da mistura a quente de materiais específicos e aplicação a frio (PINTO, S; PINTO, I. E, 2015). Esta técnica desempenha um papel essencial na construção de pavimentos duráveis e resistentes.

## **4 - Capítulo 4**

### **4.1 - Patologia dos Pavimentos Rígidos e Flexíveis**

#### **4.1.1 - Principais causas de danos em pavimentos urbanos:**

- Impermeabilização do solo acarretando mudanças freáticas;
- Redes subterrâneas de serviços públicos;
- Envelhecimento da frota rolante;
- Ampliação da frota rolante (carga transportada);
- Antes da execução e/ou recuperação de um pavimento deve-se estudar as interferências:
  - Esgoto;
  - Energia;

- Telefone;
- Água;
- Gás;
- Etc.

#### **4.1.2 - Principais defeitos, possíveis causas e correções nos pavimentos flexíveis e semirrígidos executados com revestimentos betuminosos**

A execução de pavimentos flexíveis e semirrígidos, utilizando revestimentos betuminosos, é um processo complexo que requer atenção meticulosa para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas viárias. Durante o ciclo de vida desses pavimentos, diversos defeitos podem surgir, comprometendo sua integridade e funcionalidade. É essencial compreender esses defeitos, suas possíveis causas e as correções adequadas para mantê-los em condições operacionais ideais. Nesse contexto, a literatura especializada oferece insights valiosos, os quais são citados a seguir.

**1. Envelhecimento do Ligante:** Um dos desafios mais significativos nos pavimentos betuminosos é o envelhecimento do ligante. Esse fenômeno ocorre gradualmente, resultando no empobrecimento das qualidades aglutinantes e elásticas do asfalto. O envelhecimento não está ligado a procedimentos executivos específicos do revestimento, mas sim ao próprio envelhecimento natural do ligante. Pode ser exacerbado por deficiências de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), excesso de aquecimento do ligante ou do agregado, o que leva ao craqueamento do CAP e ao próprio envelhecimento do CAP em si. Fatores como a evaporação dos óleos voláteis, oxidação, ação da umidade, carbonização, polarização e temperatura contribuem para o envelhecimento do ligante. Conforme observado por (NOME, ANO), a aplicação de rejuvenescedores após a correção de desagregações e fissuras, bem como a reciclagem da mistura asfáltica com adição de rejuvenescedores de CAP, são soluções viáveis para mitigar os efeitos do envelhecimento.

**2. Desgaste ou Desagregação:** O desgaste ou desagregação do pavimento é um problema que surge após o envelhecimento e pode decorrer da deficiência do ligante, excesso de compactação ou falhas na dosagem. O ligante envelhecido ou craqueado, a falta de adesividade entre ligante e agregado, a ação da água livre no revestimento, misturas excessivamente secas ou tráfego intenso são algumas das causas desse defeito. Como apontado por, as so-

luções variam desde a aplicação de misturas asfálticas seguidas de Concreto Asfáltico Usado a Quente (CAUQ) ou Lamas Asfálticas (LA) até a substituição ou reconstrução do pavimento. A escolha da solução depende da gravidade do problema e das condições climáticas da região.

**3. Fadiga:** A fadiga é um tipo de deterioração acumulativa e localizada do revestimento betuminoso, que ocorre devido a ciclos repetidos de carga, mesmo que não haja afundamentos plásticos significativos. O fissuramento nas trilhas das rodas é um indicativo precoce desse defeito. Fatores como o comportamento plástico do ligante, deformabilidade das camadas subjacentes e deficiências na dosagem do ligante, conforme mencionado por, contribuem para a fadiga do pavimento. Soluções incluem a troca do revestimento ou o dimensionamento de recuperação estrutural, com a aplicação de camadas antirreflexo de trincas.

**4. Fendas:** As fendas são descontinuidades na superfície do revestimento que podem se apresentar como fissuras (fendas capilares) ou trincas, dependendo de suas características. O envelhecimento, retração do ligante, ação da água livre, tráfego intenso, subdimensionamento do pavimento e presença de "borrachudos" na base ou em camadas subjacentes são algumas das possíveis causas das fendas. Conforme destacado por, as soluções variam e podem incluir tráfego para fechar fissuras, aplicação de rejuvenescedores, reforço ou outras medidas, dependendo do tipo e da gravidade das fendas.

**5. Outros Problemas:** Além dos defeitos mencionados, pavimentos betuminosos podem apresentar problemas como exudação, instabilidade ou deformação plástica, corrugações, afundamentos, fendilhamento nos bordos, deslocamento, dissolução, trilhas e ruptura total. Suas causas são diversas, incluindo deficiências na execução, condições climáticas adversas e tráfego intenso. A correção desses problemas geralmente requer a reconstrução ou recuperação da área afetada, conforme apropriado. Em resumo, a compreensão dos principais defeitos, suas causas e as soluções disponíveis é essencial para a manutenção eficaz de pavimentos flexíveis e semirrígidos executados com revestimentos betuminosos. É importante ressaltar que a escolha das soluções deve ser baseada na avaliação cuidadosa das condições específicas de cada pavimento e nas recomendações de engenheiros especializados, visando garantir a durabilidade e a segurança das estradas e vias públicas.

- **Envelhecimento:** É o empobrecimento das qualidades aglutinantes e elásticas do ligante. Não está ligado a procedimentos executivos do revestimento, mas sim ao envelhecimento da vida útil do ligante. Curiosamente, é mais rápido onde o tráfego é mais leve ou pouco intenso, justamente pelo não trabalho da estrutura em função do tráfego.

**Possíveis causas:** deficiência de CAP, excesso de aquecimento do ligante ou do agregado causando o craqueamento do CAP, envelhecimento do CAP.

**Soluções:** aplicação de rejuvenescedores para o revestimento, após limpeza e correção das desagregações e fissuras, reciclagem da mistura asfáltica com adição de rejuvenescedores de CAP.

O envelhecimento se dá por:

- a) Evaporação dos óleos voláteis;
- b) Oxidação: aumenta na presença da luz (foto oxidação), com a pressão causada pelo tráfego nos vazios do CBUQ sobre o CAP;
- c) Ação da umidade pela absorção da água com extração gradual dos compostos solúveis;
- d) Carbonização – formação de carbono livre pela ação da luz;
- e) Polarização e condensação de moléculas do ligante causando endurecimento;
- f) Ação da temperatura, produzindo bolhas e/ou espumas.

O envelhecimento do CAP por ação de raios luminosos só ocorre na camada superficial do filme do ligante (menos de 1 mm). Como explicar o envelhecimento das camadas inferiores se os vazios da mistura asfáltica não são alinhados e a luz só se propaga em linha reta? Esse fato justifica-se pela oxidação sob pressão nos vazios da mistura asfáltica, em particular do CBUQ. Tal não ocorre nos TS pois seus vazios são bem maiores e não permitem a ação do ar sob pressão. Por essa razão os ligantes do CBUQ envelhecem mais rapidamente que os dos TS, embora a superfície de exposição dos TS seja bem superior à dos CBUQ's. CBUQ apresenta, em média, 5% de vazios e os TS 20%. Tanto para um como para o outro de 50% a 70% desses vazios são preenchidos com ligante, normalmente 70%.

- **Desgaste ou desagregação:** É a perda dos agregados, principalmente dos finos, e do ligante. É o fenômeno que se segue ao envelhecimento, mas pode decorrer da deficiência de ligante, excesso de compactação ou falhas na dosagem.

**Possíveis causas:** ligantes envelhecidos ou craqueados, falta de adesividade ligante/agregado, ação da água livre no revestimento, misturas muito secas, tráfego excessivo.

**Soluções:** misturas asfálticas seguidas de CS ou LA, substituição ou reconstrução do pavimento. A solução a adotar depende da intensidade com que o problema se manifesta e das condições de clima da região.

- **Fadiga** – é a deterioração acumulativa e localizada de um elemento estrutural (no caso o revestimento betuminoso) provocada por ciclos de carga que eventualmente levam-no a ruptura. Seu primeiro indicativo é o fissuramento nas trilhas das rodas, mesmo sem afundamentos plásticos significativos.

**Possíveis causas:** comportamento plástico do ligante, deformabilidade das camadas subjacentes, deficiência na dosagem do ligante.

**Soluções:** troca do revestimento ou dimensionamento de recuperação estrutural com aplicação de camada antirreflexo de trincas.

- **Fendas** – qualquer descontinuidade na superfície do revestimento podem ser fissuras (fendas capilares só observáveis a olho nu a menos de 1,50 m) ou trincas (fendas com abertura superior a fissuras). As fendas, de forma geral, podem ocorrer isoladamente ou interligadas.

**Possíveis causas:** envelhecimento e/ou retração do ligante, ação de água livre, tráfego excessivo, subdimensionamento do pavimento como um todo ou em alguma de suas camadas constituintes, “borrachudos” na base ou em outras camadas subjacentes, fadiga. É frequente a participação de um ou mais desses fatores, sendo que a infiltração de água pluvial através das fendas é um fator sempre presente na evolução, facilmente pela formação de malha denominada “couro de crocodilo”.

**Soluções:** tráfego, rejuvenescedores, reforço. As fissuras transversais são normalmente fechadas com o tráfego, o que não ocorre com as longitudinais.

- **Trincas de reflexão** – são trincas devidas ao reaparecimento do padrão de trincas subjacentes na superfície de uma camada asfáltica.

**Possíveis causas:** incapacidade da mistura asfáltica de resistir às deformações que ocorrem nas extremidades das fendas.

**Soluções:** reciclagem das camadas trincadas, utilização de mistura asfáltica com elevada resistência à fadiga (polimerizados), emprego de CAPs mais moles que produzem camadas mais flexíveis, sistema antirreflexo de trincas (camadas de absorção de tensões compostas por materiais de elevada ductilidade ou camadas de absorção de deslocamentos por materiais granulares ou misturas asfálticas abertas – granulometria uniforme – ou camada de desvio de trincas – geotêxteis).

- **Fendilhamento, couro de crocodilo ou couro de jacaré** – é a separação em pedaços poligonais do revestimento. É um tipo de fenda interligada. Com lados bem definidos chama-se trinca de blocos.

**Possíveis causas:** base sem suporte suficiente, com “borrachudos”, mal executada, drenagem deficiente, permeabilidade do revestimento, colapso do revestimento asfáltico por fadiga.

**Soluções:** troca do pavimento no local afetado.

- **Falhas, buracos ou painelas** – é o passo seguinte às fendas. Há perda de material do revestimento e base, podendo haver progresso até o sub-leito se medidas corretivas não forem tomadas.

**Possíveis causas:** falta de conservação corretiva ou paliativa.

**Soluções:** corte reto das camadas afetadas, recomposição da base e sub-base, aplicação de ligante e posterior PMF, PMQ ou CBUQ.

- **Exsudação** – é a subida de material betuminoso para a superfície do revestimento.

**Possíveis causas:** excesso de ligante ou de imprimação/pintura de ligação, falta de agregados ou agregados lamelares, desagregação excessiva, clima muito quente, ligante de baixa viscosidade, tráfego muito pesado associado a má dosagem. Ocorre quando todos os vazios da mistura estão preenchidos com material betuminoso. Tem que haver vazios na mistura para absorver a expansão do material betuminoso bem como a compactação causada pelo

tráfego. Mesmo sem dosagem excessiva de ligante, a exudação poderá ocorrer nas seguintes situações: o ligante não apresentar viscosidade adequada no momento da mistura, não conseguindo penetrar nos vazios; o ligante não estiver suficientemente curado e houver penetração de água (seja de chuva ou de camadas inferiores). Com o aquecimento, vira vapor e esse carrega o ligante para a superfície; excesso de aquecimento – por falta de viscosidade os agregados tendem a sedimentar; agregados insuficientemente secos, quando misturados ao ligante produzem vapor repetindo a situação anteriormente citada.

**Soluções:** agregado fino a quente (solução paliativa) ou reconstrução (solução definitiva, raspagem superficial, reutilização do ligante exudado por incorporação de uma nova camada de agregado, lançamento de uma camada de pré-misturado aberto para absorção do excesso.

- **Instabilidade ou deformação plástica** – são deformações localizadas que ocorrem no revestimento. Geralmente nas trilhas preferenciais das rodas dos veículos mais pesados ou na tangente de curvas.

**Possíveis causas:** excesso de ligante e/ou água, partículas muito polidas.

**Soluções:** reconstrução com traço mais seco.

- **Corrugações ou ondulações** – deformações ondulares e sucessivas no sentido transversal do tráfego em geral próximo aos pontos de parada (aceleração e frenagem).

**Possíveis causas:** deformação plástica da base, falta de compressão do revestimento, excesso de ligante, má graduação do agregado, falta de adesividade com a base (muito comum quando ela é de paralelepípedos). Sobre esses usa-se CAP sob a forma de banho para melhor ligação). Grandes espessuras de compactação do CBUQ.

**Soluções:** reconstrução com traço mais seco e melhorar as condições de adesividade com a base.

- **Afundamentos ou depressões** – são deformações permanentes alongadas sem ruptura do revestimento.

**Possíveis causas:** compactação resiliente do pavimento/aterro.

**Soluções:** se há tendência a estabilizar a curto prazo, completa-se com PMs ou CBUQ.

- **Fendilhamento e deformações nos bordos** – são danos no sentido longitudinal do tráfego, próximo aos bordos.

**Possíveis causas:** acostamentos não revestidos.

**Soluções:** drenagem nos acostamentos ou revesti-los.

- **Deslocamento ou solas** – são separações de diferentes camadas do revestimento, aplicadas em diferentes momentos.

**Possíveis causas:** ligante deficiente ou ausente entre as camadas, camada muito fina, execução com chuva.

**Soluções:** aplicação de ligante de forma conveniente, na ausência de água e com espessura devida, reconstrução

- **Dissolução** – é a lavagem da capa asfáltica por óleos combustíveis ou solventes.

**Possíveis causas:** vazamento nos meios de transporte.

**Soluções:** recomposição ou reconstrução a depender do nível de degradação.

- **Trilhas ou rodeiras** – deformações plásticas longitudinais no caminho preferencial dos eixos mais pesados do tráfego. As deformações podem atingir as camadas abaixo do pavimento.

**Possíveis causas:** tráfego excessivo ou, basicamente, subdimensionamento.

**Soluções:** reconstrução ou recuperação com o correto dimensionamento.

- **Ruptura total ou falência** – ruína, falência.

**Possíveis causas:** má fundação.

**Soluções:** reconstrução

#### 4.1. 3 - Serviços de conservação e manutenção de revestimentos de CCP

Os serviços de conservação e manutenção desempenham um papel crucial na preservação e na extensão da vida útil dos revestimentos de Concreto Compactado com Rolo Pneumático (CCRP). Essas atividades, muitas vezes subestimadas em sua importância, podem ser fundamentais para a durabilidade e o desempenho adequado das superfícies de CCRP. À luz da necessidade de manter esses revestimentos em condições ideais, é essencial considerar as práticas recomendadas, conforme evidenciado na literatura. Como ressaltado por (NOME, ANO), esses serviços podem ser divididos em duas categorias principais:

**1. Conservação de Rotina:** A conservação de rotina é um conjunto de procedimentos simples, porém vitais, realizados periodicamente. Essas ações incluem a limpeza, o enchimento e a resselagem de chutas e trincas no revestimento. O principal objetivo dessa etapa é evitar a infiltração de água no pavimento, o que pode comprometer sua integridade ao longo do tempo. A prevenção da entrada de umidade é fundamental para manter a resistência e a durabilidade do CCRP.

**2. Execução de Remendos:** A execução de remendos é outra etapa importante nos serviços de conservação e manutenção do CCRP. É essencial que os remendos sejam realizados de acordo com as diretrizes estabelecidas na literatura e por especialistas em pavimentação. É recomendado que os lados do remendo sejam mantidos preferencialmente paralelos ou perpendiculares à via, com dimensões mínimas de 8 cm x 120 cm. Caso o remendo afete as juntas, é crucial que essas juntas sejam refeitas para garantir a continuidade do revestimento. De acordo com (PINTO, S. PREUSSLER, 2002), ao executar remendos no CCRP, é importante cortar verticalmente os bordos do remendo. Essa prática visa evitar que pontas do revestimento antigo penetrem na nova camada, o que poderia resultar em lascas e desgaste prematuro. Além disso, é fundamental utilizar um CCRP homogêneo para o remendo, e o local deve ser adequadamente limpo e umedecido. É imprescindível também garantir um bom adensamento e cura do remendo, com o objetivo de minimizar a retração e garantir que o CCRP atinja a resistência necessária ( $MR=3,5$  Mpa) antes da exposição ao tráfego.

A superfície do remendo deve ser nivelada para evitar irregularidades que possam comprometer o desempenho. Em casos de danos mais severos, pode ser necessário considerar a cobertura ou a substituição da placa, o que pode ser realizado com mistura betuminosa ao CCRP, conforme indicado por (PINTO, S. PREUSSLER, 2002). Portanto, a implementação adequada desses serviços de conservação e manutenção, de acordo com as diretrizes da literatura e as melhores práticas recomendadas, desempenha um papel crucial na preservação e

no prolongamento da vida útil dos revestimentos de CCRP, contribuindo para a segurança e a qualidade das vias públicas.

#### **4.2 – Impactos Ambientais**

Com isso sabemos que a pavimentação de rodovias desempenha um papel fundamental no desenvolvimento das infraestruturas de transporte em uma região. Para garantir que a pavimentação seja realizada de maneira eficaz e sustentável, é crucial considerar os impactos ambientais associados a todo o processo, desde a terraplenagem até a pavimentação.

Impactos na Estrutura do Solo se dá muito pela movimentação de solo durante obras de terraplenagem pode resultar em alterações na estrutura do solo, incluindo compactação e adensamento. Essas mudanças podem afetar negativamente o solo e, por conseguinte, o ambiente circundante. Para minimizar esses impactos, é essencial que sejam realizados estudos detalhados das prováveis movimentações de solo durante a fase de projeto. Além disso, a implementação de um programa de monitoramento da estabilidade de taludes e da estrutura da usina é fundamental para evitar deslizamentos e erosão.

Os derramamentos de cimento asfáltico de petróleo, vazamentos de CAP-Dop, óleos lubrificantes e óleo combustível podem causar alterações nas propriedades físico-químicas do solo. Para prevenir essas mudanças indesejáveis, é crucial a implementação de um plano de contingência que inclua medidas como a impermeabilização de áreas suscetíveis a derramamentos e um programa de monitoramento da qualidade do solo. A análise laboratorial de amostras de solo e o acompanhamento contínuo são ferramentas importantes para avaliar a eficácia dessas medidas.

A usina de asfalto também pode afetar a qualidade da água superficial e subterrânea devido à disposição inadequada de resíduos sólidos, lançamento de efluentes domésticos sem tratamento adequado e vazamentos de produtos químicos. Medidas preventivas, como a implantação de sistemas de tratamento para efluentes e a adequação do sistema de drenagem pluvial, são essenciais para minimizar esses impactos. Além disso, programas de monitoramento de águas e sedimentos devem ser implementados para avaliar a eficácia dessas medidas.

A qualidade do ar pode ser significativamente afetada pela falta de manutenção do filtro de mangas da usina. Isso pode resultar em efeitos agudos sobre a área circundante. Para minimizar esses impactos, é fundamental realizar manutenção regular do filtro de mangas. Além disso, um programa de acompanhamento da população exposta à poluição do ar é recomendado, a terraplenagem e pavimentação de rodovias têm o potencial de causar impactos ambientais significativos. No entanto, por meio da implementação de medidas mitigadoras e compensatórias adequadas, é possível minimizar esses impactos e promover práticas de construção sustentável. A gestão ambiental eficaz desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade ambiental durante todo o processo de pavimentação de rodovias. A pavimentação asfáltica, apesar de proporcionar inúmeros benefícios à sociedade, também desencadeia uma série de impactos ambientais que merecem atenção.

Quando projetamos e construímos estradas e rodovias, é imperativo considerar os potenciais danos ao meio ambiente. Infelizmente, muitos desses projetos carecem de medidas mitigatórias eficazes, que são ações planejadas para reduzir os impactos ambientais negativos resultantes dessas empreitadas. Como observado por Ribeiro et al. (2018), a pavimentação de rodovias tem contribuído para a produção de resíduos prejudiciais que afetam significativamente a qualidade do ar atmosférico. A poluição proveniente dos componentes das misturas utilizadas no asfalto representa um problema crítico a ser enfrentado. Nesse contexto, a busca por avanços tecnológicos e materiais mais sustentáveis é fundamental. É necessário que esses materiais tenham um baixo teor de poluentes, o que ajudaria a preservar a saúde das pessoas e o meio ambiente.

A preocupação com a sustentabilidade não pode ser restrita a determinados setores da indústria, como alimentos ou têxteis; a construção civil também precisa abraçar a inovação por meio de materiais e técnicas que garantam melhorias abrangentes, sobretudo em termos de saúde e sustentabilidade ambiental. Um dos elementos críticos na pavimentação é o ligante asfáltico, também conhecido como Cimento Asfalto Petróleo. Esse material, que é a fração mais pesada resultante do processo de destilação do petróleo, é conhecido por sua alta viscosidade, cor escura e inflamabilidade. No entanto, a preocupação central reside em sua composição química, uma mistura de hidrocarbonetos (90 a 95%) com heteroátomos de nitrogênio, enxofre e outros elementos (5 a 10%). Durante o processo de fabricação, as temperaturas atingem até 150°C, o que leva à emissão de hidrocarbonetos no ar (RIBEIRO ET AL., 2018). Adicionalmente, as usinas convencionais envolvidas na produção de materiais asfálticos

também contribuem para a problemática ambiental. Essas usinas são fontes significativas de poluição que afetam as comunidades circundantes. Como demonstrado na Figura 4, a poluição oriunda dessas usinas causa sérios transtornos à saúde da população local, levando ao desenvolvimento de diversas patologias (RIBEIRO ET AL., 2018). Nesse cenário, a questão ambiental relacionada à pavimentação asfáltica é uma problemática complexa e multifacetada, que exige soluções inovadoras.

A busca por materiais mais sustentáveis e a implementação de práticas que reduzam a emissão de poluentes durante a produção de asfalto tornaram-se imperativos na mitigação dos impactos ambientais. A conscientização sobre essas questões, tanto entre os profissionais da construção civil quanto na sociedade em geral, é essencial para promover a transição para abordagens mais sustentáveis na pavimentação. Por meio de pesquisas e desenvolvimento contínuo, é possível minimizar os efeitos negativos da pavimentação asfáltica no meio ambiente, garantindo que as futuras gerações possam desfrutar das vantagens das estradas e rodovias sem prejudicar o planeta.

A pavimentação asfáltica, apesar de desempenhar um papel essencial na expansão das redes viárias e no desenvolvimento econômico, tem gerado impactos significativos no meio ambiente. Embora seja um elemento crucial para a mobilidade e a conectividade entre regiões, é cada vez mais necessário adotar abordagens mais sustentáveis na sua construção e manutenção. O equilíbrio entre a necessidade de estradas de alta qualidade e o dever de proteger o meio ambiente se tornou uma prioridade na sociedade atual. Oliviera (2014) destaca a importância de empregar resíduos ou materiais com uma visão de sustentabilidade na pavimentação asfáltica. Essa abordagem, embora desafiadora, é fundamental para melhorar a qualidade do meio ambiente e evitar impactos negativos que afetam tanto a natureza quanto a saúde das pessoas. Entretanto, o uso desses materiais exige um conhecimento aprofundado sobre suas composições para evitar novas contaminações e poluição ambiental. As estradas sustentáveis emergem como uma solução promissora para minimizar os impactos ambientais causados pela pavimentação convencional. Teixeira (2019) fornece exemplos de estradas inovadoras construídas em outros países. Essas estradas não apenas reduzem o impacto ambiental, mas também oferecem alternativas mais limpas e seguras para a mobilidade. A Holanda, por exemplo, introduziu uma estrada sustentável em Roterdã, incorporando plásticos reciclados em sua construção. Isso não apenas proporciona melhorias na qualidade do ar, mas também contribui para a preservação ambiental. Além disso, novos tipos de asfalto, produzidos

com materiais reciclados, têm o potencial de reduzir em até 19% as emissões de gases poluentes, absorvendo 45% desses gases emitidos pelos veículos.

Rosa (2017) observa que existem inúmeros materiais capazes de reter a poluição do ar ou, pelo menos, minimizar seu impacto no meio ambiente. A necessidade de utilizar materiais sustentáveis na construção de estradas é imperativa nos tempos modernos para garantir um ambiente mais saudável e agradável para todos. Aquino et al. (2015) destacam a importância do desenvolvimento sustentável e da prevenção e controle integrados da poluição para a proteção ambiental. Garantir o progresso e o bem-estar da sociedade exige a construção de estradas e rodovias com materiais que tenham uma baixa taxa de degradação. A busca por estradas sustentáveis e pavimentação ecológica se fortalece à medida que o Brasil e outros países buscam abordagens mais sustentáveis no desenvolvimento de infraestruturas.

A utilização de materiais reciclados, bem como a incorporação de concreto reciclado, em conformidade com as normas ambientais, emerge como uma estratégia promissora para reduzir os impactos ambientais da pavimentação. Essas inovações não apenas contribuem para a preservação do meio ambiente, mas também reduzem a quantidade de resíduos gerados nos canteiros de obras. Portanto, a pavimentação asfáltica deve evoluir para uma prática mais sustentável, considerando não apenas a qualidade das estradas, mas também os impactos ambientais. A adoção de materiais e técnicas inovadoras é essencial para equilibrar as necessidades da sociedade e a proteção do meio ambiente, abrindo caminho para uma infraestrutura mais sustentável e amigável ao planeta.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pavimentação asfáltica desempenha um papel crucial no desenvolvimento da infraestrutura de transporte, promovendo a mobilidade, conectividade e crescimento econômico. No entanto, à medida que avançamos no século 21, tornou-se evidente que essa prática também gera impactos ambientais significativos. A preocupação crescente com a sustentabilidade e a conservação do meio ambiente exige uma reavaliação profunda dos métodos e materiais tradicionalmente empregados na pavimentação de rodovias.

As discussões ao longo deste trabalho demonstraram que a pavimentação rígida e a pavimentação flexível apresentam vantagens e desvantagens distintas, sendo a pavimentação rígida frequentemente apontada como a opção mais sustentável em termos de durabilidade, impactos ambientais e eficiência energética. O uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP) no processo tradicional de pavimentação flexível resulta na liberação de poluentes, representando uma preocupação ambiental significativa. No entanto, o pavimento de concreto, com sua cor clara, reflete luz, reduzindo a necessidade de iluminação pública e melhorando a visibilidade nas estradas, especialmente em condições noturnas e chuvosas. Além disso, o pavimento de concreto é menos suscetível a derrapagens, resultando em menor consumo de combustível e maior segurança para os motoristas.

A questão ambiental relacionada à pavimentação asfáltica é complexa e multifacetada, exigindo soluções inovadoras para minimizar os impactos negativos. A busca por materiais mais sustentáveis, técnicas de construção mais limpas e a implementação de medidas mitigatórias e compensatórias são cruciais para promover práticas de construção sustentável e reduzir a poluição do ar, dos solos e das águas.

É fundamental que a indústria da construção civil, juntamente com os órgãos reguladores e a sociedade em geral, conscientizem-se sobre a importância de adotar materiais e métodos mais sustentáveis na pavimentação de rodovias. Somente por meio de pesquisa contínua e inovação, é possível minimizar os impactos ambientais da pavimentação asfáltica,

assegurando um futuro em que as gerações vindouras possam desfrutar dos benefícios das estradas e rodovias sem prejudicar irreversivelmente o nosso planeta.

Em um contexto de crescente conscientização ambiental, a transição para práticas de pavimentação mais sustentáveis é uma necessidade inadiável. Concomitantemente, a criação de políticas públicas que incentivem e regulamentem o uso de materiais ecoamigáveis na construção de estradas é essencial para garantir que a preservação ambiental seja uma prioridade em todos os projetos de infraestrutura. Portanto, concluímos que, embora a pavimentação asfáltica tenha sido tradicionalmente vista como um facilitador do progresso, é fundamental repensar e reestruturar suas práticas para minimizar seu impacto ambiental. A transição para materiais mais sustentáveis, juntamente com a promoção de práticas construtivas limpas, pode ajudar a garantir que a pavimentação asfáltica contribua para um futuro mais verde e saudável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINTO, S; PINTO, I. E. Pavimentação Asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

PINTO, S. PREUSSLER, E. Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 2ª ed. 269p. 2002.

SALOMÃO, P, E. FROÈS, L,M. Pavimentação rodoviária: uma análise de qual melhor tipo de pavimentação para as rodovias. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.02, 2020/02 ISSN 2178-6925.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, 2015.

SILVA, Roberta Jerônimo Fernandes da; MENDES, Luis Augusto de Carvalho. Pavimentação de Rodovias: Um levantamento bibliográfico. Revista Mangaio Acadêmico, v. 1, n. 2, p. 75, 2017.

MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes; MARTINS, Renata Farah; DOS SANTOS, Alexandre Rosa. Identificação dos impactos ambientais relacionados à pavimentação da Rodovia MG 307 no município de Grão Mogol, MG. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 6, n. 5, p. 40, 2011.

MEAN, Angélica; ANANIAS, Renata; OLIVEIRA, Viviane. Pavimentação rígida. Artigo apresentado a Universidade São Francisco. Itatiba, 2011.

CIVIL, CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA. SUSTENTABILIDADE NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA.

SOARES-FILHO, Britaldo; DAVIS, Juliana Leroy; RAJÃO, Raoni. Pavimentação da BR-319, a Rodovia do Desmatamento. 2020.

MELLONE, Gláucia; DOS SANTOS, Mário Roberto; SHIBAO, Fabio Ytoshi. Pavimentação de rodovias com a utilização de resíduos de pneus inservíveis. Revista Eletrônica Gestão e Serviços, v. 3, p. 489-508, 2013.

RAUBER, Ana Carla Carvalho; CASSANEGO, Marcio Luiz; DA SILVA, Rodrigo Ferreira. Diagnóstico de impactos ambientais causado por usina de asfalto. Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas, v. 5, n. 1, p. 97-106, 2004.

BASTOS, DANIELLA et al. ASFALTO-BORRACHA: ASPECTOS TÉCNICOS, E IMPACTOS AMBIENTAIS. 2017.

PETERLINE, Allan Felipe. Asfalto ecológico: uma análise sobre a viabilidade da sua utilização como substituto do asfalto convencional. 2022.

COELHO, Johnny Gilberto Moraes; DE SOUSA, João Guilherme Mota; DIAS, Carmen Gilda Barroso Tavares. Estrada ecoeficiente: aplicação de asfalto com adição de composto madeira/borracha na região Norte do Brasil. Novos Cadernos NAEA, v. 24, n. 3, 2021.

RIBEIRO, Jefferson Pereira et al. Avaliação da emissão de poluentes atmosféricos durante os processos de usinagem, transporte e aplicação de misturas asfálticas em ambiente urbano. 2018.

OLIVEIRA, Millena Damilde de et al. Utilização de resíduos em pavimentação rodoviária. 2014.

TEIXEIRA, C. P. O futuro das estradas: as vantagens da sustentabilidade. 15 de nov. de 2019. Radar do Futuro. Disponível em: <https://radardofuturo.com.br/futurodas-estradas-as-vantagens-da-sustentabilidade>. Acesso em: nov. 2019.

ROSA, M. Asfalto que absorve a poluição. 2017. Ciclo Vivo. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/asfalto-que-absorve-poluicao-do-are-criado-na-holanda/>. Acesso em 05 out. 2020.

ABNT (2004d). NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil –Execução de camadas de pavimentação –Procedimentos. Associação, 2004.

GONÇALVES, R. D. C. Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto: um Novo Material para Dosagens Estruturais. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001.

DORNELAS, Ricardo Cruvinel. Estudo de métodos para prognóstico da produtividade na execução de rodovias: terraplenagem e pavimentação asfáltica-uma nova abordagem. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KNOP, Alexandre. O uso de materiais alternativos na pavimentação de rodovias com baixo a médio volume de tráfego. Salão de iniciação Científica (13.: 2001: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2001., 2001.

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador; FRÓES, Luann Marco Moreira. PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA.: UMA ANÁLISE DE QUAL MELHOR TIPO DE PAVIMENTAÇÃO PARA AS RODOVIAS BRASILEIRAS. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 2, n. 1, 2020.

DOS SANTOS, Douglas Freitas Augusto. Pavimentação rodoviária: a recuperação em discussão. **Engineering Sciences**, v. 7, n. 2, p. 77-85, 2019.

DOS SANTOS, Raphael Lúcio Reis; DE SOUZA RODRIGUES, Conrado. Aplicação do resíduo proveniente do corte de ardósia em pavimentação rodoviária. 2016.

SOARES, Anna Beatriz Barbosa de Aragão. Uso de resíduos em pavimentação rodoviária. 2022.

SILVA, Taciano Oliveira da et al. Sistemas de classificações geotécnicas de solos: estudo de caso aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 34, p. 313-321, 2010.

GUIMARAES, RONER RODRIGUES et al. Engenharia de Pavimentação e suas Técnicas Construtivas. 2021.

GUERRA, LUCIANA DA ROCHA MELO. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA.

DE ROSSO, Lucas et al. Projeto de Pavimentação Asfáltica. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 5, n. 1.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Pavimentação. **Juíz de Fora:[sn]**, 2012.