

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Joyce Rodrigues de Oliveira Cunha



**ESTUDO COMPARATIVO DE AGENTES MODIFICADORES
EM LIGANTES ASFÁLTICOS POR ANÁLISE TÉRMICA**

RIO DE JANEIRO

2024

Joyce Rodrigues de Oliveira Cunha

ESTUDO COMPARATIVO DE AGENTES MODIFICADORES EM LIGANTES
ASFÁLTICOS POR ANÁLISE TÉRMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadora: Prof^a Michelle Gonçalves Mothé, D. Sc.
Prof^a Cheila Gonçalves Mothé, D. Sc. (*in memoriam*)

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

C972e

Cunha, Joyce Rodrigues de Oliveira Cunha
Estudo Comparativo de Agentes Modificadores em
Ligantes Asfálticos por Análise Térmica / Joyce
Rodrigues de Oliveira Cunha Cunha. -- Rio de
Janeiro, 2024.
53 f.

Orientadora: Michelle Gonçalves Mothé.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2024.

1. Ligante Asfáltico. 2. Modificadores. 3.
Pavimentação. 4. Análise Térmica. I. Mothé, Michelle
Gonçalves, orient. II. Título.

Joyce Rodrigues de Oliveira Cunha

**ESTUDO COMPARATIVO DE AGENTES MODIFICADORES EM LIGANTES
ASFÁLTICOS POR ANÁLISE TÉRMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheira
Química.

Aprovado em 18 de julho de 2024.

Prof^a Michelle Gonçalves Mothé, DPO/ EQ/UFRJ (orientadora)

Prof. Marcelo Mendes Viana, DPI/ EQ/ UFRJ

Dra. Larissa Moraes Viana, EQ/ UFRJ

Rio de Janeiro
2024

Dedico este trabalho à minha avó Liquinha (in memoriam) que sempre se orgulhou, acreditou em mim e sonhou com este dia. Eu te amo para todo sempre, vó.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer à Deus que sempre esteve no controle de todas as coisas. É tudo por Ele, para Ele e com Ele.

Aos meus pais, Jó e Vandréia, que sempre foram minha base e suporte. Obrigada por todo encorajamento e apoio incansável. Vocês são os meus maiores exemplos de fé, amor e determinação.

Aos meus irmãos, Daniel e Jaqueline, que sempre acreditaram em mim e torceram para que este dia chegasse. Eu os amo de todo o coração.

À minha avó Liquinha (in memoriam) que sempre se orgulhou da neta que seria engenheira química. Sei que você está celebrando essa conquista aí de cima, vó. É para você!

Ao Instituto Lecca que foi a porta de entrada do meu sucesso acadêmico e me proporcionou tantas oportunidades que me fizeram chegar aonde estou hoje.

À minha amiga Julianne pela parceria de anos, compartilhando incontáveis momentos juntas e por tornar a jornada da vida infinitamente melhor. Que orgulho da gente!

À minha amiga Larissa (in memoriam) que marcou a minha vida de forma avassaladora! Que privilégio foi ter sido sua amiga, sei que você está orgulhosa.

À minha amiga Gabriela que desde que chegou sempre se manteve presente e celebra comigo cada pequena conquista da vida. Te amo.

Ao meu trio de amigas favorito, Hemily e Lydia, que foram e são essenciais. Obrigada por me impulsionarem diariamente e por serem a expressão do cuidado de Deus na minha vida!

Aos meus amigos: Daniel, Guilherme, Giulio e Miguel. Vocês são minhas grandes referências e exemplos de homens de Deus. Obrigada por todo o apoio e encorajamento nessa reta final.

À minha família espiritual: pastora Sil, pastor Alex, pastora Vivi e pastora Thais. Obrigada por toda injeção de ânimo e por sempre acreditarem em mim mais do que eu mesma.

Às minhas amigas do trabalho: Jade, Isabelle, Cassiane, Yasmin e Carol. Tenho a sorte de trabalhar diariamente ao lado de pessoas tão incríveis que se tornaram verdadeiras amigas pra toda vida. Obrigada por todo suporte. Eu amo vocês!

À professora Cheila Mothé (in memoriam) que se tornou minha grande inspiração e exemplo desde quando a conheci, sua trajetória impactou minha vida acadêmica.

À professora Michelle Mothé que foi muito além de orientadora. Seus ouvidos, colos, puxões de orelha e conselhos foram cruciais para que esse dia chegasse. Muito obrigada!

*And all my life You have been faithful
And all my life You have been so good
With every breath that I am able
I'm gonna sing of the goodness of God (BETHEL MUSIC, 2021)*

RESUMO

RODRIGUES DE OLIVEIRA CUNHA, Joyce. **Estudo Comparativo de Agentes Modificadores em Ligantes Asfálticos por Análise Térmica.** Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O Brasil possui uma extensa malha rodoviária, que desempenha um papel importante no transporte de mercadorias e passageiros impactando assim o desenvolvimento econômico do país. O principal componente da pavimentação dessas estradas e rodovias é o ligante asfáltico de petróleo (CAP) ou apenas asfalto, que pode ser definido como um material viscoso e de cor escura proveniente do petróleo cru ou presente em jazidas na forma de asfalto natural. A fim de melhorar a resistência mecânica, térmica e vida útil dos ligantes asfálticos, eles são misturados com agentes modificadores. O presente trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento térmico de amostras de ligantes asfálticos modificados de modo a avaliar o seu comportamento e sua estabilidade térmica. Os agentes modicadores utilizados foram a borra oleosa de petróleo, a borracha de pneu inservível e o Líquido da Casca de Castanha de Caju (LCC). Foram analisadas seis amostras neste trabalho, são elas: o ligante puro (CAP 50/70), uma mistura (M1) de borra oleosa de petróleo com pó de borracha de pneus, uma amostra de ligante modificado com 10% m/m de M1 (CM1-10) e outra com 20% m/m de M1 (CM1-20), ligante modificado com 10% m/m de M1 e 1% de LCC (CM1L-10) e ligante modificado com 20% m/m de M1 e 1% de LCC (CM1L-20). Todas as amostras foram caracterizadas por análise térmica utilizando as técnicas de TG, DTG e DTA no analisador termogravimétrico, modelo SDT Q600, da marca TA Instruments em uma razão de aquecimento de 10°C/min variando a temperatura de 25 até 1000°C em atmosfera inerte, utilizando aproximadamente 10 mg de amostra. A Análise Térmica se mostrou uma técnica eficiente na confirmação da incorporação da mistura de rejeitos (pneu e borra) e do LCC no ligante asfáltico.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Matriz de Transportes no Brasil
- Figura 2 – Esquema de processo refino do petróleo leve e produção do asfalto
- Figura 3 – Esquema de processo refino do petróleo pesado e produção do asfalto
- Figura 4 – Diagrama de blocos da classificação dos asfaltos segundo DNER
- Figura 5 – Camadas do pavimento asfáltico
- Figura 6 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/mil km²)
- Figura 7 – Malha rodoviária do Brasil em 2021
- Figura 8 – Classificação do estado das rodovias brasileiras
- Figura 9 – Classificação Geral das Rodovias Brasileiras
- Figura 10 – Evolução do número de acidentes rodoviários registrados pela PRF e do custo dos acidentes rodoviários no Brasil (R\$ bilhões*) – 2016 a 2023
- Figura 11 – Investimento Necessário vs. Realizado, 2019-2022, em R\$ bilhões
- Figura 12 – Representação esquemática dos defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos
- Figura 13 – Representação esquemática dos defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos.
- Figura 14 – Representação esquemática dos defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos.
- Figura 15 – Representação de uma curva termogravimétrica
- Figura 16 – Comparação das curvas de TG (a) e DTG (b)
- Figura 17 – Curva típica obtida pela técnica DTA
- Figura 18 – Diagrama de blocos para amostra M1
- Figura 19 – Borra oleosa de petróleo
- Figura 20 – Borracha de pneus inservíveis particulada
- Figura 21 – Diagrama de blocos para as amostras CM1-10 e CM1-20
- Figura 22 – Diagrama de blocos para as amostras CM1L-10 e CM1L-20
- Figura 23 – Analisador Termogravimétrico da marca TA Instruments, modelo SDT Q600
- Figura 24 – Curvas de TG/DTG e DTA para CAP 50/70
- Figura 25 – Curvas de TG/DTG e DTA para M1
- Figura 26 – Curvas de Termogravimetria (TG) dos ligantes modificados
- Figura 27 – Curvas de Termogravimetria Derivada (DTG) dos ligantes modificados
- Figura 28 – Curvas de Análise Térmica Diferencial (DTA) dos ligantes modificado

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Quadro de resumo dos defeitos na pavimentação

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ADP Asfalto diluído de petróleo
ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTP Associação Nacional de Transportes Públicos
CAP Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CL Cura lenta
CM Cura média
CR Cura rápida
DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
CNI Confederação Nacional da Indústria
CNT Confederação Nacional de Transportes
DTA Análise Térmica Diferencial
DTG Termogravimetria Derivada
EMA Emulsão Asfáltica
IBP Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
LCC Líquido da Casca de Castanha de Caju
PRF Polícia Rodoviária Federal
TG Termogravimetria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS	15
3 MOTIVAÇÃO.....	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 BREVE HISTÓRICO DE LIGANTES ASFÁLTICOS	17
4.2 DEFINIÇÃO E OBTENÇÃO.....	18
4.3 TIPOS DE LIGANTES ASFÁLTICOS.....	20
4.4 AGENTES MODIFICADORES EM LIGANTES	23
4.5 LIQUIDO DA CASCA DE CASTANHA DO CAJU	24
4.6 BORRA DE PETRÓLEO.....	24
4.7 BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL	25
4.8 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA.....	25
4.8.1 Mistura Asfáltica	26
4.9 PANORAMAS DAS ESTRADAS BRASILEIRAS	27
4.10 PRINCIPAIS DEFEITOS DO PAVIMENTO	30
4.11 EMPRESAS BRASILEIRAS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS E RODOVIAS.....	35
4.12 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO EM LIGANTES ASFÁLTICOS	36
4.12.1 Análise Térmica.....	36
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
5.1 MATERIAIS.....	39
5.2 MÉTODOS.....	39
5.2.1 Preparação e Obtenção	39
5.2.2 Caracterização das amostras	41
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
7 CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

As estradas e rodovias são responsáveis por conectar cidades, estados e até mesmo países, permitindo o transporte de todos os tipos de carga, além de expandir os mercados e a movimentação de mercadorias e passageiros. Neste contexto, a malha rodoviária ocupa uma posição de destaque devido ao seu impacto direto no desenvolvimento socioeconómico do país.

O asfalto pode ser definido como um material aglutinante não volátil à prova d'água proveniente do petróleo cru, ou presente em jazidas na forma de asfalto natural, completamente solúvel em tolueno, e muito viscoso ou quase um sólido a temperatura ambiente (ECS, 2000). Dentre as inúmeras aplicações do asfalto como impermeabilização, proteção à corrosão e uso elétrico, seu uso na pavimentação é o mais importante e amplamente utilizado. O uso intensivo do asfalto em pavimentação se justifica pelo fato de que ele proporciona forte união dos agregados, é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, pode ser utilizado aquecido ou emulsionado e usado como um ligante que permite flexibilidade controlável.

No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico. Vale ressaltar que apenas 12% das rodovias brasileiras são pavimentadas e há uma escassez significante de investimentos e recursos financeiros destinados à infraestrutura delas, portanto a má conservação das rodovias pavimentadas é uma realidade atual no Brasil. Em 2023, a Confederação Nacional de Transporte (CNT) avaliou milhares de quilômetro pavimentados no Brasil e os resultados quanto ao estado dessas rodovias pavimentadas não foram favoráveis, cerca de 67,5% das foram classificadas como ruins ou péssimas.

Os pavimentos asfálticos sofrem durante a vida útil um processo de degradação sob a ação constante do tráfego e das condições atmosféricas. Com o aumento do número de veículos, das cargas por eixo dos veículos comerciais, carga transportada e pressões dos pneus, a modificação dos ligantes asfálticos vem sendo fundamental para a melhoria no desempenho das misturas asfálticas.

Os ligantes asfálticos em sua maioria são misturados com agentes modificadores a fim de conferir melhorias na resistência mecânica, térmica e vida útil. “Os modificadores têm por finalidade aumentar a resistência do ligante frente à deformação permanente em

altas temperaturas sem interferir nas propriedades em diferentes faixas de temperaturas” (LEWANDOWSKI, 1994).

Pesquisas de ligantes asfálticos e modificadores vêm tomando força e crescendo ao longo dos anos em todo o mundo. Para a avaliação de ligantes asfálticos com ou sem modificador, algumas técnicas vêm sendo bastante utilizadas para a caracterização, dentre elas a análise térmica têm se destacado por utilizar pouca quantidade de amostra, possuir respostas claras e objetivas através de gráficos e fornece informações relevantes quanto à estabilidade térmica dos ligantes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento do ligante asfáltico modificado através da análise técnica pelas técnicas de Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização por análise térmica pelas técnicas de Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Análise Térmica Diferencial (DTA) de amostras de CAP 50/70 puro e CAP 50/70 modificado com mistura de borracha de pneu + borra de petróleo, de modo a avaliar o comportamento e estabilidade térmica.
- Realizar a caracterização por análise térmica pelas técnicas de Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Análise Térmica Diferencial (DTA) das amostras de ligantes modificados com 10 e 20% da mistura de borra de petróleo oleosa + pó de borracha de pneu e 1% de LCC (líquido da casca de castanha de caju), a fim de avaliar as interações químicas entre esses aditivos e os ligantes.

3 MOTIVAÇÃO

No Brasil, a rede rodoviária é amplamente utilizada para o transporte de cargas, bens e pessoas e, portanto, constitui a base para o desenvolvimento econômico do país. Apesar disso, apenas 12% das rodovias brasileiras são pavimentadas.

A pavimentação das rodovias é feita pelos ligantes asfálticos (também chamado de cimento asfáltico de petróleo, CAP), sendo assim, pesquisas sobre as propriedades do ligante asfáltico são inevitáveis visto que a melhoria na qualidade de estradas e rodovias impactará direto na economia do país, além de diminuir o número de acidentes rodoviários, reduzir o consumo de combustível e reduzir custos de manutenção de veículos.

Levando em consideração então a importância desempenhada das vias pavimentadas no país, o estudo sobre a modificação de ligantes asfálticos vem ganhando destaque visando obter um material de melhor qualidade, diminuindo assim os custos e necessidade de manutenção e aumentando a segurança das vias para os usuários.

Além disso, pavimentos mais duráveis e com menor necessidade de manutenção contribuem para a redução de CO₂. Estudos feitos pela Universidade de São Paulo (USP) em 2019 demonstram que a pavimentação com asfalto modificado pode reduzir de 27% a 50% as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera durante seu ciclo de vida em comparação com o asfalto convencional.

Essa modificação é feita através de aditivos que têm por finalidade aumentar a resistência mecânica e térmica do ligante, recuperar a elasticidade e aumentar a vida útil tornando o pavimento mais seguro, econômico, confortável e com menos deformações (PIZZORNO,2010).

Portanto, a justificativa deste trabalho consiste em avaliar a melhor alternativa de agente modificador no ligante asfáltico segundo as técnicas de análise térmica que proporciona uma melhor compreensão das propriedades físico-químicas e a forma que eles atuam nos pavimentos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 BREVE HISTÓRICO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ligantes asfálticos vêm sendo utilizado há milhares de anos desde o início da civilização. Inicialmente, o asfalto era encontrado em depósito naturais de betume, que é uma substância escura e viscosa derivada do petróleo. Existem registros que mostram o uso do asfalto na cidade de El Kowm Basin na Síria, no qual o asfalto natural era usado para unir utensílios a pedras e ferramentas para gerar faísca e consequentemente controlar o fogo (LESUEUR, 2009; MOTHÉ, 2009). No antigo Egito, o asfalto era usado para impermeabilizar embarcações e recipientes. Os babilônios também usavam asfalto em suas construções, enquanto os romanos o utilizavam na construção de estradas. Existem também algumas citações na Bíblia Sagrada, como no Livro de Gênesis, onde o betume é usado como impermeabilizante da Arca de Noé. Os materiais asfálticos foram muito utilizados na antiguidade como aglutinante e impermeabilizante, na mumificação pelos egípcios e impermeabilização de reservatórios de água pelos mesopotâmios (IBP, 1999; MOTHÉ, 2009).

Foi no século XVII que vemos o início do uso de asfalto para pavimentação utilizando asfaltos naturais provenientes de jazidas. Na França seu primeiro registro ocorreu em 1802; em 1838 nos Estados Unidos e em 1869 na Inglaterra. Só em 1909 que o asfalto passou a ser obtido a partir do petróleo (IBP, 1999).

A partir do século XIX com a Revolução Industrial e o crescimento da indústria petrolífera, os ligantes asfálticos tornam-se fundamentais na pavimentação de estradas e rodovias. No Brasil, o desenvolvimento significativo da pavimentação ocorreu principalmente a partir do século XX com o crescimento da economia e a necessidade de integração nacional. Em 1937, foi criado o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), responsável por planejar e executar a construção de estradas em todo o país.

Com os avanços na infraestrutura rodoviária no Brasil ao longo dos anos e o crescimento urbano acelerado, o sistema rodoviário tornou-se o meio de transporte mais utilizado no país. Cerca de 65% do deslocamento de cargas no Brasil é feito por meio de rodovias. Entretanto, a falta de manutenção nas estradas e a falta de investimentos em novas obras são alguns dos principais problemas e desafios a serem enfrentados.

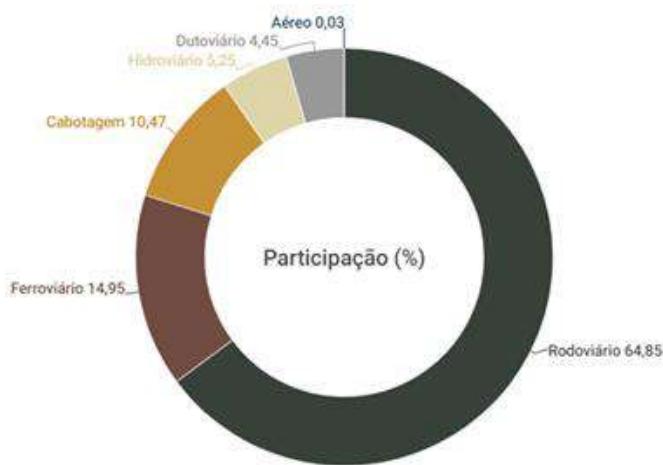


Figura 1 – Matriz de Transportes no Brasil

Fonte: CNT, 2024

4.2 DEFINIÇÃO E OBTENÇÃO

Caracteriza-se como ligante asfáltico de petróleo, asfalto ou simplesmente ligante asfáltico, uma substância viscosa e betuminosa derivada do petróleo que é amplamente utilizada na construção e manutenção de pavimentos, como estradas e rodovias. Para o Asphalt Institute, dos EUA, o ligante asfálticos são os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) com ou sem adição de modificadores.

A produção do ligante é caracterizada pela destilação do petróleo bruto em refinarias. O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos e pode ser encontrado em bacias sedimentares que são estruturas formadas por camadas de minério ou lençóis porosos de areia, arenitos ou calcários.

O petróleo após ser extraído da natureza é levado para as refinarias onde passa pelo processo conhecido de destilação fracionada. A destilação fracionada é o método de fracionamento de uma mistura homogênea em que se baseia nos diferentes pontos de ebulição dos componentes. Nesse processo, o petróleo é colocado em um forno ou caldeira ligado a uma torre de destilação que possui vários níveis, também conhecidos como pratos, e conforme a altura da torre aumenta, a temperatura de cada prato vai diminuindo. Os componentes mais leves – com pontos de ebulição mais baixos – evaporam primeiro e sobem até o topo da torre, condensam e saem. Já os hidrocarbonetos com moléculas maiores permanecem de forma líquida na base da coluna.

As frações que não são separadas nesta etapa de processamento em geral devido a alta viscosidade, peso e massa molecular são submetidas à destilação à vácuo. Nesta torre de destilação a pressão trabalhada é inferior à pressão atmosférica e isso possibilita que as frações mais pesadas da mistura entrem em ebulação em temperaturas mais baixas.

Normalmente na torre de destilação atmosférica os produtos obtidos são: o óleo diesel, querosene, nafta pesada e os produtos de topo são vapores de nafta leve e GLP (que são condensados fora da torre e então separados). O resíduo da destilação atmosférica que deixa o fundo da coluna pode ser denominado de resíduo atmosférico (RAT) que segue para a destilação à vácuo [RPDM, 2005, apud MOTHÉ, 2009]. Os produtos obtidos nesta etapa são: o gasóleo leve, gasóleo pesado e o asfalto.

A Figura 2 apresenta um esquema que representa o processo de destilação fracionada do petróleo leve ou com características intermediárias além de seus produtos obtidos.

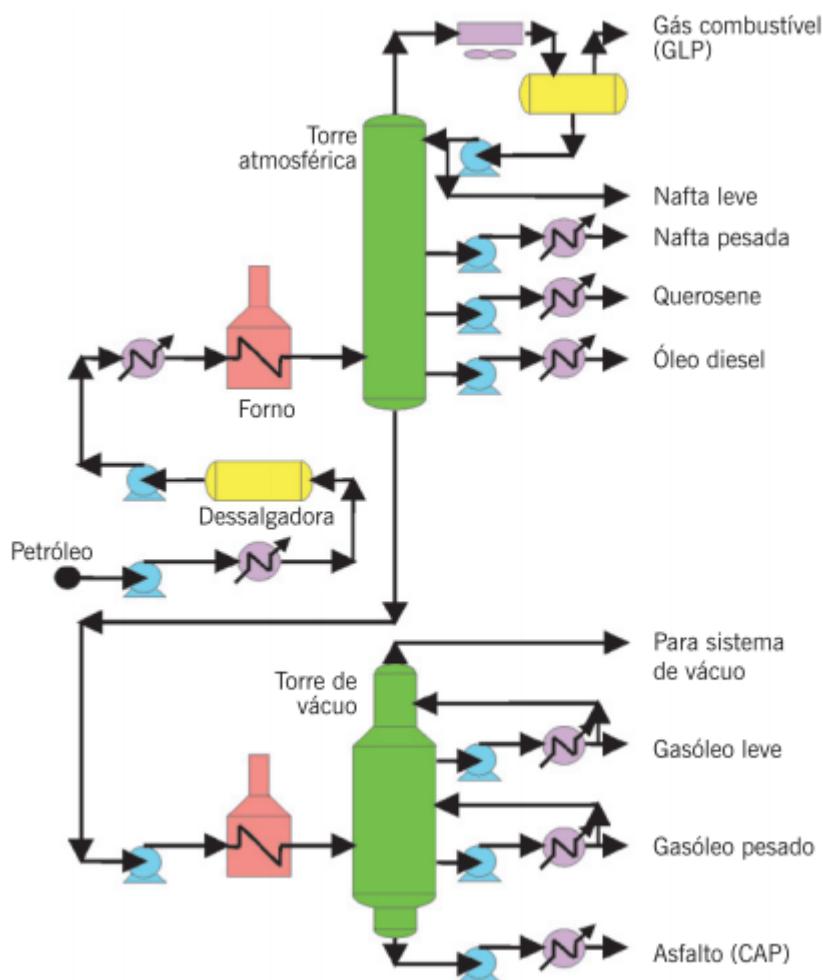


Figura 2 – Esquema de processo refino do petróleo leve e produção do asfalto

Fonte: TONAL E BASTOS, 1995 adaptado por BERNUCCI et al., 2010.

Por outro lado, a Figura 3 apresenta o processo para petróleos de base asfálticas – denominados petróleos pesados – ou seja que apresentam muito asfalto em relação a outras frações do petróleo, portanto neste processo o cimento asfáltico é produzido apenas com 1 estágio.

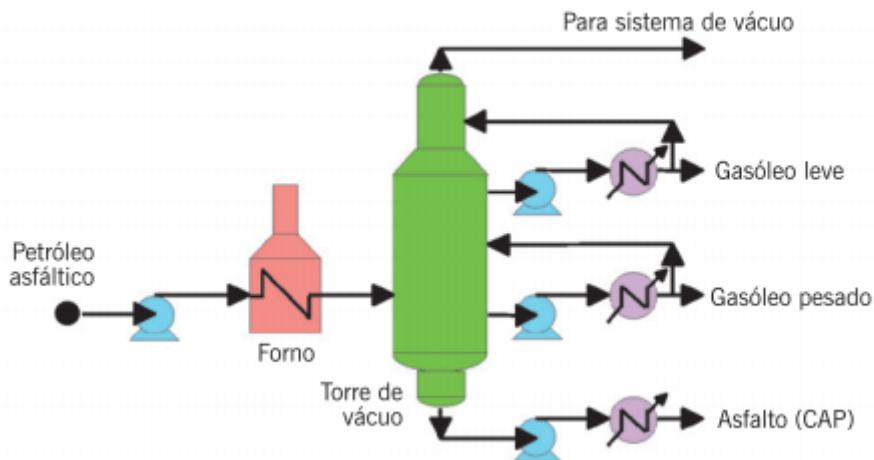


Figura 3 – Esquema de processo refino do petróleo pesado e produção do asfalto

Fonte: TONAL E BASTOS, 1995 adaptado por BERNUCCI et al., 2010.

Além do processo de destilação, o petróleo pode também ser submetido à outras duas etapas de refino chamadas de conversão e tratamento. Na conversão, as partes mais pesadas e de menor valor do petróleo são transformadas em moléculas menores dando origem à derivados mais nobres. Já o processo de tratamento consiste em adequar os derivados a atender a qualidade exigida pelo mercado.

Empresas como Petrobras, Braskem, Cia do Asfalto e Odebrecht são algumas das principais produtoras e distribuidoras de asfalto no Brasil. Segundo a Agenda Nacional de Petróleo (ANP), em 2022 foram comercializados no Brasil cerca de 2.589 toneladas de asfalto e 2.870 toneladas em 2023.

4.3 TIPOS DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ligantes asfálticos são divididos de três formas: ligante asfáltico natural (asfalto natural), ligante asfáltico de petróleo (asfalto de petróleo) e alcatrão. Os ligantes asfálticos naturais são depósitos de petróleo próximo à superfície da terra que sofrem uma destilação de forma natural ao longo do tempo pela ação do vento e do sol. Nesse processo natural os gases e óleos leves são removidos e retam apenas o resíduo duro que é o asfalto natural.

O alcatrão é subproduto da destilação destrutiva do carvão que passa por um processo de refino para produzir um líquido com propriedades físicas ao do cimento asfáltico. Por sua vez, quimicamente possui propriedades bem distintas visto que este possui muitos compostos carcinogênicos. Uma das suas principais aplicações na pavimentação é como selante dado que este material é insolúvel em derivados do petróleo. A figura 4 apresenta um diagrama de blocos com a classificação de asfalto.

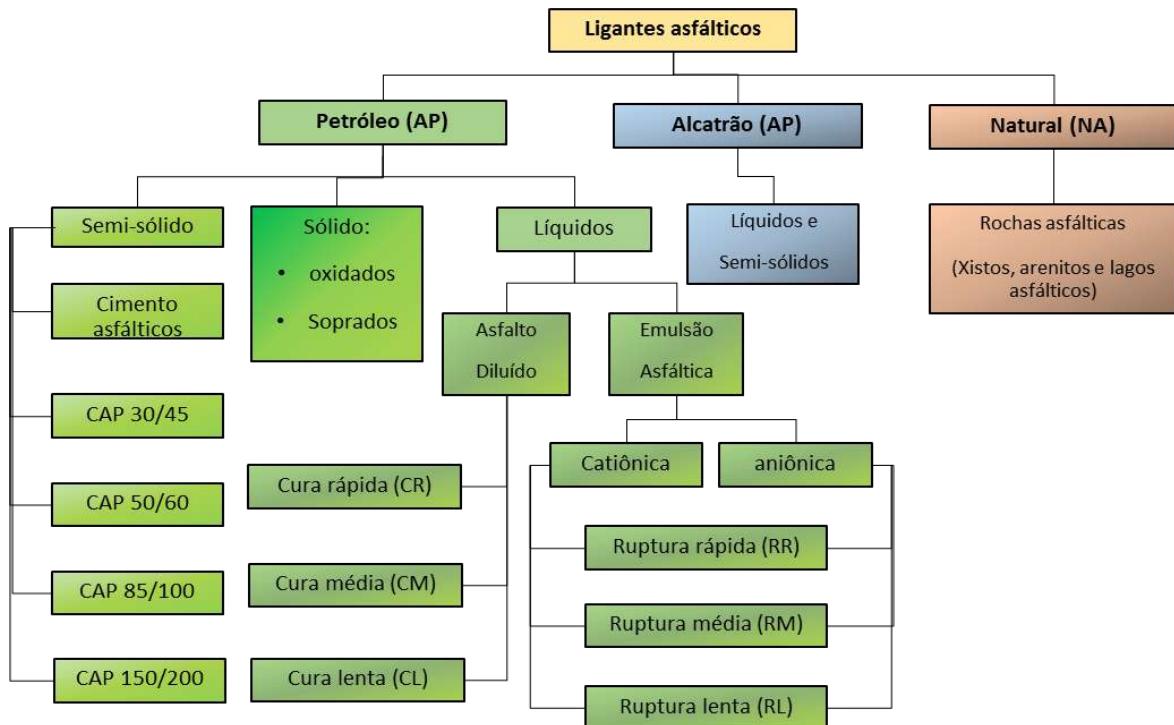


Figura 4 – Diagrama de blocos da classificação dos asfaltos segundo DNER

Fonte: Adaptado de DNER, 1996

Os asfaltos de petróleo podem ser destinados à indústria que são os asfaltos oxidados, e destinados para a pavimentação que são os asfaltos modificados para impermeabilização. Os asfaltos para a pavimentação são classificados em:

- **Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

O cimento asfáltico de petróleo é obtido durante o processo de refino do petróleo e é amplamente utilizado na produção de misturas asfálticas para a pavimentação de estradas e rodovias. Ele é caracterizado por sua alta viscosidade a baixas temperaturas, e à temperatura ambiente ele é encontrado na sua forma semissólida precisando ser

aquecido para adquirir a consistência necessária para misturar com os agregados. Dentre as suas características são também flexíveis, impermeáveis, aglutináveis e resistentes a ação da maioria de ácidos, sais e álcalis (IBP,1999).

Os cimentos asfálticos de petróleo podem ser classificados de acordo com o seu “grau de dureza”, ou seja, pela penetração que é a profundidade em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra no sentido vertical em uma amostra de asfalto sob condições específicas de temperatura, carga e tempo. Por exemplo, o CAP 40/60 tem uma penetração entre 40 e 60 décimos de milímetro. Quanto maior a penetração “mais mole” e mais maleável será o CAP.

Dentre alguns exemplos comuns de graus de penetração para cimento asfálticos de petróleo estão:

- CAP 30/45
- CAP 50/60
- CAP 50/70
- CAP 85/100
- CAP 120/150

Essa característica é importante para determinar a adequação do CAP para uma determinada aplicação visto que está diretamente ligada com a consistência, viscosidade, resistência e durabilidade do pavimento.

- Asfalto diluído de Petróleo (ADP)

Chamamos de asfalto diluído o asfalto diluído em solventes para reduzir a sua viscosidade e tornar mais fácil a sua aplicação na pavimentação. Geralmente os solventes são derivados de petróleo com volatilidade apropriada de forma que uma vez aplicados, eles evaporam totalmente restando o resíduo que é o próprio CAP. Esse processo é conhecido como cura e são utilizados também em serviços de tratamento de superfícies, imprimação e impermeabilizantes.

O asfalto diluído pode ainda ser classificado de acordo com o tipo de solvente usado e, portanto o tempo de evaporação. O de cura rápida (CR) utiliza nafta como solvente o de cura média (CM), querosene e o de cura lenta (CL), gasóleo (MAGALHÃES, 2004; LEITE, 2009).

- Emulsão Asfáltica

As emulsões asfálticas são dispersões de cimento asfáltico (CAP) em fase aquosa na presença de um agente emulsificante que pode ser aniónico ou catiônico. É amplamente utilizada devido a sua facilidade de aplicação especialmente em áreas difíceis de alcançar. Na emulsão asfáltica o fenômeno de separação entre o material betuminoso e a água é chamado de ruptura de emulsão.

- Asfalto Modificado

Por fim, chamamos de asfalto modificado quando adicionamos durante o processo de produção do asfalto um agente modificado de origem natural, sintética ou polimérica a fim de melhorar suas propriedades e agregar outras características.

4.4 AGENTES MODIFICADORES EM LIGANTES

Como dito anteriormente, a adição de um agente modificador em um ligante visa obter benefícios nas características mecânicas, químicas e reológicas. Os modificadores têm por finalidade aumentar a resistência do ligante frente à deformação permanente em altas temperaturas sem interferir nas propriedades em diferentes faixas de temperaturas (LEWANDOWSKI, 1994). Segundo a pesquisa rodoviária “Impactos da Qualidade do Asfalto sobre o Transporte Rodoviário” de 2019, a modificação de ligantes trazem benefícios que impactam diretamente a área financeira visto que se reduz a frequência das manutenções por conta do aumento da durabilidade do asfalto. Além disso, o asfalto pode melhorar seu desempenho com relação à fadiga ao se ajustar a viscosidade e elasticidade da mistura conforme as alterações da faixa de temperatura.

Com o aumento da frota de veículos automotores e o aumento da carga por eixo em veículos pesados, surge a necessidade de melhorar a qualidade mecânica e térmica das misturas asfálticas na pavimentação a fim de evitar defeitos estruturais obtendo um pavimento com revestimento asfáltico de maior resistência.

Os agentes modificadores, portanto, podem ser de origem natural ou sintética. Além disso, devem possuir características como facilidade de produção, baixo custo, resistência à degradação na temperatura de processamento da mistura, boa dispersão no ligante, aumento da resistência do ligante a deformação e ao aparecimento de trincas para serem viáveis a sua aplicação ao ligante (MAGALHÃES, 2004). Os agentes

modificadores que foram abordados nesse trabalho são o LCC (Líquido da Castanha do Caju), borra oleosa de petróleo e borracha de pneus inservíveis particulada.

4.5 LIQUIDO DA CASCA DE CASTANHA DO CAJU

O Líquido da Casca de Castanha do Caju (LCC) é extraído como subproduto do processamento da castanha de caju. As possibilidades de exploração do LCC são grandes e estratégicas para o Brasil devido a sua variedade de aplicações, por ser uma matéria-prima renovável, biodegradável e de baixo custo, podendo substituir o fenol petroquímico em muitas aplicações com resultados equivalentes ou superiores, tais como na síntese da resina fenólica (MOTHÉ et al., 2007).

As resinas fenólicas são oriundas da reação de condensação entre fenol e formol sendo classificadas em resina de um estágio (resol) e resina de dois estágios (novolac). As resinas fenólicas (sintetizadas a partir de fenol e formaldeído) se destacam das outras resinas pelo fato de apresentarem boa resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência ao impacto. Na síntese das resinas fenólicas, 68% dos custos de produção correspondem aos insumos-fenol e formaldeído. Sendo assim, a substituição do fenol por LCC, que possui baixo custo, reduziria consideravelmente os custos (MOTHÉ et al, 1996).

A utilização do LCC na composição da resina fenólica além do seu potencial fenólico disponível é importante por razões socioeconômicas já que o LCC é extraído da casca da castanha de caju e o aumento da sua produção dinamizaria a região Nordeste do Brasil. O caju é um dos agronegócios mais importante do Nordeste, podendo aumentar assim a oferta de empregos no campo e nas indústrias.

Outras vantagens do LCC são que possuem substâncias com ação larvicida, moluscicida, atividade antifúngica e antibacteriana. Estudos recentes avaliaram substâncias derivadas do LCC (ácido anacárdico e cardanol) quanto ao potencial de ação na morte de linhagens de células tumorais e por apresentam viabilidade para serem aplicadas no tratamento contra o câncer de mama e de boca (VASCONCELOS, 2008; LOPES et al., 2008).

4.6 BORRA DE PETRÓLEO

A indústria de petróleo, em decorrência de uma intensa atividade de exploração e

produção, é responsável por grande parte da geração de resíduos, os quais são considerados tóxicos e poluentes ao meio ambiente. Dentre estes, encontra-se a borra oleosa formada durante as etapas de produção, transporte e refino de petróleo (GUIMARÃES, A. K. V, 2007).

A borra de petróleo é um resíduo constituído de uma mistura de óleos, areia, pedra e água, gerada em tanques de separação água-óleo de refinarias de petróleo. Na maior bacia de exploração de petróleo brasileira, Bacia de Campos, responsável por cerca de 80% do petróleo produzido no país, são geradas cerca de 80 toneladas/mês de borra de petróleo e representa um material de difícil tratamento e disposição final para a indústria do petróleo. Atualmente, tecnologias estão sendo desenvolvidas e representam alternativas viáveis para o tratamento e aproveitamento desse material. O uso deste material como aditivo ao cimento asfáltico de petróleo torna-se interessante nesse cenário.

4.7 BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL

O pneu inservível é aquele que teve sua vida útil finalizada. A possibilidade de incorporação do pneu moído no ligante asfáltico para pavimento tornou-se uma alternativa de baixo custo com apelo ambiental visto que o descarte de pneus diretamente no meio ambiente causa danos e degradação ambiental. O uso do pneu inservível como agente modificador previne tais danos e dão uma destinação adequada a esse tipo de resíduo de acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) no 416, de 30 de setembro de 2009, disciplinou o gerenciamento dos pneus inservíveis.

O pó de pneu pode ser aplicado na composição do ligante asfáltico atribuindo maior elasticidade e durabilidade ao pavimento.

4.8 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A pavimentação visa construir uma superfície nivelada, resistente e transitável. Essa superfície é projetada para suportar o tráfego de veículos e pedestres, proporcionar conforto e segurança aos usuários e contribuir para o desenvolvimento econômico do país facilitando o transporte de mercadorias.

Existem 3 tipos de pavimentos e são eles: rígidos, semirrígidos e flexíveis. O pavimento asfáltico é caracterizado como pavimento flexível pois apresenta uma deformação elástica significativa capaz de suportar as cargas do tráfego de maneira eficaz. A Figura 5 exibe um corte transversão do pavimento asfáltico para maior visualização das camadas presentes.

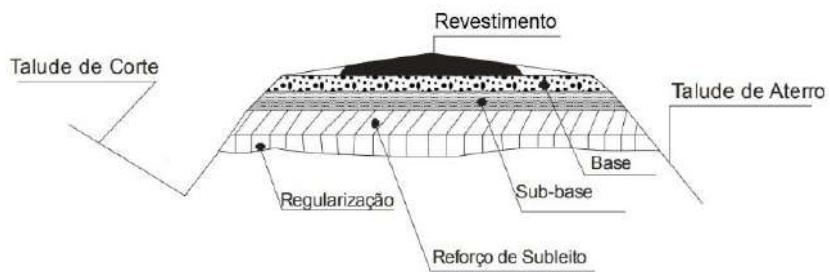


Figura 5 – Camadas do pavimento asfáltico

Fonte: Guia da Engenharia, 2019

4.8.1 Mistura Asfáltica

Denomina-se mistura asfáltica ou revestimento asfáltico a combinação de asfalto, agregados e aditivos. Este material composto é amplamente utilizado na pavimentação das estradas e rodovias. A mistura asfáltica é feita em usinas estacionárias e é aplicada sobre a superfície da estrada que após a compactação forma uma camada estável, durável e resistente às deformações causadas pela passagem repetida do tráfego.

De acordo com a necessidade específica de aplicação no revestimento do pavimento, a composição da mistura asfáltica pode variar, visto que elas se diferenciam desde o método de produção aos tipos de mistura a quente e a frio. As misturas asfálticas a quente são produzidas e aplicadas à altas temperaturas e é o tipo mais utilizado e comum. Já a mistura asfáltica a frio não requer aquecimento durante a produção ou aplicação e por isso é amplamente utilizada para serviços de reparos de emergência e manutenção de pavimentos.

No Brasil, a mistura asfáltica mais empregada é o concreto asfáltico também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Ele é fabricado em usina e formado pela união de agregados graúdos, agregados miúdos, material de enchimento e cimento asfáltico.

4.8.1.1 Agregados

Agregado refere-se a um material granular de composição mineral, tais como: areia, pedregulho, conchas e pedra britada, que são misturados com o asfalto para formar a mistura utilizada na pavimentação de rodovias. Os agregados representam em torno de 95% em peso e 70 a 85% em volume de toda a mistura asfáltica (IBP, 1999) e contribuem para o desempenho da mistura. Eles podem ser classificados de acordo com sua natureza, tamanho e graduação. Os agregados fornecem resistência à compressão e suporte de carga para a pavimentação asfáltica, promovem boa adesão ao asfalto, melhoram a estabilidade estrutural da pavimentação e desempenham um papel crucial na drenagem adequada da água da superfície da pavimentação.

4.9 PANORAMAS DAS ESTRADAS BRASILEIRAS

O Brasil ocupa o primeiro lugar no ranking de países que utilizam a malha rodoviária para transporte de cargas e passageiros. Segundo dados do Banco Mundial, 61% do transporte no país é feito por rodovias - contra 51% do Japão, 43% dos EUA, 35% da China, 27% da Austrália e 19% do Canadá. Apesar disso, a figura 6 ilustra que em países como China e Estados Unidos que tem dimensões semelhantes à nossa, a densidade de rodovias pavimentadas para cada mil quilômetros quadrados de território é cerca de 16 vezes superior à brasileira.

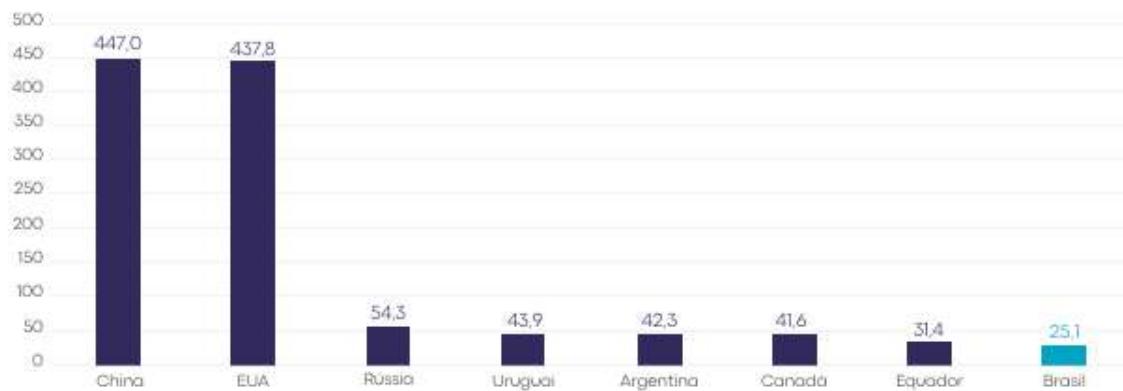


Figura 6 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/mil km²)

Fonte: Elaboração CNT, com dados de The CIA World Factbook (2023), Ministério da Infraestrutura (2020) e IBGE (2021)

Dados de 2021 da Confederação Nacional de Transportes (CNT), ilustrados na Figura 7 mostram que dos 1,72 milhões de quilômetros de estradas no Brasil, apenas 12,4% são pavimentadas e 9,1% são vias planejadas que ainda não saíram do papel. Além disso, dentre as rodovias pavimentadas, foi visto que 66,0% das rodovias avaliadas apresentaram algum tipo de problema geral, 55,5% dos trechos avaliados têm problemas no pavimento, 60,7% dos trechos apresentam deficiência na sinalização e 64,0% das rodovias pavimentadas que foram avaliadas têm falhas na geometria.

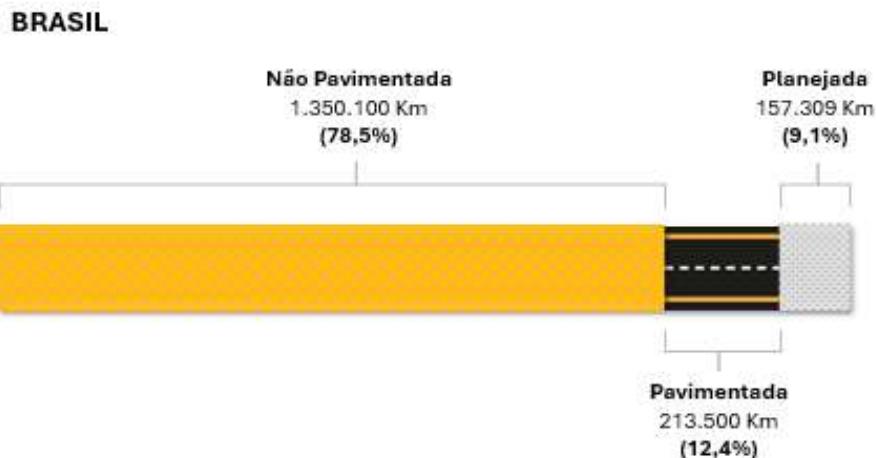


Figura 7 – Malha rodoviária do Brasil em 2021.

Fonte: Elaboração própria. Anuário CNT do Transporte, 2021.

Segundo a 26^a edição da Pesquisa CNT de Rodovias, divulgada pela CNT e pelo SEST SENAT em novembro de 2023, 67,5% dos 112 mil quilômetros de rodovias avaliadas pavimentadas no Brasil foram classificadas como regular, ruim ou péssima e apenas 32,5% foram classificadas como ótimas ou boas. Além de aumentar o custo operacional do transporte e diminuir a segurança de cargas e passageiros, uma rodovia com péssimas condições de pavimentação tem impacto direto na economia do país devido ao desempenho no transporte rodoviário.

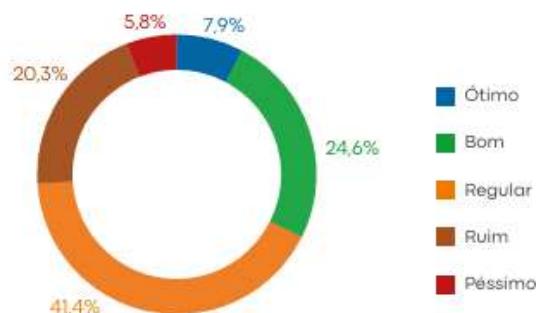


Figura 8 – Classificação do estado das rodovias brasileiras

Fonte: CNT, 2022

A Figura 9 apresenta uma avaliação geral das rodovias feita pelo CNT em 2023 levando em conta tanto o pavimento quanto outros problemas como sinalização e geometria da via, apresentam percentuais desfavoráveis..

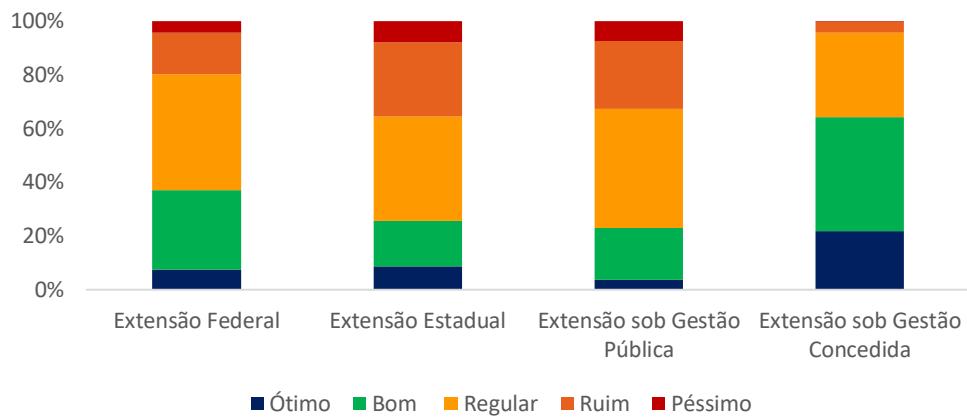


Figura 9 – Classificação Geral das Rodovias Brasileiras

Fonte: Elaboração própria. Anuário CNT do Transporte, 2022

Dentre os diversos prejuízos causados pelas más condições das rodovias estão o aumento no tempo de viagem gerando atrasos e congestionamentos significativos, aumento nos custos operacionais das empresas de transporte de carga e passageiro devido ao elevado consumo de combustível e necessidade de manutenção frequente nos veículos, prejuízo no turismo, impactos ambientais etc. Além disso, é importante também ressaltar que uma das principais consequências das péssimas condições das rodovias brasileiras é o aumento no número de acidentes. Em 2023, ocorreram 67.620 acidentes de trânsitos no Brasil, sendo 8% deles acidentes fatais. A Figura 10 mostra o numero de acidentes rodoviários ao longo dos anos e o custo em bilhões de reais causados por eles.



Figura 10 – Evolução do número de acidentes rodoviários registrados pela PRF e do custo dos acidentes rodoviários no Brasil (R\$ bilhões*) – 2016 a 2023

Fonte: Elaboração CNT, com dados do Ipea, Denatran e ANTP (2006) e Ipea e PRF (2015), com atualização da base de acidentes da PRF (2021 e 2022)

Em resumo, a atual situação da infraestrutura rodoviária brasileira gera uma série de prejuízos econômicos, sociais e ambientais que afetam negativamente a qualidade de vida das pessoas e desenvolvimento do país. Portanto propor possíveis soluções adequadas para melhorias visam mitigar esses impactos e promover o crescimento econômico visto que as estradas possibilitaram a expansão do comércio e da agricultura, permitindo a circulação de produtos e acesso a novos mercados.

Segundo o estudo feito em 2021 pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) intitulado “Investimentos públicos e as rodovias federais no Brasil: evolução e perspectivas” para elevar a qualidade das rodovias federais públicas são necessários investimentos anuais na ordem de R\$ 12 bilhões em obras de manutenção, duplicação e construção de trechos, enquanto o valor efetivamente executado anualmente esteve em média cerca da metade do valor necessário.



Figura 11 – Investimento Necessário vs. Realizado, 2019-2022, em R\$ bilhões

Fonte: Elaboração Portal da Indústria, 2022. DNIT e Portal SIGA Brasil.

4.10 PRINCIPAIS DEFEITOS DO PAVIMENTO

Em 2023 o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do Ministério dos Transportes) lançou a norma 005/2003 intitulada Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos que define os termos técnicos empregados para caracterizar os defeitos nos pavimentos rodoviários.

A seguir serão descritos segundo a norma DNIT 005/2003 os defeitos de pavimentos:

- Fenda: qualquer descontinuidade na superfície do pavimento que conduza a aberturas de menor ou maior porte podendo ser de diversas formas.
- Fissura: fendas capilares no revestimento asfáltico com extensão inferior a 30cm visíveis a olho nu a pelo menos 1,50 metros de distância. Não causam problemas funcionais ou estruturais na rodovia. Elas são em sua maioria causada pela má dosagem do asfalto, ou seja, excesso de material no revestimento; compactação excessiva ou em momento inadequado.
- Trincas: fenda facilmente visível a olho nu com abertura superior ao da fissura. Elas podem se apresentar de diversas formas: trinca isolada (transversal, longitudinal ou de retração) ou interligada (“jacaré” ou “bloco”).

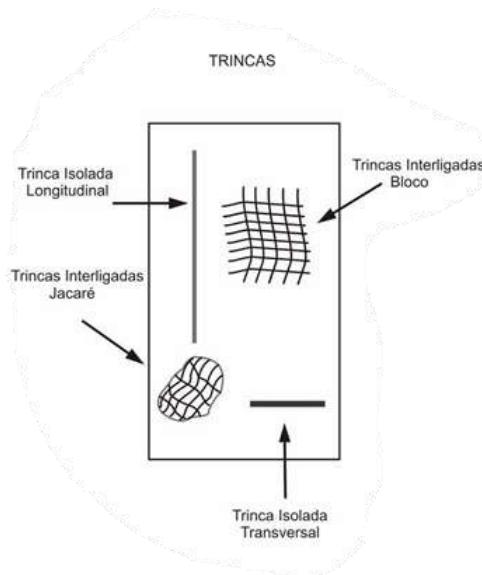


Figura 12 – Representação esquemática dos defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos

Fonte: NORMA DNIT 005/2003 – Anexo B

- Trinca transversal: trinca isolada em direção perpendicular ao eixo da via. Ela é denominada trinca transversal curta quando sua extensão é de até 100 cm. Quando a extensão é superior a 100 cm, denomina-se trinca transversal longa. É um defeito funcional e estrutural, ou seja, causa risco para o tráfego de veículos.

- Trinca Longitudinal: trinca isolada em direção predominantemente paralela ao eixo da via. É denominada trinca longitudinal curta, quando sua extensão é de até 100 cm, caso seja superior a 100 cm, denomina-se trinca longitudinal longa. Tais trincas causam irregularidades e enfraquecem o revestimento do pavimento.
- Trinca de Retração: trinca ocasionada devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento.
- Trinca “couro de jacaré”: trincas interligadas sem direção predominante com a aparência de couro de jacaré. São um defeito estrutural e são resultante da fadiga ocasionada pela ação constante do tráfego rodoviário.
- Trinca tipo bloco: Trincas interligadas formando blocos retangulares com lados bem definidos. Trata-se de um defeito estrutural e funcional no pavimento.
- Afundamento: deformação do pavimento caracterizada por uma superfície em depressão. Podem se apresentar como afundamento plástico ou afundamento de consolidação.

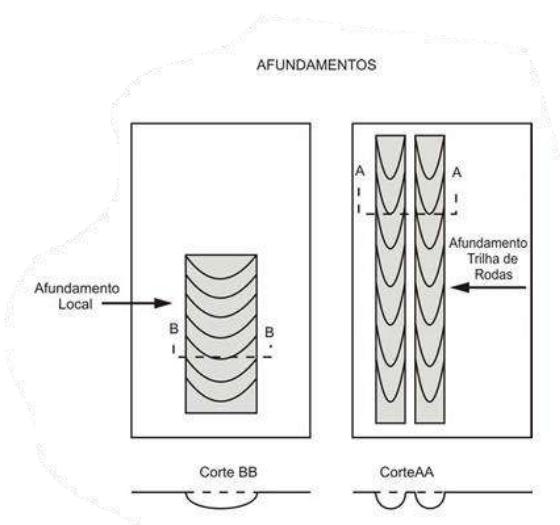


Figura 13 – Representação esquemática dos defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

Fonte: NORMA DNIT 005/2003 – Anexo B

- Afundamento plástico: deformação permanente causada pela depressão da superfície do pavimento acompanhada de soleamento. Denomina-se afundamento plástico local quando a extensão é de até 6 m e para extensões maiores que 6 m se denomina afundamento plástico de trilha de roda.
- Afundamento de consolidação: é também uma deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, entretanto não está acompanhado de soleamento. Quando a extensão é de até 6 m, é denominado afundamento de consolidação local. Já para extensões maiores que 6 m se denomina afundamento de consolidação de trilha de roda.
- Ondulação ou corrugação: deformação caracterizado por ondulações ou corrugações (que são enrugamentos) transversais na superfície do pavimento.
- Escorregamento: deslocamento do revestimento em relação à camada adjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua.
- Exsudação: excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento.
- Desgaste: efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, causando aspereza superficial do revestimento.
- Panela ou buraco: é uma cavidade no pavimento que pode ser resultado de diversas causas como desgaste, desplacamento, infiltração de água, colapso da base, etc. Além disso pode ser de tamanhos variados no revestimento do pavimento.
- Remendo: panela preenchida com uma ou mais camadas de pavimentação.

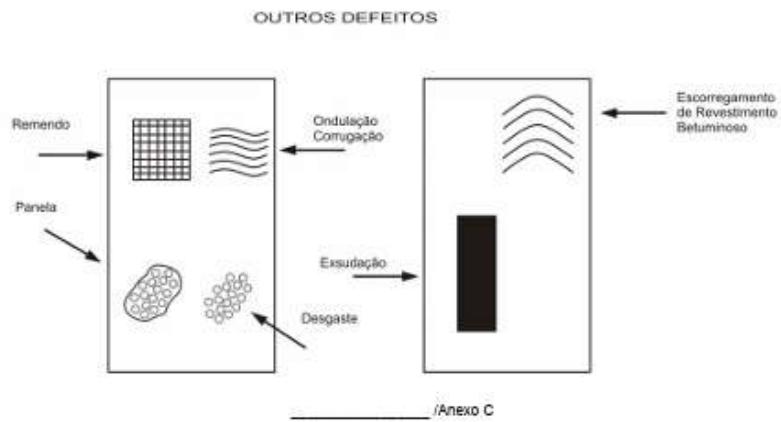


Figura 14 – Representação esquemática dos defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

Fonte: NORMA DNIT 005/2003 – Anexo B

Quadro 1 - Quadro de resumo dos defeitos na pavimentação

FENDAS				Codificação	Classificação das fendas		
FISSURAS				FI			
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas interligadas	“Jacaré”	Sem erosão acentuadas nas bordas das trincas	J		FC-2	
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE			FC-3
	Trincas isoladas	Devido à retração térmicas ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas interligadas	“Blocos”	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB		FC-2	
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE			FC-3

OUTROS DEFEITOS				CODIFICAÇÃO	
Afundamento	Plástico	Local	Devido à influência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ALP	
		Da trilha	Devido à influência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ATP	
	De consolidação	Local	Devido a consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC	
		Da trilha	Devido a consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ATC	
Ondulação/corrugação – ondulação transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base				O	
Escorregamento (do revestimento betuminoso)				E	
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento				EX	
Desgaste acentuado na superfície do revestimento				D	
Panelas ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores				P	
Remendos	Remendo superficial			RS	
	Remendo profundo			RP	

Fonte: NORMA DNIT 005/2003 – Anexo A

Legenda da classe das trincas isoladas:

- FC-1: são trincas superiores com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm.
- FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas.
- FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0mm e com erosão nas bordas.

As classes das trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas.

4.11 EMPRESAS BRASILEIRAS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS

E RODOVIAS

As estradas, e rodovias, nos termos do artigo 66, I do Código Civil são “bens públicos de uso comum de todos” e segundo a Constituição Federal Brasileira de 1988 é dever de toda a prefeitura municipal prover uma pavimentação de qualidade para as vias urbanas, realizar a manutenção, fazer a drenagem para a água da chuva e a sinalização das ruas, investimentos estes que refletem diretamente na economia, saúde e bem-estar da população.

No Brasil, o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) é o órgão responsável pela gestão, execução e manutenção das vias navegáveis, ferrovias e

rodovias federais, além de aplicar multas por infrações no código de trânsito. Além do DNIT, outros órgãos também são responsáveis pela infraestrutura de estradas e rodovias no Brasil, dentre eles estão: DER (Departamento de Estradas de Rodagem) e ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). O DER é responsável pela construção e manutenção das rodovias estaduais, cada estado possui o seu departamento. A ANTT é um órgão que regulamenta e supervisiona a infraestrutura de transportes terrestres.

Todos esses órgãos trabalham em conjunto para garantir uma infraestrutura segura e eficiente de transportes.

4.12 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO EM LIGANTES ASFÁLTICOS

4.12.1 Análise Térmica

Conceitua-se Análise Térmica como um conjunto de técnicas que permitem medir as mudanças de uma propriedade física ou química de uma substância ou material em função da temperatura e/ou tempo, enquanto essa substância é submetida a um programa controlado de temperatura [MOTHÉ & AZEVEDO, 2009].

Estas técnicas permitem obter informações com respeito à: variação de massa, estabilidade térmica; umidade; pureza, ponto de fusão, ponto de ebulição, calores de transição, calores específicos, diagramas de fase, cinética da reação etc. Dentre as mais diversas áreas de aplicação, além da engenharia química a análise térmica pode ser usada para estudos nas áreas de ciência dos materiais, farmacologia, engenharia civil, alimentos, geologia, entre outras.

Uma das principais vantagens da análise térmica é o uso de uma pequena quantidade de amostra que não necessita ser previamente preparada para os seus ensaios, apesar de ser uma técnica destrutiva. Além disso em um único gráfico é possível obter uma variedade de resultados que permitem uma melhor compreensão dos fenômenos físicos e químicos que podem ocorrer desde a produção do ligante até a sua aplicação nas vias.

Dentre as principais técnicas destam-se: Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

4.12.1.1 Termogravimetria (TG)

A análise termogravimétrica consiste no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo ou da temperatura. Este processo mede a variação de massa de uma substância ou material em função do tempo e/ou temperatura. A termogravimetria analisa principalmente a estabilidade térmica da amostra visto estuda a capacidade da substância em manter suas propriedades, durante o processamento térmico, o mais próximo possível de suas características iniciais. A figura 15 mostra a representação de uma curva de termogravimetria.

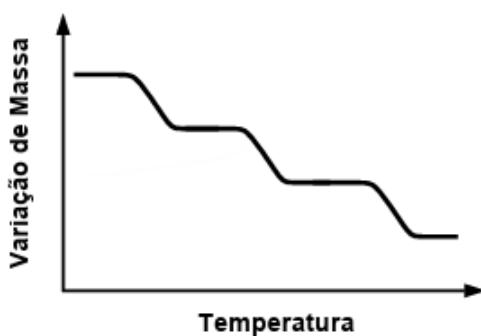


Figura 15 – Representação de uma curva termogravimétrica.

Fonte: MOTHÉ & AZEVEDO, 2002

4.12.1.2 Termogravimetria Derivada (DTG)

A Termogravimetria Derivada calcula a derivada da curva de massa em relação à temperatura que é a curva de Termogravimetria (TG), ou seja, a curva DTG fornece informações sobre a taxa na qual a massa da amostra está mudando em relação à temperatura.

Em termos gráficos a DTG permite uma melhor visualização das curvas de TG, sendo útil para identificar eventos térmicos complexos, como múltiplas etapas de decomposição ou reações químicas que ocorrem em diferentes faixas de temperatura. Durante o aquecimento da amostra, a representação gráfica do DTG geralmente mostra picos que correspondem aos diferentes eventos térmicos ou reações da amostra ajudando na compreensão mais detalhada. Cada pico é proporcional a massa perdida pela amostra em cada estágio e fornecem a temperatura em que a perda de massa é máxima. Além disso, também é possível visualizar os estágios de perda de massa que eventualmente

possam estar sobrepostos na curva de TG. A figura 16 compara as curvas de termogravimetria (TG) e a termogravimetria derivada (DTG).

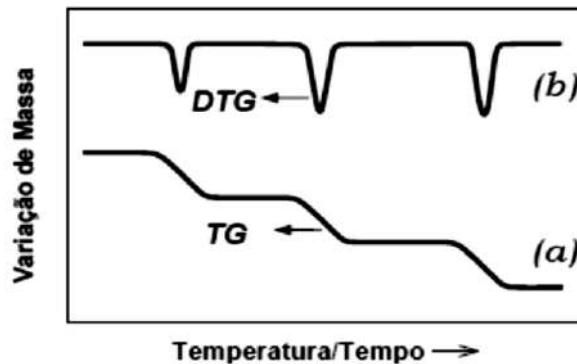


Figura 16 – Comparação das curvas de TG (a) e DTG (b)

Fonte: MOTHÉ & AZEVEDO, 2009.

4.12.1.3 Análise Térmica Diferencial (DTA)

A análise térmica diferencial (DTA) é uma técnica na qual a diferença na temperatura entre a amostra e um material de referência (substância inerte) é medida em função da temperatura, enquanto a substância e o material de referência ficam sujeitos a um gradiente de temperatura.

As mudanças de temperatura que ocorrem na amostras provocadas pelas transições ou reações entálpicas endotérmicas ou exotérmicas. Na DTA, a área do pico é proporcional à mudança de calor envolvido. A figura 17 apresenta uma curva característica da análise termica diferencial.

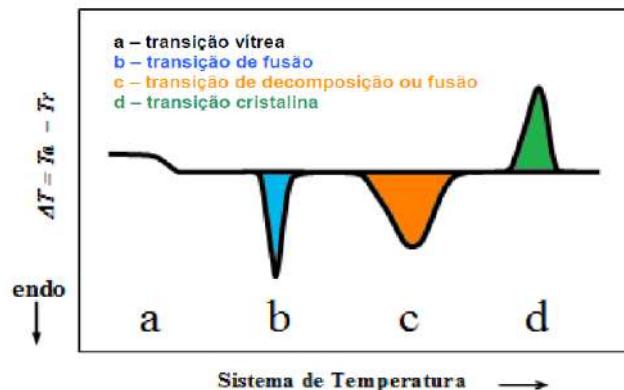


Figura 17 – Curva típica obtida pela técnica DTA

Fonte: MOTHÉ & AZEVEDO (2002) apud MOTHÉ (2009)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

As amostras estudadas neste trabalho estão descritos abaixo:

- Cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70)
- Mistura de 15% m/m de borracha de pneus com 85 % m/m borra de petróleo (M1)
- CAP 50/70 + 10% m/m da mistura M1 (CM1-10)
- CAP 50/70 + 20% m/m da mistura M1 (CM1-20)
- CAP 50/70 + 10% m/m da Mistura M1 + 1% m/m LCC (CM1L-10)
- CAP 50/70 + 20% m/m da Mistura M1 + 1% m/m LCC (CM1L-20)

Todas as amostras foram fornecidas pelo CENPES/PETROBRAS.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Preparação e Obtenção

Para a obtenção da mistura de borracha de pneu e borra de petróleo (M1), a borra oleosa foi previamente pesada e aquecida a uma temperatura de $120^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para completo amolecimento. Em seguida, borracha de pneus inservíveis, previamente classificada, através de peneira de seleção de numeração 32 mesh, foi adicionada à borra oleosa sob agitação mecânica de 100 ± 2 rpm por 40 ± 5 minutos para garantir completa homogeneização.

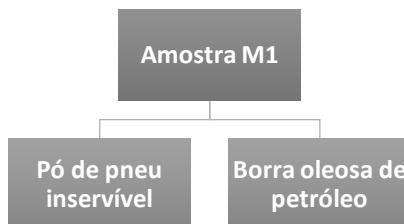


Figura 18 – Diagrama de blocos para amostra M1

Fonte: Elaboração própria



Figura 19 – Borra oleosa de petróleo



Figura 20 – Borracha de pneus inservíveis particulada

Em seguida, para a obtenção das amostras de CAP 50/70 modificado, foi adicionado 10% em massa da mistura M1 (borra de petróleo + pó de borracha de pneu inservível) ao CAP 50/70 puro obtendo a amostra que denominamos CM1-10. Em outra amostra foi adicionado 20% da mistura M1 e chamamos de CM1-20. Essa mistura foi feita sob agitação mecânica de 100 ± 2 rpm, por 90 minutos para a completa homogeneização, na temperatura de $160 \pm 5^\circ\text{C}$.

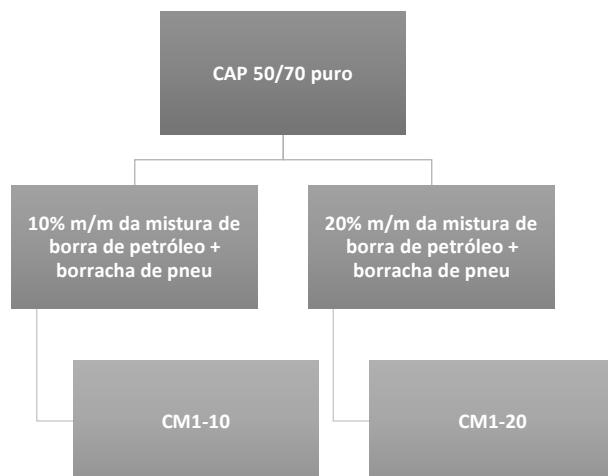


Figura 21 – Diagrama de blocos para as amostras CM1-10 e CM1-20

Fonte: Elaboração própria

Por último, para obter as amostras de ligantes modificados com LCC, foi adicionado 1% de LCC à amostra de CAP 50/70 modificada com 10% da mistura M1 que se refere à borra de petróleo + borracha de pneu, gerando a amostra CM1L-10 e em seguida adicionado 1% de LCC à amostra de CAP 50/70 modificada com 20% da mistura de borra de petróleo e pó de pneu gerando a amostra CM1L-20.

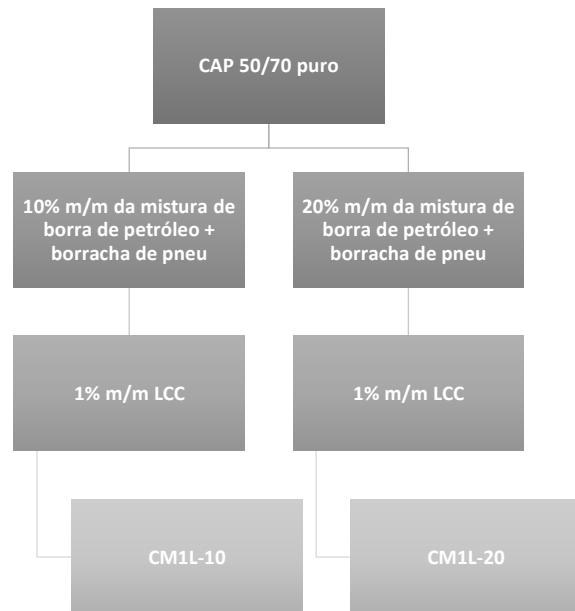


Figura 22 – Diagrama de blocos para as amostras CM1L-10 e CM1L-20

Fonte: Elaboração própria

5.2.2 Caracterização das amostras

Para avaliar a estabilidade, decomposição térmica e eficiência de todas as amostras: CAP 50/70, M1, CM1-10, CM1-20, CM1L-10 e CM1L-20 foi aplicada a análise térmica pelas técnicas de termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e análise térmica diferencial (DTA). Foram analisados cerca de 10mg de cada amostra utilizando um analisador termogravimétrico, modelo SDT Q600, da marca TA Instruments. A variação de temperatura foi de 25 até 1000 °C, com uma razão de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 mL/min. A figura 23 ilustra o analisador termogravimétrico utilizado para a caracterização das amostras.



Figura 23 - Analisador Termogravimétrico da marca TA Instruments, modelo SDT Q600

Fonte: Artisan Technology Group

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas por TG/DTG e DTA as seguintes amostras; CAP 50/70, M1, CM1-10, CM1-20, CM1L-10 e CM1L-20.

A Figura 24 apresenta as curvas de TG/DTG e DTA do CAP 50/70. A curva de termogravimetria é representada pela curva verde, a curva de termogravimetria diferencial é representada pela cor azul e a curva de análise térmica diferencial pela cor vermelha.

A curva de TG da apresentou um estágio de decomposição. A curva de DTG confirma o único estágio de decomposição exibido na curva de termogravimetria. É possível observar que a decomposição máxima da amostra ocorre na temperatura de 460°C. Na curva DTA observou-se três eventos endotérmicos, o 1º em torno de 80°C sugerindo a presença de hidrocarbonetos de baixa massa molar, o 2º em torno de 460°C referente aos hidrocarbonetos de alto peso molecular presentes no ligante, e o 3º em torno de 920°C referindo-se à presença de inorgânicos na amostra.

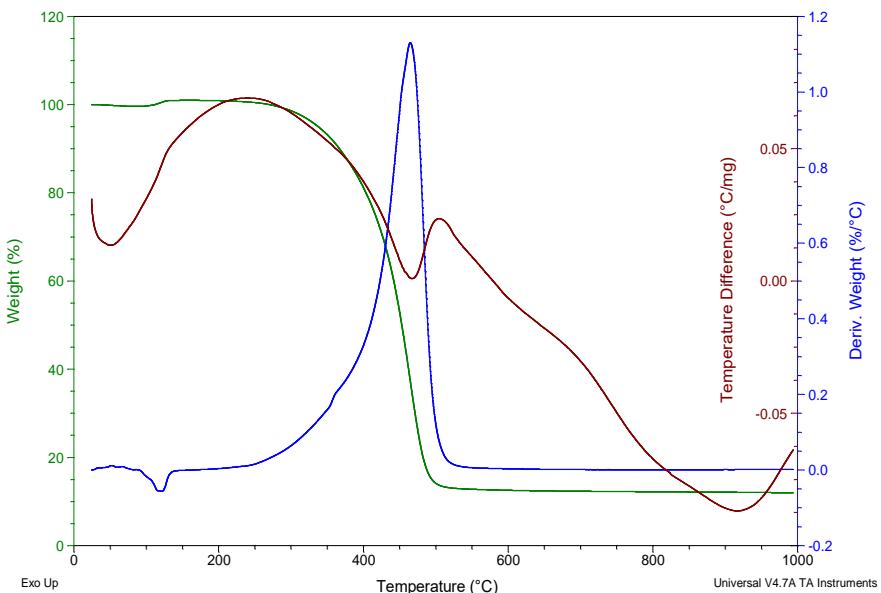


Figura 24 – Curvas de TG/DTG e DTA para CAP 50/70

A Figura 25 apresenta as curvas de TG/DTG e DTA da amostra M1 que se refere à mistura de borra oleosa de petróleo com a borracha de pneu inservível. A curva de terogravimetria (TG) inicialmente sugere que existe apenas um único estágio de decomposição na amostra. Na curva DTG pode-se observar a presença de um ombro em torno de 250°C e dois picos de decomposição em 385°C e 460°C referentes à decomposição da borracha. Na curva DTA, observa-se a ocorrência de eventos endotérmicos referentes à fusão de frações parafínicas advindas da borra oleosa na temperatura de 72°C. E em torno de 460°C e 580°C observa-se eventos de decomposição da borracha.

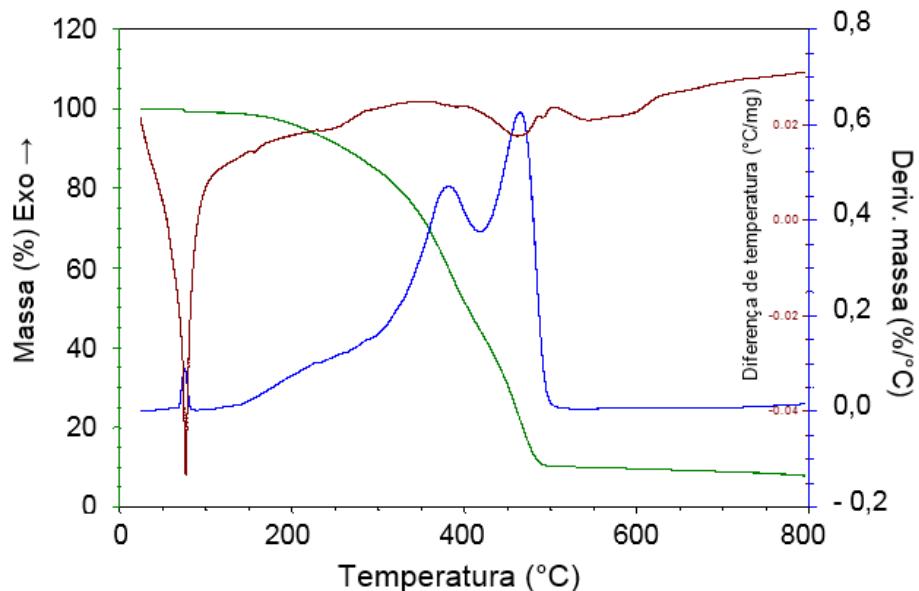


Figura 25 – Curvas de TG/DTG e DTA para mistura de borra de petróleo + borracha de pneu inservível

A Figura 26 apresenta a sobreposição das curvas de Termogravimetria (TG) das amostras de CAP 50/70, M1, CM1-10, CM1-20, CM1L-10 e CM1L-20. Desta forma é possível comparar, diretamente, as mudanças observadas na estabilidade térmica da amostra do ligante puro com as amostras de ligantes modificadas. As análises revelaram um comportamento semelhante para as amostras, onde todas apresentaram um único estágio de perda de massa no intervalo de temperatura de 200 a 500°C, compreendendo a decomposição dos hidrocarbonetos no ligantes asfáltico. A curva M1 que se refere à mistura de borracha de pneu + borra oleosa de petróleo presentou a menor estabilidade frente às outras amostras, e a curva que corresponde ao CAP 50/70 puro apresentou a maior estabilidade delas. É possível observar que as curvas das amostras CM1L-10 e CM1L-20 perdem massa a partir de 240°C. A amostra de CAP 50/70 modificada com 10% da mistura de borra de petróleo + borracha de pneu inservível (CM1-10) foi a amostra que se aproximou mais da estabilidade térmica do CAP puro.

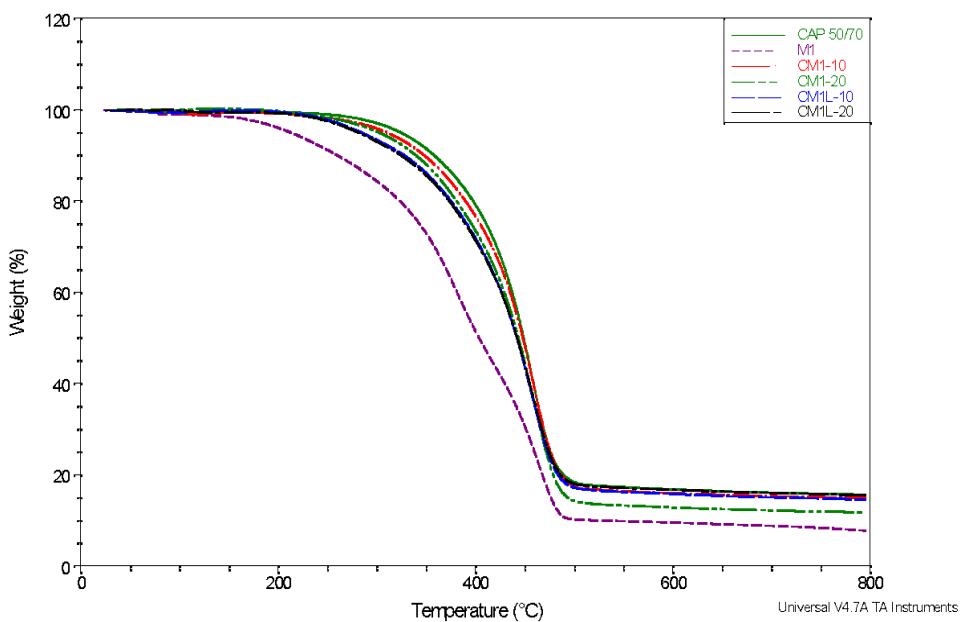


Figura 26 – Curvas de Termogravimetria (TG) dos ligantes modificados

A Figura 27 apresenta a sobreposição das curvas de termogravimetria diferencial (DTG) de todas as amostras para avaliação comparativa entre elas. Com exceção da curva da amostra M1 que representa a mistura de borra de petróleo + borracha, é possível observar que todas as amostras apresentaram um comportamento semelhante com um pico principal de decomposição na temperatura de 460°C referente à decomposição do ligante asfáltico. Pode-se observar também que nas amostras modificadas com Líquido da Casca de Castanha de Caju (LCC) há a presença de ombro mais evidentes em torno de 220°C à 320°C. A presença desse ombro mais evidente corresponde à decomposição de componentes mais voláteis de menor estabilidade térmica presentes no Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC).

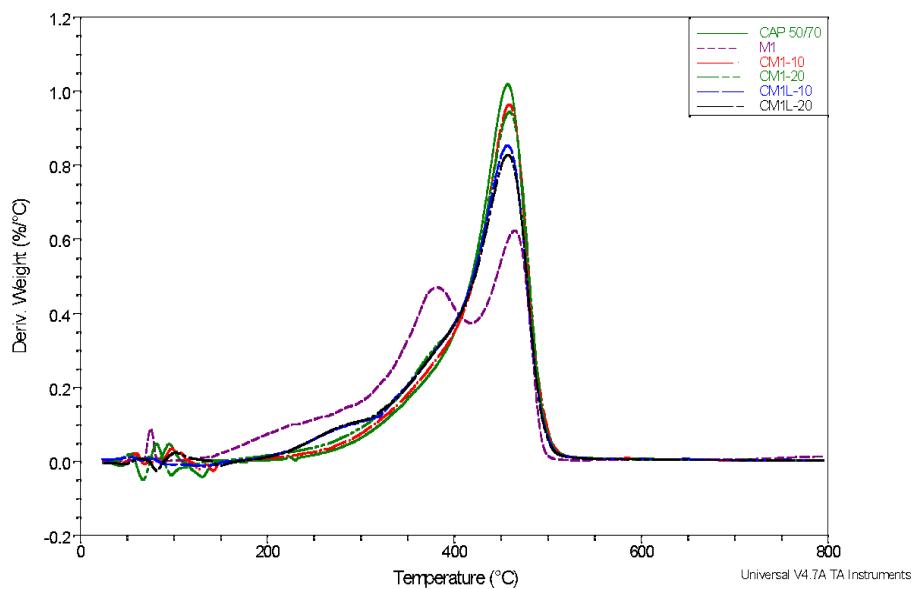


Figura 27 – Curvas de Termogravimetria Derivada (DTG) dos ligantes modificados.

A Figura 28 apresenta a sobreposição das curvas de análise térmica diferencial (DTA) de todas as amostras analisadas para observarmos de forma comparativa os eventos térmicos presentes em todas elas. A presença do evento de fusão é extremamente evidente na amostra M1 que corresponde à mistura da borra de petróleo + borracha de pneu em torno de 72°C. Este evento de fusão está presente também nas demais amostras de ligantes modificados que contém a mistura, ou seja, nas curvas de CM1-10, CM1-20, CM1L-10 e CM1L-20. Na curva do CAP 50/70 pode-se observar a ocorrência de um evento endotérmico referente a decomposição dos hidrocarbonetos de baixa massa molar presentes no ligante.

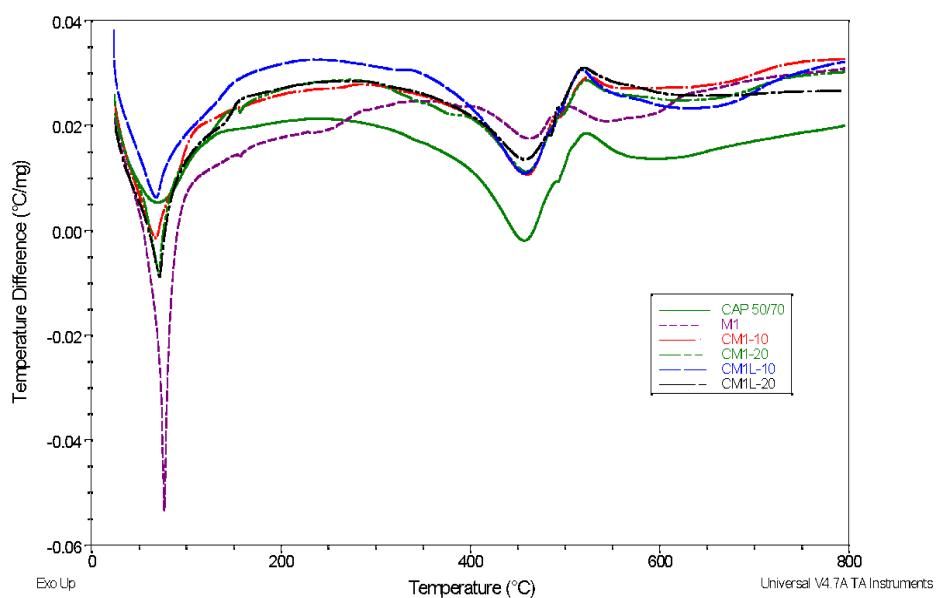


Figura 28 – Curvas de Análise Térmica Diferencial (DTA) dos ligantes modificados.

7 CONCLUSÕES

- Todas as amostras de CAP 50/70 modificados apresentaram um comportamento semelhante com um estágio de decomposição e com perda de massa entre 80 e 90% referente à decomposição de hidrocarbonetos presentes no ligante asfáltico.
- Os resultados das análises (TG/DTG e DTA) da mistura M1 (borra oleosa de petróleo + borracha de pneu inservível) mostram a ocorrência de eventos endotérmicos referentes à fusão de frações parafinicas advindas da borra oleosa na temperatura de 72°C. E em torno de 460 e 580°C eventos de decomposição dos constituintes da borracha.
- As curvas de DTA das amostras exibiram principalmente eventos endotérmicos referentes à decomposição de hidrocarbonetos de alto peso molecular.
- Nesse estudo concluiu-se que dentre todas as amostras testadas, a amostra modificada com 10% da mistura de borracha de pneu inservível com borra de petróleo (CM1-10) se aproxima mais do perfil térmico da amostra original de ligante asfáltico.
- A presença de ombro mais evidente na curva DTG das amostras contendo LCC corresponde à decomposição de componentes mais voláteis de menor estabilidade térmica presentes no Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC).
- A curva de DTG da amostra M1 apresenta dois ombros que correspondem à decomposição dos dois agentes modificadores presentes na amostra.
- O presente trabalho propõe uma alternativa viável e sustentável na incorporação de rejeitos proveniente das indústrias de petróleo e petroquímica, além de minimiza a poluição dos solos e dos corpos d'água.
- A análise térmica se mostrou uma técnica eficiente na confirmação da incorporação da mistura de rejeitos (borracha de pneus inservíveis e borra de petróleo) e do Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) no ligante asfáltico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP divulga dados nacionais consolidados do setor regulado no ano de 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-divulga-dados-nacionais-consolidados-do-setor-regulado-no-ano-de-2022. Acesso em: 11 abr. 2024

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiro. PETROBRAS: Abeda, 2010.

CANTEIRO DE ENGENHARIA. Defeitos em Pavimentos. Disponível em: <https://canteirodeengenharia.com.br/2019/07/03/defeitos-em-pavimentos/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

CAVALCANTI, L.S., Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas, Dissertação de mestrado – UFRJ/COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CNT. Painel de Pesquisa de Rodovias. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/painel>. Acesso em: 13 abr. 2024.

CNT. Pesquisa CNT de Rodovias. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

CNT - Conheça os principais defeitos do pavimento. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/conheca-principais-defeitos-pavimento>. Acesso em: 13 abr. 2024.

CNT - Transporte Rodoviário - Impactos da Qualidade do Asfalto sobre o Transporte Rodoviário. Disponível em: <https://cnt.org.br/impactos-qualidade-asfalto-transporte-rodoviario>. Acesso em: 10 abr. 2024

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

DNIT. **Terminologia** - **DNIT-005/2003/TER.** Disponível em:
https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipl/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em: 13 abr. 2024.

GUIMARÃES, Adriana Karla Virgolino. **Extração do óleo e caracterização dos resíduos da borra de petróleo para fins de reuso**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

IBP – INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. Rio de Janeiro: IBP – Comissão de Asfalto, 1999.

IBP – **Instituto Brasileiro de Petróleo** - <http://ibp.org.br>, acessado em 25/04/2024.

LEITE, L.F.M. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Tese de Doutorado - Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L.F.M., **Estudos reológicos em cimentos asfálticos**, Dissertação de mestrado - COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

LESUEUR, D. La. **Rhéologie des Bitumes: Principes et Modification**. Rhéologie, vol.2, 1-30, 2002.

LESUEUR, D. **The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification**. Advances in Colloid and Interface Science, vol.145, p. 42-82, 2009.

LEWANDOWSKI, L. H. **Polymer Modification of Paving Asphalt Binders**. Rubber Chemistry and Technology. vol. 67, p. 447-480, 1994.

MACHADO, D. M. C. Avaliação de Normas de Identificação de Defeitos para fins de Gerência de Pavimentos Flexíveis – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos/SP, 2013.

MAGALHÃES, S.T. Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2004).

MELHORES RODOVIAS. Uso de asfalto reciclado pela Arteris pode reduzir em até 50% as emissões de CO2 em comparação ao material convencional. Disponível em: <https://melhoresrodovias.org.br/conteudos-e-noticias/uso-de-asfalto-reciclado-pela-arteris-pode-reduzir-em-ate-50-as-emissoes-de-co2-em-comparacao-ao-material-convencional/>. Acesso em: 14 de abr. de 2024.

MOTHÉ M. G. Estudo do Comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica, dissertação de Mestrado, EQ/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Orientação: MOTHÉ, C. G E LEITE, L. F. M.

MOTHÉ, C.G, e AZEVEDO, A.D. Análise Térmica de Materiais. Editora: Artiliber, São Paulo – SP, p325, 2009.

MOTHÉ, M.G.; LEITE, L.M.; MOTHÉ, C.G.; “Thermal Characterization of Asphalt Mixtures by TG/DTG, DTA and FTIR”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, ISSN: 1388-6150, vol. 93, pg. 105-109, 2008.

MOTHÉ, M.G; Leite, L.M.; MOTHÉ, C.G.; “Kinetic Parameters of Different Asphalt Binders by Thermal Analysis”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, DOI 10.1007/s10973-011-1386-z, março de 2011.

PETROBRAS, Cimentos asfálticos de petróleo – CAPs, <http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap>. Acesso em: 15/10/2014.

PINTO, S. **Estudo do comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PIZZORNO, B.S. **Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo,** Dissertação de Mestrado, – COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PORTAL DA INDUSTRIA. Investimentos Públlicos e as Rodovias Federais no Brasil. Disponível em:
https://static.portaldaindustria.com.br/portaldaindustria/noticias/media/filer_public/b0/f4/b0f430bc-1371-430d-817d-3bbd3b96a988/id_238390_investimentos_publicos_e_as_rodovias_federais_no_brasil_impressao_2.pdf. Acesso em: 11 abr. 2024