

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARIA EDUARDA ANDRADE FERREIRA

**MANUAL DE CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM
REGIÕES SUJEITAS A BAIXAS TEMPERATURAS NO BRASIL**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARIA EDUARDA ANDRADE FERREIRA

**MANUAL DE CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM
REGIÕES SUJEITAS A BAIXAS TEMPERATURAS NO BRASIL**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Krueger da Silva

FLORIANÓPOLIS, 2024.


MANUAL DE CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM REGIÕES SUJEITAS A BAIXAS TEMPERATURAS NO BRASIL

MARIA EDUARDA ANDRADE FERREIRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.


Florianópolis, 06 de setembro de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FABIO KRUEGER DA SILVA**
Data: 23/09/2024 09:51:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Fabio Krueger da Silva, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDA SIMONI SCHUCH**
Data: 23/09/2024 21:39:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernanda Simoni Schuch, Dra.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **JOHNNY GILBERTO MORAES COELHO**
Data: 23/09/2024 23:47:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Johnny Gilberto Moraes Coelho, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Ferreira, Maria Eduarda Andrade
**Manual de conservação de pavimentos flexíveis em regiões
sujeitas a baixas temperaturas no Brasil / Maria Eduarda
Andrade Ferreira; orientação de Fabio Krueger
da Silva. - Florianópolis, SC, 2024.**
139 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico
de Construção Civil.**
Inclui Referências.

1. Manual técnico. 2. Baixa temperatura. 3. Pavimentos
flexíveis. 4. Inovação. I. Krueger da Silva, Fabio.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Manual
de conservação de pavimentos flexíveis em regiões
sujeitas a baixas temperaturas no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Fábio Krueger da Silva, pelo apoio e valiosos ensinamentos que não apenas enriqueceram minha formação, mas também me inspiraram a enfrentar os desafios da vida com determinação e resiliência.

À minha mãe, Ana Paula, por ter me inspirado com o sonho de ser engenheira civil e que, apesar de todas as dificuldades, nunca o deixou morrer. A sua dedicação e o seu esforço em priorizar minha educação foram fundamentais para que eu pudesse chegar onde estou. Essa conquista é tanto minha quanto sua.

Ao meu pai, Ronaldo, por ter me ensinado a magia dos números muito antes de eu perceber que eles se tornariam a essência da minha profissão. Seu incentivo e ensinamentos são essenciais para todas minhas conquistas nessa jornada.

Aos meus tios-avós, Laura e Braulio, que construíram o meu futuro com amor e dedicação, cuidando de cada detalhe do meu crescimento. A marca que deixaram na minha vida é tão profunda que a carrego comigo para sempre, literalmente gravada em minha pele. Obrigada por me mostrarem que o amor e o cuidado constroem algo forte e brilhante.

À minha família, que foi a base sólida nos meus maiores desafios e suportou o peso das minhas frustrações e dificuldades.

Aos meus colegas de curso, pela companhia e apoio ao longo dessa jornada.

Aos amigos de longa data, pela presença em cada conquista. Levo comigo a certeza de que a amizade construída continuará a se fortalecer por muito tempo.

Aos membros da banca, professora Dra. Fernanda Simoni Schuch e professor Dr. Johnny Gilberto Moraes Coelho, pela disponibilidade e contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

E, por fim, ao IFSC e às empresas que trabalhei, pela formação e oportunidades de crescimento.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso relacionado à pavimentação em regiões sujeitas a baixas temperaturas, com o intuito de compilar as informações mais relevantes sobre o tema. O objetivo é impactar de maneira substancial o avanço da pavimentação adequada em áreas frias do Brasil. Foram efetuadas coletas de dados fornecidos por fontes nacionais e internacionais, fundamentadas em normas técnicas, artigos científicos, monografias, projetos rodoviários e memoriais descritivos disponíveis em locais com experiência no contexto da pavimentação em condições de temperatura abaixo de zero. Além disso, foram abordados tópicos relacionados à climatologia brasileira, o impacto da temperatura no comportamento dos pavimentos e o ciclo gelo-degelo. Estes aspectos são impulsores de futuras inovações no campo da pavimentação no contexto brasileiro. Após esta análise, foi realizada uma avaliação criteriosa acerca das necessidades para melhoria dos pavimentos em regiões de baixas temperaturas, promovendo estratégias eficientes para sua conservação. Destaca-se que a elaboração de um manual técnico dedicado a pavimentos congelados no Brasil desempenha um papel crucial no aprimoramento dos revestimentos em locais onde há ocorrência de frios rigorosos no território nacional. Adicionalmente, este trabalho contribuirá notavelmente para a elevação dos padrões de qualidade e segurança das rodovias brasileiras no inverno.

Palavras-chave: Manual técnico. Baixa temperatura. Pavimentos flexíveis. Inovação.

ABSTRACT

This paper presents a case study related to paving in cold regions, with the aim of compiling the most relevant information on the subject. The objective is to significantly impact the advancement of proper paving in cold areas of Brazil. The data was collected from national and international sources, based on technical standards, scientific articles, monographs, road projects, and descriptive reports from places with experience in paving under sub-zero temperature conditions. Additionally, topics related to Brazilian climatology, the impact of temperature on pavement behavior, and the freeze-thaw cycle were explored. These aspects are drivers of future innovations in the field of paving in the Brazilian context. Following this analysis, a thorough evaluation of the needs for improving pavements in low-temperature regions will be conducted, promoting efficient conservation strategies. It is emphasized that the development of a technical manual dedicated to frozen pavements in Brazil plays a crucial role in improving the surfaces in places with severe cold conditions in the national territory. Furthermore, this work will notably contribute to raising the quality and safety standards of Brazilian highways during the winter.

Keywords: Road maintenance. Low temperature. Frozen pavements. Innovation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivo Geral	16
1.3 Objetivos Específicos	16
1.4 Estrutura do Trabalho	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Classificação dos pavimentos	18
2.2 Mecânica dos pavimentos	19
2.3 Camadas construtivas	19
2.3.1 Caracterização do revestimento	21
2.3.1.1 <i>Revestimentos por penetração</i>	22
2.3.1.2 <i>Revestimentos por mistura</i>	23
2.4 Influência da temperatura nos pavimentos	25
2.4.1 Influência da temperatura nos ligantes asfálticos	26
2.4.1.1 <i>Viscosidade</i>	27
2.4.2 Influência da temperatura nos agregados	28
2.4.3 Influência da temperatura na mistura asfáltica (ligante e agregado)	29
2.4.4 Trinca térmica	30
2.5 Caracterização das regiões de baixa temperatura no Brasil	32
2.6 Ciclo de congelamento e degelo nos pavimentos	34
2.6.1 Funcionamento do congelamento e descongelamento no pavimento	36
2.7 Os efeitos decorrentes do ciclo de congelamento e degelo	40
2.7.1 Comportamento viscoelástico	41
2.7.2 Resistência à compressão e tração	41
2.7.3 Estabilidade da mistura e volume de vazios	43
2.7.4 Tensões térmicas	44
2.8 Avaliação do pavimento	46
2.8.1 Localização e demarcação das superfícies a serem avaliadas	47
2.8.2 Medição das flechas	48
2.8.3 Inventário dos defeitos	49
2.9 Diagnóstico dos defeitos presentes na superfície	50
2.9.1 Trincas	50
2.9.2 Afundamentos	51

2.9.3 Outros defeitos de pavimento e possíveis causas	53
2.10 Conservação do pavimento	55
2.10.1 Conscientização ambiental e econômica	56
2.10.2 Drenagem	58
2.10.3 Conservação corretiva rotineira versus conservação preventiva periódica	61
2.10.4 Técnicas de conservação para pavimentos flexíveis	64
2.10.4.1 Reparos em camadas saturadas	64
2.10.4.2 Reparos das camadas de base e sub-base	65
2.10.4.3 Reparos de defeitos dos pavimentos betuminosos em áreas restritas	67
2.10.4.4 Reparos em ondulações, afundamentos e trilhas de roda	69
2.10.4.5 Reparos em falhas, painéis e buracos	71
2.10.4.6 Reparos em fissuras e trincas	74
3 MÉTODO	79
3.1 Classificação da pesquisa	81
3.2 Apresentação e análise dos dados	81
3.3 Elaboração do manual	86
3.4 Elaboração do mapa	87
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
4.1 Desafios climáticos: temperatura e ciclo gelo-degelo nos pavimentos	94
4.2 Mapa climático da região Sul do Brasil	95
4.3 Técnicas de conservação	104
4.4 Recomendações técnicas para pavimentos sujeitos a baixas temperaturas	114
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
6 INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA	119
7 CRONOGRAMA	121
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
APÊNDICE A - RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA PAVIMENTOS SUJEITOS A BAIXAS TEMPERATURAS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Seção transversal de pavimento flexível.....	21
Figura 02 - Classificação dos revestimentos flexíveis.....	23
Figura 03 - Tratamento superficial por penetração.....	24
Figura 04 - Aplicação do concreto betuminoso usinado a quente.....	25
Figura 05 - Aplicação de lama asfáltica.....	26
Figura 06 - Temperatura versus viscosidade.....	28
Figura 07 - A temperatura no módulo de resiliência e resistência à tração.....	30
Figura 08 - Trinca térmica em pavimento na cidade de Frisco (Colorado).....	32
Figura 09 - Mapa de temperatura mínima em junho, julho e agosto.....	33
Figura 10 - Zonas climáticas do Brasil.....	36
Figura 11 - Levantamento por congelamento.....	38
Figura 12 - Enfraquecimento do degelo.....	39
Figura 13 - Influência da infiltração de água no pavimento.....	40
Figura 14 - Defeitos no pavimento em Avon (Colorado).....	41
Figura 15 - Esforços de compressão e tração na estrutura do pavimento.....	43
Figura 16 - Taxa de resfriamento x tensão térmica.....	45
Figura 17 - Treliça de alumínio.....	47
Figura 18 - Medição das flechas.....	49
Figura 19 - Inventário dos defeitos do pavimento.....	50
Figura 20 - Exemplos de fissuras.....	52
Figura 21 - Afundamentos no pavimento.....	53
Figura 22 - Relação entre tempo e intervenção.....	56
Figura 23 - Boca coletora múltipla.....	59
Figura 24 - Boca coletora lateral.....	60
Figura 25 - Boca de lobo obstruída.....	61
Figura 26 - Empoçamento de água.....	61
Figura 27 - Localização de minas.....	66
Figura 28 - Demarcação da área.....	73
Figura 29 - Enchimento da caixa.....	74
Figura 30 - Espalhamento do agregado.....	76
Figura 31 - Corte do material degradado.....	77
Figura 32 - Colocação da mistura betuminosa.....	78
Figura 33 - Caminhão com rolo pneumático.....	79
Figura 34 - Fluxograma para desenvolvimento do trabalho.....	85

Figura 35 - Manual utilizado como base.....	87
Figura 36 - Dados históricos.....	88
Figura 37 - Dados históricos tratados.....	89
Figura 38 - Obtenção dos dados para elaboração dos mapas.....	92
Figura 39 - Base modelo para os mapas climatológicos.....	93
Figura 40 - Inserção da tabela no software QGis.....	94
Figura 41 - Mapa de pontos.....	94
Figura 42 - Mapa de dias com temperaturas negativas no Paraná.....	101
Figura 43 - Mapa de dias com temperaturas negativas em Santa Catarina.....	102
Figura 44 - Mapa de dias com temperaturas negativas no Rio Grande do Sul.....	103
Figura 45 - Mapa de dias com temperaturas negativas na região Sul.....	104
Figura 46 - Layout do manual de recomendações técnicas.....	116

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação tem origens que se estendem por milênios e surge a partir da demanda das civilizações por povoamento de regiões, facilitação do comércio entre locais afastados e até mesmo promoção de intercâmbio religioso. Segundo Bernucci *et al.* (2008), as vias de acesso estrategicamente planejadas para a construção das pirâmides foram concebidas entre 2600-2400 a.C. e consistiam em lajões cuidadosamente alinhados. De igual modo, as estradas romanas formavam uma vasta rede viária que permaneceu como referência no assunto por muitos séculos. Além disso, os romanos introduziram técnicas inovadoras de construção, como o abaulamento das estradas a fim de evitar acúmulo de água, e adotaram a aplicação de múltiplas camadas construtivas, visto que diferentes materiais proporcionam distintas propriedades (Mantas, 2016). Com isso, torna-se evidente a significância dos projetos rodoviários desde os primórdios da civilização.

A partir da necessidade diária de locomoção dos indivíduos, diversas tecnologias foram desenvolvidas a fim de facilitar o transporte entre regiões. No decorrer dos anos, com tecnologia e materiais mais avançados, o modal rodoviário tornou-se o mais utilizado no Brasil (Cruz *et al.*, 2019). Embora abrangentes, as estradas pavimentadas compõem apenas 12,4% da extensa malha rodoviária brasileira, de acordo com a CNT, SEST e SENAT (2019). Com 213.500 km pavimentados em contraste com 1.350.100 km não pavimentados, surgem desafios recorrentes nas rodovias nacionais.

O Brasil, situado na América do Sul, possui uma extensão territorial de 8.510.345,540 km², conforme dados do IBGE (2022). A distância entre o ponto mais setentrional e o mais meridional, representando os extremos do país, totaliza 4.378,4 km, um longo caminho a ser percorrido pelas estradas nacionais. Devido à sua vasta área territorial, o Brasil está localizado em duas zonas climáticas: Zona Tropical e Zona Temperada do Sul. Essa variabilidade climática abrange desde locais quentes e úmidos até regiões de baixas temperaturas, conectadas por rodovias concebidas de forma genérica, sem considerar as variações climáticas entre essas localidades.

Em locais com demandas específicas, surge a necessidade da implementação de projetos de pavimentação mais elaborados, visando aproveitar as características intrínsecas de cada região e prevenir falhas decorrentes da condição climática. Um exemplo claro deste cenário é a locomoção em áreas sujeitas a temperaturas baixas, por vezes negativas. O Brasil carece de estudos no campo de pavimentos congelados e em comparação com a realidade internacional, onde existem tecnologias avançadas na área, o país está distante de possuir o conhecimento técnico necessário para superar as dificuldades impostas pelo ambiente local.

A ocorrência de neve em um território está majoritariamente vinculada à combinação de precipitação e temperatura no local atingido (Schmitz, 2007). A compreensão dos fatores supracitados pode ser elucidada através de mapas de isotermas (linhas que conectam pontos de mesma temperatura) e isoietas (linhas que representam áreas de igual precipitação). Ao unir o mapa de isotermas ao de isoietas, desenvolvido por Schmitz (2007), constata-se que o território estudado, abrangendo do sudeste do estado catarinense ao nordeste do estado gaúcho, oferece um ambiente propício para a ocorrência de baixas temperaturas. O mesmo estudo proposto por Schmitz (2007) apresenta que a média de dias com neve em um ano, entre 1961 e 1990, na cidade de São Joaquim é de 2,7 dias. Estes dados justificam a necessidade de tecnologias de pavimentação adaptadas ao contexto supracitado.

Fernandes *et al.* (2016) apontam que, entre os dias 22 e 23 de julho de 2013, o fenômeno de neve foi confirmado em 126 municípios catarinenses, abrangendo cerca de 64% da área total do estado. Esta constatação evidencia que as nevadas se tornam parte integrante do cotidiano de alguns brasileiros, especialmente durante o período mais frio do ano. A presença de neve e geadas no Brasil instiga a necessidade de aprofundamento na discussão sobre o tema de pavimentos congelados no âmbito acadêmico e profissional. Desta forma, esta pesquisa propõe apontar as recomendações técnicas mais pertinentes para o projeto, execução e

manutenção de estradas sujeitas a essas considerações climáticas no território nacional.

1.1 Justificativa

O transporte de cargas e pessoas é majoritariamente feito pelo modal rodoviário no Brasil. Nos últimos anos, com o crescimento das cidades e das demandas de circulação de mercadorias, observou-se um crescimento notável no volume de deslocamentos pela malha viária. Além disso, os avanços tecnológicos promoveram alterações nas geometrias viárias e aumento significativo das cargas transportadas por veículos de grande porte. De igual modo, alterações climáticas radicais têm provocado recordes de altas e baixas temperaturas e um volume de chuvas nunca antes registrado. Estes elementos exercem influência direta na qualidade do pavimento, exigindo aprimoramentos à medida que cargas impostas sobre ele se modificam.

Com base em dados obtidos através da CNT, SEST e SENAT (2019), após a análise da superfície do pavimento das rodovias brasileiras há sinais de trincas, afundamentos, buracos e desgaste em 75% de sua extensão, um dado alarmante acerca das condições das estradas no Brasil, visto que influenciam diretamente na segurança dos que a utilizam. Outrossim, nas cidades sujeitas a baixas temperaturas pode-se acrescentar a presença de um outro defeito de pavimento: as trincas térmicas, um modo de ruptura associado às condições ambientais. Esse tipo de defeito de pavimento ocorre em regiões com temperaturas abaixo de -10°C ou em repetidos ciclos de baixas temperaturas. Embora existam estudos, que serão detalhados ao decorrer do presente trabalho, sobre a ocorrência de afundamentos e trincas causados por fadiga, a compreensão e técnicas avançadas a respeito de deteriorações associadas às condições ambientais carecem de desenvolvimento no Brasil.

Em contrapartida, outros locais do mundo desfrutam de modernas tecnologias para projetos, execução e manutenção de rodovias em áreas sujeitas a

temperaturas negativas. Os Estados Unidos, por exemplo, possuem conhecimentos avançados a respeito da pavimentação em regiões com neve. O país mencionado enfrenta nevascas históricas, como a “*December 2022 North American winter storm*” (tempestade de inverno norte americana em dezembro de 2022) que resultou no depósito de aproximadamente 143,51 cm de neve sobre o solo de Snyder, Nova York, entre os dias 20 e 25 de dezembro de 2022 (College Park, 2022). Com base nas experiências sobre pavimentos congelados de nações altamente desenvolvidas, é crucial que o Brasil conduza estudos aprofundados a respeito do assunto, especialmente considerando as ocorrências anuais de neve e temperaturas abaixo de zero em seu território.

Portanto, como justificativa para este estudo, busca-se analisar e identificar possíveis aprimoramentos na qualidade de estradas brasileiras, especialmente aquelas afetadas por períodos de baixas temperaturas, uma temática não abordada no cenário nacional. É de extrema importância a elaboração de um material sobre pavimentação em estradas congeladas fundamentado na revisão de estudos, projetos, memoriais, normas técnicas e artigos científicos provenientes de países estrangeiros especializados no tema. Com isso, o presente trabalho torna-se essencial para garantir a contínua melhoria das rodovias brasileiras.

1.2 Objetivo Geral

Elaborar um manual técnico sobre a conservação de pavimentos flexíveis em regiões sujeitas a baixas temperaturas, visando contribuir significativamente no desempenho das rodovias brasileiras.

1.3 Objetivos Específicos

Dessa forma, o presente projeto tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Conduzir uma revisão dos estudos mais relevantes sobre tecnologias já estabelecidas para pavimentos congelados;

- b) Realizar uma pesquisa climatológica e mapear as áreas sujeitas ao fenômeno de congelamento e degelo na última década;
- c) Apresentar as principais consequências do processo de congelamento e descongelamento em pavimentos flexíveis, além de discutir estratégias para evitá-las;
- d) Compilar técnicas de conservação de pavimentos com ênfase nos defeitos associados à presença de água.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este estudo foi elaborado de forma a aprofundar o entendimento sobre pavimentação em regiões sujeitas a baixas temperaturas. Dessa forma, a estrutura do trabalho foi desenvolvida para facilitar a consecução dos objetivos propostos. Os capítulos estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução, justificativa, objetivo geral, objetivos específicos e estrutura do trabalho;
- Capítulo 2 - Fundamentação teórica;
- Capítulo 3 - Método;
- Capítulo 4 - Resultados e discussões;
- Capítulo 5 - Considerações finais;
- Capítulo 6 - Infraestrutura necessária;
- Capítulo 7 - Cronograma;
- Capítulo 8 - Referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme Brasil (2006), responsável pelo Manual de Pavimentação do DNIT, o pavimento de uma rodovia é composto por camadas contíguas de materiais com deformabilidade e resistência distintas. Isto confere a estrutura alto grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações resultantes do tráfego de veículos.

O conceito de pavimento também abrange questões técnicas e econômicas relacionadas à segurança dos usuários:

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. (Bernucci *et al.*, 2008, p. 9)

2.1 Classificação dos pavimentos

A classificação dos pavimentos asfálticos dá-se pelo tipo de revestimento e a forma como a tensão será distribuída nas camadas inferiores a ele (Pereira, 2017). De forma geral, conforme Biedacha (2020), os pavimentos são classificados em flexíveis, semi-rígidos e rígidos. Com isso, é possível observar as diferentes classificações segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (Brasil, 2006, p. 95):

Flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

Semi-Rígido: caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

2.2 Mecânica dos pavimentos

O campo Mecânica dos Pavimentos, segundo Medina (1998) *apud* Spada (2003, p. 7), consiste em “uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos”. Trata-se de um campo multidisciplinar que abrange desde o subleito até a camada superior do revestimento asfáltico e se concentra no estudo do comportamento mecânico e estrutural do pavimento. Esta abordagem abrange desde a geometria da estrutura até os materiais empregados em sua construção. Assim, para uma concepção mecânica adequada da estrutura do pavimento, busca-se um método de dimensionamento que possibilite a análise de tensões, deformações e deslocamentos em todas as camadas que compõem a estrutura.

O método de dimensionamento nacional de pavimentos (MeDiNa), criado a partir de um convênio com o DNIT, IPR e Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), incorpora os princípios da mecânica dos pavimentos para o dimensionamento adequado da estrutura. O método, por meio do cálculo de tensões e deformações na estrutura do pavimento, realiza o dimensionamento da estrutura de forma mecanística-empírica por meio da Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) (Brasil, 2020).

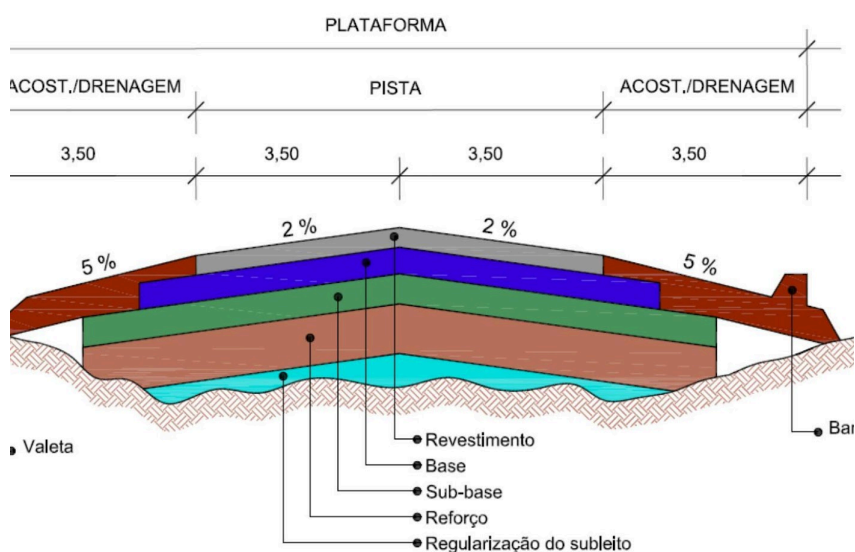
Com isso, torna-se evidente a importância do estudo do comportamento mecânico não só do pavimento, mas também de seus componentes, destacando a interação entre eles. A mecânica dos pavimentos é cenário de estudos constantes a fim de proporcionar tecnologias de ponta e a melhor qualidade existente para garantir a utilização apropriada e segurança das estradas brasileiras.

2.3 Camadas construtivas

Em razão das diferentes classificações de pavimentos, a forma em que são construídos e as tecnologias utilizadas em seus sistemas construtivos são diferentes

conforme o tipo de revestimento. Cada camada do pavimento desempenha funções distintas e contribui para atender às exigências específicas do local, conforme previamente estabelecido no projeto. Isto posto, é possível observar as camadas presentes em um pavimento flexível na Figura 01 que serão descritas a seguir.

Figura 01 - Seção transversal de pavimento flexível



Fonte: Midei (2016)

O subleito, localizado acima do nível freático, constitui o terreno natural que serve como base estrutural para o pavimento e tem função de garantir as características geométricas do projeto, como a inclinação da via (Senço, 2007 *apud* Cunha e Oliveira, 2021, p. 20).

A regularização do subleito torna-se necessária a partir da irregularidade da camada de solo que não foi removida após a terraplenagem. Conforme DNIT (2010a), é uma camada “destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente”.

Acima da regularização, o reforço de subleito somente é utilizado em situações de baixa capacidade de suporte do subleito. Essa prática diminui a espessura de camadas superiores, como a sub-base, proporcionando uma economia de custos significativa (DNIT, 2010b).

A camada de sub-base é utilizada quando a base não tem recomendação de ser construída de forma direta na regularização ou reforço de subleito, tanto por questões técnicas quanto econômicas (Brasil, 2006).

Conforme Cunha e Oliveira (2021), a base possui papel estrutural de forma que é a camada destinada a receber os esforços verticais provenientes das cargas aplicadas no pavimento por meio do fluxo local de veículos e transmiti-los às camadas inferiores.

A última camada presente na estrutura do pavimento é o revestimento, que, conforme Medina (1977) *apud* Silva e Carneiro (2014, p. 17):

É a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, sendo destinada a melhorar as condições de tráfego quanto à comodidade e segurança, além de resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

É importante ressaltar que camadas de reforço e regularização de subleito, bem como sub-base não são obrigatórias, uma vez que a necessidade dessas camadas construtivas é influenciada tanto pelo fluxo de veículos quanto pelas características e condições dos materiais utilizados.

2.3.1 Caracterização do revestimento

As necessidades específicas de cada local e as propriedades mecânicas do subleito em conjunto com o tráfego de veículos existente na via, determinam as camadas construtivas que serão realizadas na fase de execução. À vista disso, a partir da classificação dos pavimentos em flexível, semi-rígido ou rígido, é possível estabelecer as camadas que serão utilizadas em vista do revestimento escolhido e da distribuição de tensão causada por ele.

O pavimento flexível, objeto deste projeto, sofre grande tensão em sua fundação e seus revestimentos são categorizados conforme ilustrado na Figura 02, com base nos materiais utilizados em sua execução.

Figura 02 - Classificação dos revestimentos flexíveis



Fonte: Brasil (2006)

É notável a quantidade de revestimentos flexíveis disponíveis para a realização do pavimento de uma rodovia, sendo eles classificados como betuminosos e por calçamento. No escopo deste trabalho, será realizada a análise do primeiro tipo. Dito isso, o revestimento pode ser realizado por meio de penetração ou mistura.

2.3.1.1 Revestimentos por penetração

O método de revestimento por penetração consiste na compactação mecânica de camadas de agregados e ligante betuminoso aplicadas sucessivamente, como observado na Figura 03. Conforme Almeida *et al.* (2019), os revestimentos por penetração podem ser empregados como tratamento superficial da via, onde são aplicados como camada de rolamento a fim de aprimorar a aderência entre os pneus e o pavimento.

Figura 03 - Tratamento superficial por penetração



Fonte: Gewehr (2018)

Em locais de baixo fluxo de veículos, o TSP (Tratamento Superficial por Penetração) é utilizado como revestimento principal devido a sua execução menos complexa e custo reduzido relacionado à construção. Entretanto, é importante mencionar que este método não confere grande resistência para a estrutura do pavimento. Quando há necessidade de estabilizar e impermeabilizar a superfície de uma rodovia, os tratamentos superficiais são alternativas comumente utilizadas no território brasileiro.

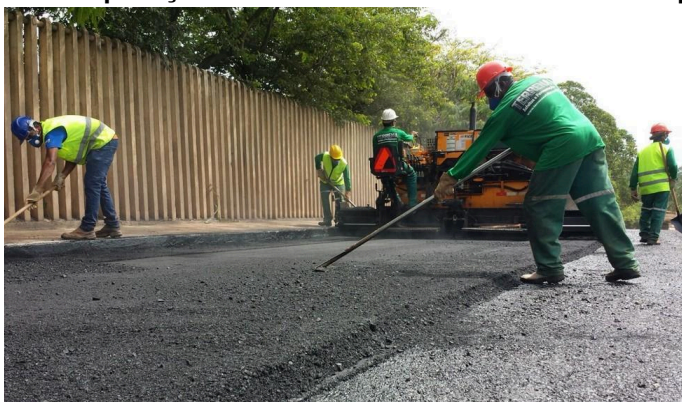
2.3.1.2 Revestimentos por mistura

Os revestimentos por mistura são utilizados em locais com tráfego intenso onde há necessidade de grande resistência e suporte da estrutura. Como pode-se observar na Figura 02, este material é usinado ou preparado na pista em que será aplicado e pode ser realizado tanto em altas temperaturas, conhecido como misturas asfálticas a quente, quanto em temperatura ambiente, denominado misturas asfálticas a frio.

O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), presente na Figura 04, faz parte das misturas asfálticas a quente e é o material mais utilizado no Brasil para essa finalidade (Pereira *et al.*, 2022). Sua predominância no cenário nacional facilita sua localização, o que o torna ainda mais popular. Em casos de restauração de

pavimentos, a alta disponibilidade do CBUQ influencia na rapidez do serviço e alta qualidade, uma vez que pode ser obtido de forma rápida e acessível, evitando a permanência de defeitos no pavimento por tempo prolongado.

Figura 04 - Aplicação do concreto betuminoso usinado a quente



Fonte: Terrena Asfaltos (2017)

Outra categoria de revestimento por mistura são as usinadas a frio, elas correspondem a um material betuminoso usinado a quente e aplicado a frio, dispensando a necessidade de uma fonte de calor para sua utilização. Essa abordagem é muito indicada em atividades de recuperação e correção de pavimentos. A realização de operações “tapa-buraco” é majoritariamente feita pela aplicação da mistura asfáltica usinada a frio, na qual o asfalto ensacado é utilizado para corrigir defeitos no pavimento.

Complementar ao asfalto a frio, a lama asfáltica é outro material do grupo de misturas a frio e, de acordo com a norma DNIT 150/2010, consiste na associação de emulsão asfáltica, filer, agregado mineral e água (DNIT, 2010c). O material apresenta consistência fluida, como visto na Figura 05, e tem a finalidade de conservar o pavimento, uma vez que visa impermeabilizar e restaurar o mesmo.

Figura 05 - Aplicação de lama asfáltica



Fonte: JRcor (2023)

Dessa forma, é possível perceber a grande quantidade de revestimentos asfálticos que podem ser utilizados no setor de pavimentação. O tipo de revestimento deve ser escolhido com base nas características do local, tráfego e necessidades específicas para atingir a qualidade desejada e garantir segurança e conforto aos usuários.

2.4 Influência da temperatura nos pavimentos

A temperatura e suas oscilações exercem grande influência em obras rodoviárias. Suas ações são consideradas em todos os aspectos da construção de uma estrutura viária, desde o dimensionamento do pavimento até a execução e manutenção das rodovias. Segundo Almeida *et al.* (2017), a temperatura exerce um impacto adverso na deterioração do revestimento asfáltico, uma vez que acelera o processo de degradação do mesmo à medida que provoca defeitos decorrentes de flexões e compressões no pavimento e seus componentes.

Portanto, a importância do entendimento acerca da influência da temperatura no revestimento asfáltico é essencial para promover a eficiência das estruturas urbanas e rodoviárias, além de garantir a segurança dos usuários. Para facilitar o entendimento acerca do assunto, a Tabela 01 apresenta normas internacionais que

servem como base para o estudo, visto que não existem normas brasileiras a respeito de pavimentos congelados.

Tabela 01 - Normas internacionais sobre pavimentos congelados

NORMA	ANO	LOCAL	TÍTULO	TÍTULO EM PORTUGUÊS	DESCRIÇÃO
ASTM D5918	2022	EUA	Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils	Métodos de Teste Padrão para Susceptibilidade ao Levantamento de Gelo e Enfraquecimento Durante o Descongelamento de Solos	Avalia a susceptibilidade dos solos ao levantamento decorrente do gelo e enfraquecimento durante o descongelamento
AASHTO R30	2022	EUA	Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)	Prática Padrão para Condicionamento de Misturas de Asfalto Quente	Aborda práticas de condicionamento de misturas de asfalto, simulando condições de congelamento e descongelamento.
EN 12697-24	2018	Europa	Bituminous Mixtures - Test Methods - Part 24: Resistance to Fatigue	Misturas Betuminosas - Métodos de Teste - Parte 24: Resistência à Fadiga	Mostra testes de resistência à fadiga que levam ciclos de congelamento e descongelamento em consideração

Fonte: Autoria própria (2024)

Nesse contexto, a influência da temperatura nos ligantes, agregados e na mistura ligante e agregado será elucidada nos tópicos a seguir.

2.4.1 Influência da temperatura nos ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos, também conhecidos como cimento asfáltico de petróleo (CAP), são responsáveis por aglutinar as partículas sólidas de uma mistura com a intenção de torná-la coesa. A definição de ligante é dada por Madureira (2022, p. 5):

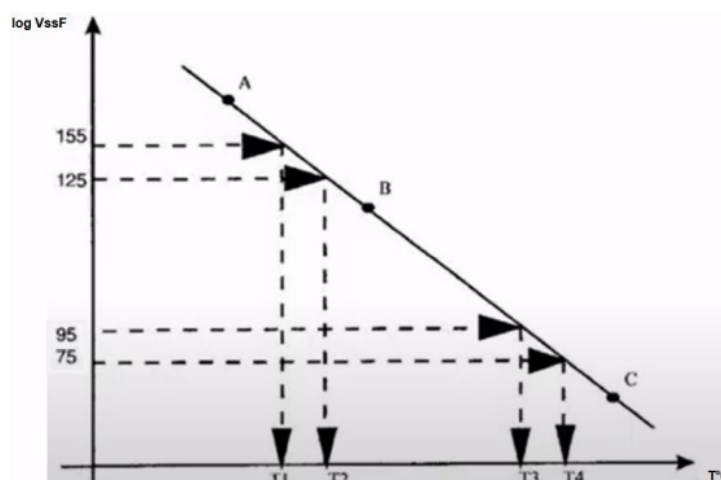
É um material semissólido à temperatura ambiente, de cor marrom a preta com propriedades adesivas, termoplástico, impermeável à água, viscoelástico e pouco reativo. Possui a temperatura associada a todas as suas propriedades físicas. Por isso é necessário que seja aquecido para que ele tenha a consistência adequada ao uso como revestimento asfáltico.

Devido a suas características decorrentes do petróleo, o ligante é um material termoviscoplastico, ou seja, suas propriedades se alteram pela variação de temperatura: é viscoelástico à temperatura ambiente, líquido em altas temperaturas e semissólido quando exposto a temperaturas baixas (Bernucci *et al.*, 2022). Com isso, há alteração das características do material a partir de oscilações de temperatura, o que pode causar danos à superfície do pavimento.

2.4.1.1 Viscosidade

A capacidade de um fluido resistir ao escoamento é dada pela viscosidade do material e refere a sua resistência sob a influência de forças externas, como a variação de temperatura. Conforme Madureira (2022), a viscosidade do ligante asfáltico aumenta à medida que a temperatura diminui, o que pode ser corroborado pela observação da Figura 06.

Figura 06 - Temperatura versus viscosidade



Fonte: Thives (2016 *apud* Madureira, 2022, p. 16)

O gráfico acima é composto pelos eixos X e Y. No eixo vertical, tem-se a representação da viscosidade obtida por meio do ensaio Saybolt-Furol (designada como VssF), exibindo a variação da viscosidade em relação à temperatura. Já o eixo horizontal representa a variação de temperatura em graus Celsius (°C). Assim, pode-se constatar que a partir da diminuição da temperatura, equivalente ao eixo X do gráfico, há aumento na viscosidade do ligante.

A influência de temperaturas baixas na viscosidade do ligante causa problemas para sua utilização, uma vez que o mesmo apresenta alta viscosidade em áreas sujeitas a temperaturas negativas. Conforme Carvalho *et al.* (2020), pode-se inferir que ligantes de alta viscosidade possuem baixo valor de penetração e consistência elevada. Em virtude disso, a resistência ao fluxo, que dificulta a obtenção de uma camada uniforme de revestimento, e a rigidez da mistura, que a torna mais propensa a forças de expansão e contração, podem resultar na redução da vida útil do pavimento.

2.4.2 Influência da temperatura nos agregados

O pavimento asfáltico é composto pela mistura entre ligantes e um conjunto de agregados minerais, sendo estes correspondentes por 94% a 95% do peso da mistura (Curtis, 1999 *apud* Araújo, Ribeiro e Correia, 2006, p. 1). Conforme Araújo, Ribeiro e Correia (2006), os agregados possuem elevada importância no revestimento, uma vez que conferem estabilidade mecânica ao sistema, suportam o peso dos veículos e transmitem as tensões para camadas inferiores de forma mais branda.

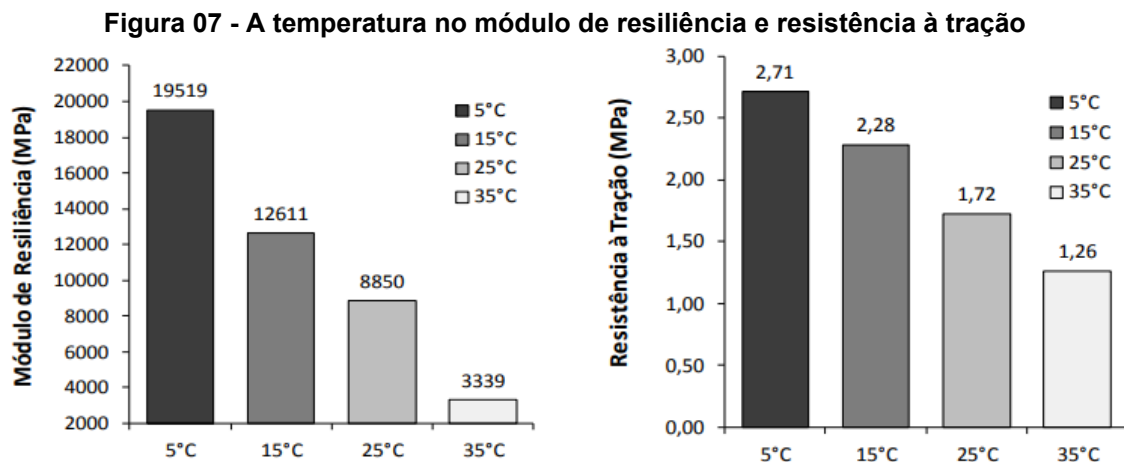
A brita, comumente utilizada como agregado na mistura asfáltica, tem suas propriedades influenciadas pela temperatura. As forças de compressão e expansão nos agregados podem ocasionar instabilidade nas camadas do pavimento, uma vez que o elemento se contrai em temperaturas negativas e expande em altas temperaturas, devido a dilatação térmica. A estabilidade térmica do agregado é de extrema importância para suportar os ciclos de congelamento e degelo nos pavimentos, a temperatura baixa pode deixar o material mais quebradiço e influenciar no surgimento de trincas. Segundo Luo *et al.* (2022), o material se deteriora com os ciclos de congelamento e degelo e provoca a desintegração do pavimento.

2.4.3 Influência da temperatura na mistura asfáltica (ligante e agregado)

Após analisar a influência da temperatura tanto no ligante asfáltico quanto nos agregados, este tópico irá abordar a combinação desses materiais, identificada como mistura asfáltica. As misturas se comportam de acordo com as características dos materiais que as compõem e a temperatura que são submetidas:

Pode-se analisar [...] que em temperaturas mais baixas ocorre um aumento da rigidez, surgindo uma maior propensão ao surgimento de fissuras no revestimento e com as temperaturas mais elevadas nas quais há diminuição da rigidez, ocorre uma intensificação da deformação permanente (Lautharte, Ponciano e Bock, 2017, p. 4).

Segundo Curtis, Ensley e Epps (1993), os elementos de adesão e absorção são os principais na investigação sobre a interação asfalto-agregado. A interação dos materiais da mistura asfáltica entre si e seu comportamento são alterados em resposta às variações térmicas, como evidenciado pela relação entre módulo de resiliência e a resistência à tração em função da temperatura, ilustrada na Figura 07.



Fonte: Lautharte, Ponciano e Bock (2017)

O módulo de resiliência, conforme Ponte *et al.* (2014), desempenha um papel de extrema importância no cálculo empírico-mecânico dos pavimentos no território brasileiro. Esse parâmetro é utilizado para mensurar a capacidade do pavimento de recuperar sua forma original após uma deformação temporária e tem seus valores influenciados pela temperatura ambiente. A redução da temperatura causa aumento

no módulo de resiliência da mistura, conforme é evidente na Figura 08, dito de outra forma, a mistura asfáltica adquire características mais viscosas nesse cenário.

A resistência à tração do revestimento asfáltico é afetada pela sensibilidade do asfalto a variações de temperatura. A Figura 07 evidencia que, quando exposto a temperaturas reduzidas, o pavimento apresenta maior resistência à tração, resultando em maior rigidez. De acordo com Lautharte, Ponciano e Bock (2017), em locais sujeitos a temperaturas mais baixas, deve-se levar em consideração a compatibilidade entre resistência e rigidez, especialmente porque climas mais frios demandam uma abordagem mais criteriosa na composição do revestimento. A atenção às exigências de resistência e rigidez é essencial para prevenir a formação de trincas térmicas e assegurar um desempenho eficaz do pavimento.

Portanto, torna-se evidente a forte influência da temperatura na mistura asfáltica, uma vez que suas propriedades são facilmente mutáveis devido a alta susceptibilidade térmica do material. Assim, deve-se considerar todas as características citadas anteriormente para realização de análises criteriosas sobre os materiais utilizados, condições climáticas do ambiente em que será realizada a pavimentação e a relação entre eles, a fim de proporcionar aos usuários um revestimento de qualidade adequada e sem defeitos.

2.4.4 Trinca térmica

Segundo Behnia, Buttlar e Reis (2018), em uma revisão a respeito da avaliação de fissuras decorrentes de baixas temperaturas, conforme há diminuição da temperatura, o stress térmico se acumula no pavimento devido à tendência de contração das camadas. A causa da trinca térmica está diretamente relacionada à variação de temperatura, que pode ocorrer ao longo de um dia ou de estações do ano. As trincas térmicas são trincas isoladas por retração que, como indicado pela norma DNIT 005/2003-TER, estão relacionadas ao fenômeno de retração térmica do revestimento ou camadas subjacentes a ele (DNIT, 2003a). Os ciclos contínuos de

contração e expansão são responsáveis pelo surgimento de trincas no pavimento, como a presente na Figura 08.

Figura 08 - Trinca térmica em pavimento na cidade de Frisco (Colorado)



Fonte: A autoria própria (2023)

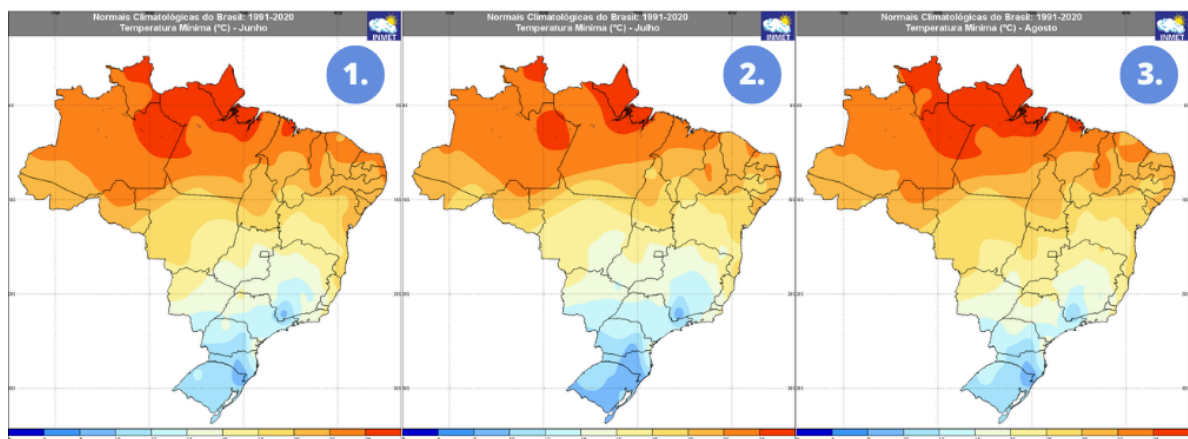
Uma maneira de qualificar o ligante quando submetido a temperaturas negativas é o ensaio de ponto de ruptura Fraass, que consiste na avaliação da susceptibilidade do betume à fratura por meio de congelamento e descongelamento. Conforme a norma europeia EN 12593/2007, esse ensaio permite determinar a temperatura no momento da ruptura de uma película de ligante asfáltico sob condições de carga definidas (BSI, 2007). Esta análise fornece informações sobre a faixa de temperatura em que o material se torna frágil e propenso a fraturas e é relevante para garantir a durabilidade e segurança das estradas.

O mecanismo responsável pelo surgimento de trincas térmicas têm direta influência na integridade do pavimento, este defeito compromete a estrutura da construção e facilita a infiltração de água nas camadas. Segundo Chen, Lin e Young (2004) *apud* Ferreira *et al.* (2019, p. 02), a presença de fissuras maiores de 2 milímetros aumenta significativamente a permeabilidade do pavimento, o que agrava situação, pois a presença de água no sistema resulta em maior retração em dias frios, ampliando a influência do ciclo de congelamento e degelo na área afetada.

2.5 Caracterização das regiões de baixa temperatura no Brasil

A partir da necessidade de maior compreensão sobre as temperaturas negativas que ocasionalmente atingem o Brasil e sua influência na pavimentação de rodovias, será realizado um estudo do mapa de temperaturas mínimas no país. Segundo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera, as normais climatológicas correspondem ao valor médio de uma informação durante um número determinado de anos, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) definiu esse intervalo como 30 anos (Portugal, [201-]). A partir das normais climatológicas obtidas pelo site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), é possível observar a temperatura mínima do território brasileiro nos meses de junho, julho e agosto no período de 1991 a 2020 representadas pela Figura 09 (Ministério da Agricultura e Pecuária, [202-]a).


Figura 09 - Mapa de temperatura mínima em junho, julho e agosto



Fonte: Adaptado de Ministério da Agricultura e Pecuária ([202-]a).

A Tabela 02 fornece uma exposição detalhada das normais climatológicas e possibilita uma análise abrangente das temperaturas mínimas nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande de Sul, notoriamente afetados pelo frio durante os meses de inverno. Os dados expostos representam a temperatura mínima média, tanto mensal quanto anual, entre 1991 e 2020.

Tabela 02 - Normais climatológicas em junho, julho e agosto no sul do Brasil

 Normal Climatológica do Brasil 1991-2020 Temperatura Mínima Mensal e Anual (°C)						
Código	Nome da Estação	UF	Junho	Julho	Agosto	Ano
83783	CAMPO MOURAO	PR	11,4	10,6	11,9	15,2
83836	IRATI	PR	9,2	8,2	9,1	13,1
83766	LONDRINA	PR	12,7	12,0	13,4	-
83767	MARINGA	PR	14,7	14,2	15,6	18,0
83844	PARANAGUA	PR	15,3	14,2	14,8	18,6
83980	BAGE	RS	9,0	8,1	9,4	13,4
83919	BOM JESUS	RS	6,7	6,0	7,2	10,6
83942	CAXIAS DO SUL	RS	9,7	8,8	10,0	13,3
83912	CRUZ ALTA	RS	10,0	9,0	10,5	14,2
83964	ENCRUZILHADA DO SUL	RS	9,6	8,5	9,8	13,6
83881	IRAI	RS	10,9	9,9	11,3	15,3
83914	PASSO FUNDO	RS	9,5	8,6	9,9	13,4
83985	PELOTAS	RS	9,4	8,5	9,9	14,3
83967	PORTO ALEGRE	RS	11,3	10,4	11,6	15,9
83995	RIO GRANDE	RS	10,0	9,1	10,4	14,8
83936	SANTA MARIA	RS	10,4	9,4	10,8	14,9
83997	SANTA VITORIA DO PALMAR	RS	8,6	7,8	8,8	13,2
83907	SAO LUIZ GONZAGA	RS	11,8	10,8	12,2	15,9
83948	TORRES	RS	11,8	10,8	12,0	16,2
83927	URUGUAIANA	RS	9,2	8,4	9,7	14,3
83887	CAMPOS NOVOS	SC	8,7	8,1	9,2	12,5
83883	CHAPECO	SC	11,1	10,5	12,2	15,0
83891	LAGES	SC	7,6	7,0	8,1	11,9
83920	SAO JOAQUIM	SC	6,5	5,9	7,2	9,8

Fonte: Adaptado de Ministério da Agricultura e Pecuária ([202-]b)

Com base nas informações coletadas, pode-se afirmar que o território brasileiro apresenta condições propícias para a ocorrência de baixas temperaturas. Santa Catarina (2011) compilou um registro de temperaturas mínimas extremas (°C) mensais durante o inverno catarinense, proporcionando uma análise detalhada na Tabela 03. É possível observar que a menor temperatura registrada no inverno de Santa Catarina ocorreu em Caçador no ano de 1952, atingindo -14°C no município. Outras cidades do estado também apresentaram valores extremos, como Canoinhas e Xanxerê, com temperaturas de -12°C e -11,6°C respectivamente.

Tabela 03 - Temperaturas extremas no inverno catarinense

MUNICÍPIO/ESTAÇÃO	REGIÃO	ALTITUDE(M)	PERÍODO	Nº DE ANOS OBS.	DATA DO MENOR REGISTRO	JUNHO	JULHO	AGOSTO
Caçador	Meio Oeste	960	1942-2010	69	11/6/1952	-14.0	-11.0	-10.4
Campo Alegre	Planalto Norte	819	1924-1968	44	13/7/1923	-8.8	-9.5	-8.1
Campos Novos	Meio Oeste	964	1931-2010	80	9/8/1948	-3.8	-6.3	-6.5
Canoinhas	Planalto Norte	766	1957-1977	20	7/8/1963	-9.0	-8.5	-12.0
Chapecó	Oeste	679	1973-2010	37	14/7/2000	-2.8	-4.5	-4.0
Curitibanos	Meio Oeste	1040	1913-1958	45	13/7/1923	-6.4	-7.4	-6.0
Fpolis (São José)	Gr. Florianópolis	2	1911-2010	87	26/8/1984	1.7	1.4	1.3
Indaial	Vale do Itajaí	86	1970-2010	40	14/7/2000	1.0	-0.2	3.4
Irineópolis	Planalto Norte	777	1928-1984	54	7/8/1963	-8.1	-8.4	-9.1
Itajaí	Litoral Norte	5	1980-2010	30	3/8/1991	0.0	0.2	-0.5
Itapiranga	Oeste	200	1986-2010	24	12/7/1988	-2.0	-3.4	-3.0
Ituporanga	Alto Vale do Itajaí	475	1985-2010	25	3/8/1991	-3.4	-4.4	-4.6
Joaçaba	Meio Oeste	776	1985-2005	20	14/7/2000	-3.0	-5.0	-2.6
Lages	Planalto Sul	937	1913-2010	98	22/07/1915	-6.4	-8.0	-6.2
Matos Costa	Planalto Norte	1200	1991-2010	20	15/8/1991	-5.0	-7.0	-8.0
Ponte Serrada	Oeste	1100	1986-2010	24	25/7/2009	-4.6	-6.2	-6.0
Porto União	Planalto Norte	800	1940-1989	49	31/7/1955	-5.1	-6.7	-6.2
Rio Negrinho	Planalto Norte	862	1990-2010	20	3/8/1991	-3.4	-5.0	-6.0
São Joaquim	Planalto Sul	1376	1955-2010	56	2/8/1991	-7.9	-9.0	-10.0
São M. do Oeste	Oeste	700	1988-2010	23	14/7/2000 / 15/08/2009	-0.4	-3.0	-3.0
Urussanga	Litoral Sul	48	1924-2010	86	1/8/1955	-3.0	-3.6	-4.6
Videira	Meio Oeste	774	1970-2010	41	21/7/1975	-8.6	-9.3	-7.2
Xanxerê	Oeste	841	1929-1983	54	25/06/1945	-11.6	-11.1	-7.9

Fonte: Santa Catarina (2011)

Dessa forma, pode-se perceber que o território brasileiro já testemunhou temperaturas negativas em épocas passadas, resultando em fenômenos como congelamento, neve e geadas. Embora o Brasil não presencie longos períodos de neve como em países de clima temperado, a pavimentação de locais sujeitos a baixas temperaturas pede por tecnologias mais avançadas. Essas tecnologias são capazes de providenciar melhor deslocamento a seus habitantes e visitantes durante períodos de inverno rigoroso.

2.6 Ciclo de congelamento e degelo nos pavimentos

Em zonas temperadas, a transição de temperaturas negativas para positivas ocorre em longos períodos do ano e pode durar dias, até semanas (Mazurowski, 2023). O Brasil, por sua vez, tem uma parte localizada na Zona Temperada Sul,

como pode-se constatar pela Figura 10, porém não possui a característica citada anteriormente, visto que apresenta temperaturas baixas em poucas semanas do ano. No entanto, essa pequena quantidade de dias extremamente frios podem causar danos ao pavimento, de menor intensidade quando comparados aos países de zonas temperadas, mas que devem ser levados em conta na concepção de novas rodovias nas áreas frias do Brasil.

Figura 10 - Zonas climáticas do Brasil



Fonte: Nimer (1979 *apud* IBGE, 2002)

O tema discutido a seguir foi embasado em consultas a bibliografias internacionais com estudos conduzidos em locais de clima frio e temperado e, devido a variação de temperatura decorrente da zona climática em que a parte sul do país se encontra, ciclos de congelamento e degelo fazem-se presentes no inverno brasileiro. Conforme Mazurowski (2023), o ciclo F-T (*freeze-thaw*), nomenclatura dada ao ciclo de congelamento e degelo nos países de língua inglesa, ocorre quando o ar atinge temperaturas abaixo de 0°C e causa o congelamento da água presente no pavimento. Após determinado tempo, ocorre a elevação da temperatura atmosférica, ocasionando o descongelamento da água.

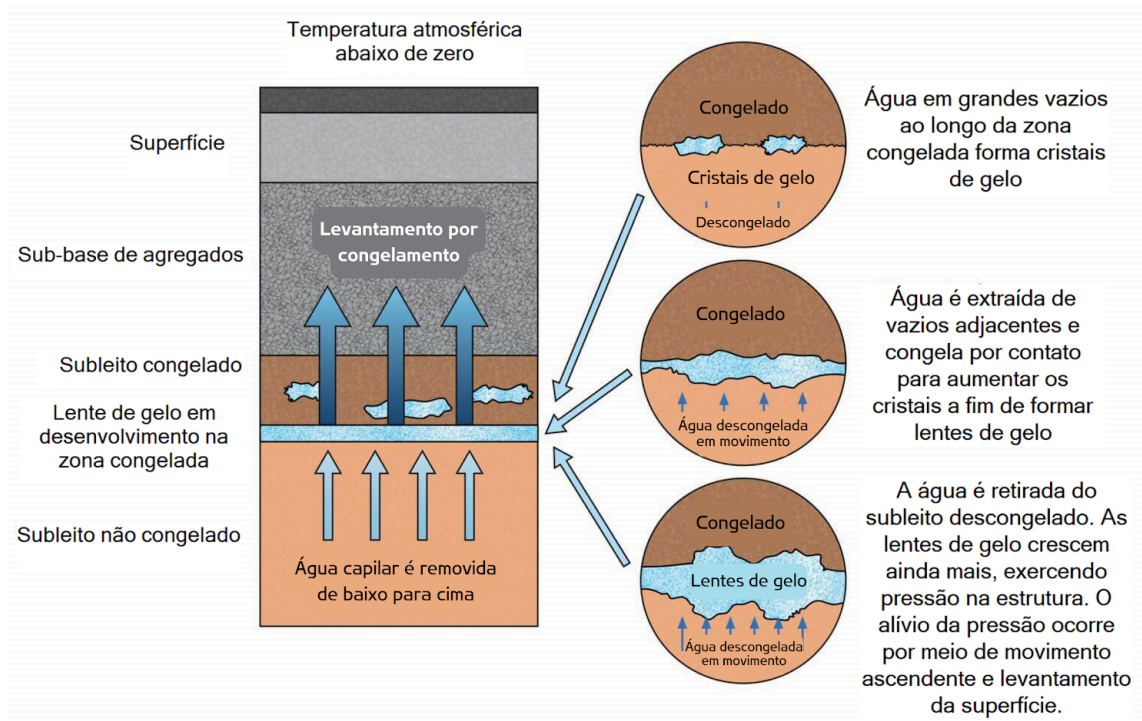
Durante o processo de intemperismo ou deterioração, a estrutura do pavimento é alterada a partir de mudanças no volume de água, separação de partículas, ampliação de rachaduras e enfraquecimento do subleito. Assim, o ciclo de congelamento e degelo deve ser excepcionalmente estudado a fim de compreender melhor seus causadores e os métodos utilizados para extinguir o problema.

2.6.1 Funcionamento do congelamento e descongelamento no pavimento

Citado por Din, Mir e Farooq (2019), os pavimentos asfálticos enfraquecem devido ao ambiente em que estão localizados e o tipo de tráfego da região, sendo trilhas de roda, fissuras por fadiga e as baixas temperaturas os maiores responsáveis por sua degradação. O revestimento, em contato com a superfície, é o primeiro a sofrer os efeitos de congelamento.

O ciclo F-T tem seu início quando a temperatura atmosférica atinge o valor de 0°C, temperatura de solidificação da água. A água, presente nos poros, vazios e rachaduras da superfície pavimentada, esfria e torna-se sólida à medida que a temperatura ideal é atingida. O congelamento da água causa aumento de até 9% em seu volume (Mazurowski, 2023). Os cristais de gelo crescem exponencialmente a forma que a água, por meio da capilaridade, sobe por ascensão e se junta aos cristais já existentes, o que propicia a criação de lentes de gelo.

Figura 11 - Levantamento por congelamento

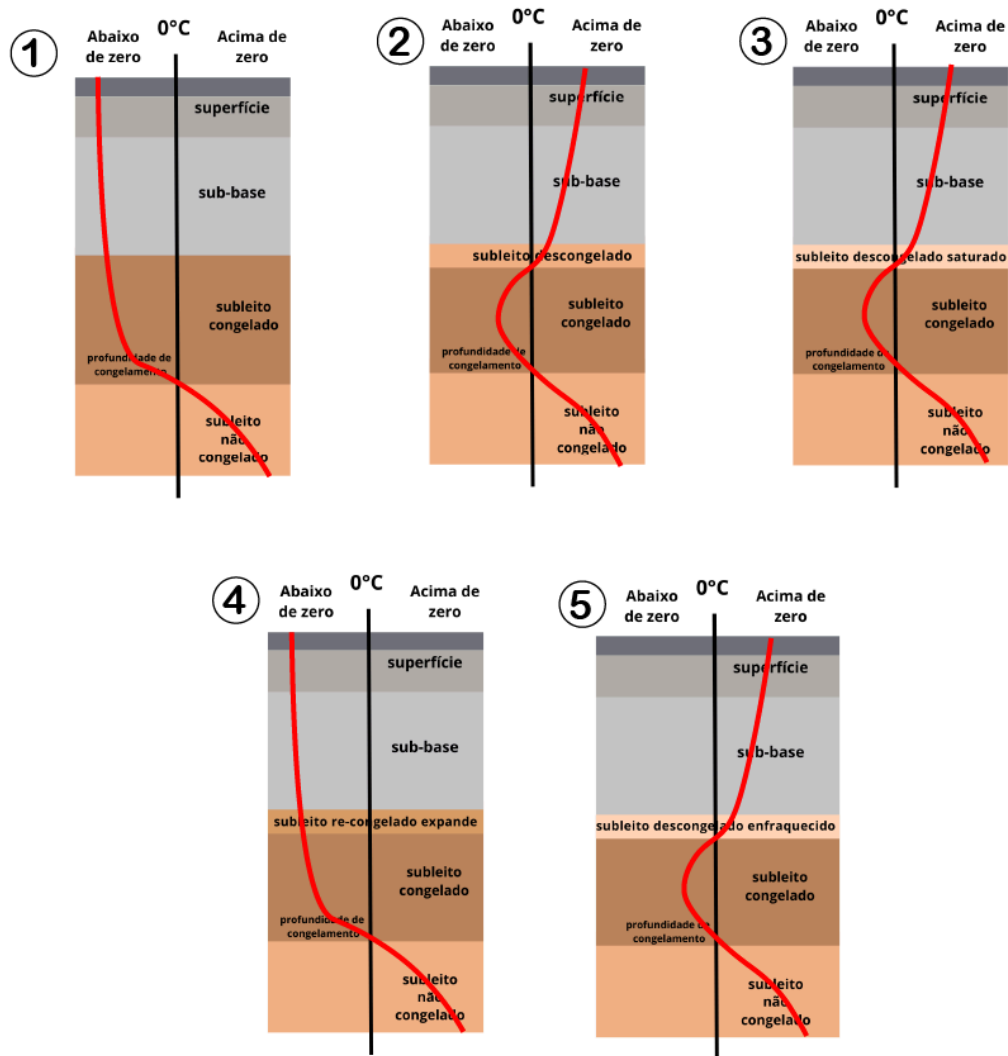


Fonte: Adaptado de Mazurowski (2023)

A Figura 11 mostra o fenômeno do levantamento por congelamento, que causa a elevação da superfície pavimentada devido a pressão exercida pela água congelada. Segundo Mazurowski (2023), a pressão de expansão gerada pela água pode atingir o valor de 220 MPa quando confinada, sendo capaz de fraturar uma rocha. Quanto maior o tempo que o ambiente está sujeito a temperaturas negativas, maior a profundidade da zona de congelamento, sendo possível atingir o subleito.

Em um momento de aquecimento, a temperatura atmosférica atinge valores maiores do que 0°C e ocasiona o aumento do calor nas camadas do pavimento. O gradiente térmico desta vez é inverso, se desenvolve da superfície até o subleito congelado e, à medida em que o processo ocorre, o pavimento se torna cada vez mais frágil. Por meio da Figura 12 existe a possibilidade de observar as 5 etapas do processo de descongelamento.

Figura 12 - Enfraquecimento do degelo



Fonte: Adaptado de Mazurowski (2023)

A etapa 01, identificada na Figura 12, corresponde ao pavimento ainda congelado, isso significa que a temperatura encontra-se abaixo de 0°C. Com isso, o subleito que existe até a profundidade de congelamento permanece gelido.

A etapa 02 caracteriza o primeiro descongelamento, a temperatura do ar aumenta e o pavimento começa a aquecer de cima para baixo. A parte superior do subleito se descongela, ao mesmo tempo em que a parte entre o subleito descongelado e a profundidade de congelamento se mantém congelada. É importante observar que abaixo da área congelada ainda persiste o subleito não congelado.

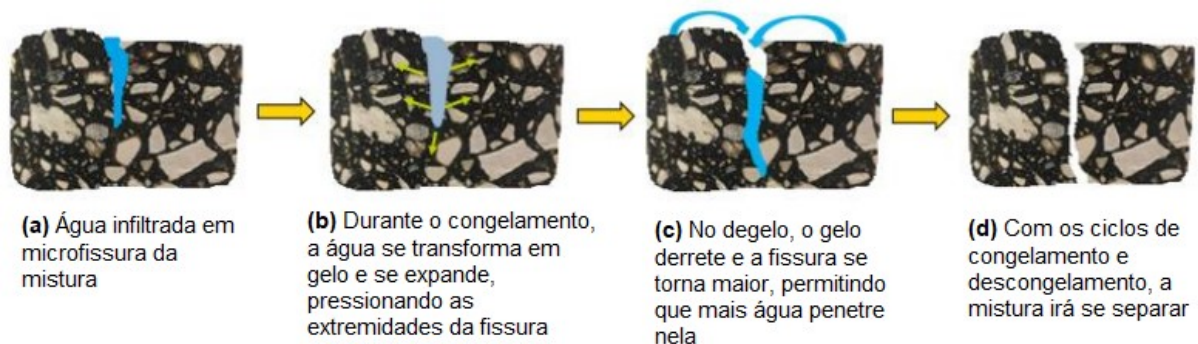
Na etapa 03, ocorre o enfraquecimento da camada descongelada, a água que está presente nela fica retida sobre o subleito congelado e a drenagem ocorre de forma lenta. Com isso, o subleito torna-se saturado e sua capacidade de suporte é reduzida.

A etapa 04 explicita o recongelamento quando há nova diminuição da temperatura do ar. A camada saturada é congelada e se expande, ocasionando o afrouxamento entre as partículas do solo.

A etapa 05 é o degelo final, que ocorre após inúmeros ciclos de congelamento e degelo, posterior ao aumento de temperatura. O subleito descongelado que está saturado encontra-se extremamente enfraquecido devido a dilatação proveniente dos ciclos anteriores e, assim, torna-se suscetível a danos causados pelo tráfego intenso e suas cargas.

É possível observar todas as etapas desse processo por meio Figura 13, que descreve desde a infiltração de água em uma pequena fissura do pavimento até a degradação total da estrutura.

Figura 13 - Influência da infiltração de água no pavimento



Fonte: Adaptado de Alawneh, Soliman e Anthony (2020)

Dessa maneira, pode-se concluir que os ciclos F-T são excepcionalmente prejudiciais ao pavimento uma vez que, por meio da dilatação proveniente da expansão da água durante seu resfriamento, sua capacidade de suporte é reduzida drasticamente.

2.7 Os efeitos decorrentes do ciclo de congelamento e degelo

O pavimento asfáltico enfraquece por dois elementos principais: o clima e o tráfego, estes fatores representam os principais responsáveis pela degradação do revestimento. A partir do momento que o pavimento está exposto à atmosfera, ele pode manifestar falhas mesmo antes de suportar a carga dos veículos. Isso sugere que o clima, bem como as características do local em que o pavimento está inserido, tem grande influência na qualidade do revestimento asfáltico.

Para Haile e Liu (2023), os pavimentos localizados em regiões de baixa temperatura têm a tendência de sofrer danos severos devido aos ciclos de congelamento e degelo a partir da mecânica de expansão da água na estrutura da construção. Uma vez em que há infiltração de água, visto que o pavimento não é completamente impermeável, a variação de temperatura causa inúmeros danos na performance do revestimento. Por meio da Figura 14, é possível observar a condição de uma estrada após ser submetida a inúmeros ciclos de congelamento e degelo.

Figura 14 - Defeitos no pavimento em Avon (Colorado)



Fonte: Autoria própria (2023)

Os efeitos decorrentes da oscilação de temperatura, que pode ir de positiva para negativa em horas, para Din, Mir e Farooq (2019) reduz a vida útil do pavimento ao danificar a ligação entre os agregados e o *binder*. A estrutura sofre com o ciclo de

tensões decorrentes da temperatura e a influência dela na mistura. Assim, dentre os fenômenos que levam o pavimento asfáltico à ruína, serão citados o comportamento viscoelástico, resistência à compressão e tração, estabilidade da mistura e tensões térmicas.

2.7.1 Comportamento viscoelástico

O ligante asfáltico possui comportamento viscoelástico, uma vez que se apresenta de forma elástica no frio e viscosa no calor. No entanto, ambos os extremos podem ser prejudiciais para o pavimento. Como já dito nesta pesquisa, a viscosidade do ligante asfáltico sofre oscilações a partir da variação de temperatura e, conseqüentemente, com os ciclos de congelamento e degelo.

Conforme Din, Mir e Farooq (2019), a deterioração da viscosidade do asfalto aumenta a cada ciclo e resulta na diminuição de sua capacidade em resistir a deformação. Em ambientes de frio extremo, Ahmad e Khawaja (2018) observaram que a temperatura é responsável por fissuras devido à contração térmica, este fenômeno pôde ser observado em quedas de temperatura de 9,5°C ou mais.

Assim, pode-se afirmar que o comportamento viscoelástico do asfalto é extremamente sensível a mudanças de temperatura. Seu comportamento em ambientes frios adiciona rigidez à mistura asfáltica e a torna mais suscetível a forças de expansão e contração, característica que implica na queda da vida útil do pavimento.

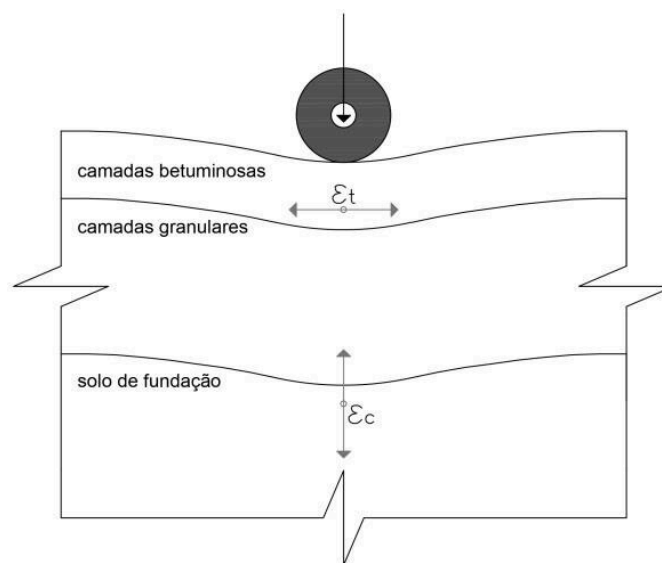
2.7.2 Resistência à compressão e tração

O asfalto, material termoviscoelástico, sofre os esforços de compressão e tração de maneiras diferentes, por suas características não serem somente elásticas ou plásticas ele pode manifestar comportamentos variados conforme o carregamento e temperatura. Comparativamente, o asfalto tende a ser menos resistente à tração do que à compressão, uma vez que as forças de tração agem

para separar suas partículas, o que exige alta resistência do material para evitar fratura.

Os pavimentos flexíveis são compostos por diversas camadas, sendo as superiores compostas por materiais betuminosos e as inferiores por materiais granulares sem a presença de ligante asfáltico. Conforme Almeida-Costa e Benta (2014), as camadas superiores suportam esforços de compressão (ϵ_c) e tração (ϵ_t), em contrapartida aquelas situadas próximas ao subleito suportam unicamente as forças de compressão (ϵ_c), como é visível na Figura 15.

Figura 15 - Esforços de compressão e tração na estrutura do pavimento



Fonte: Almeida-Costa e Benta (2014)

Como as baixas temperaturas causam o aumento da rigidez do pavimento, sua resistência à compressão e tração são alteradas. Materiais menos flexíveis possuem maior dificuldade em resistir a forças de tração, tal característica o torna mais quebradiço em temperaturas negativas e aumenta as chances de fissuração. Em contrapartida, a resistência à compressão do asfalto é aumentada em ambientes como esse, a rigidez do material o torna menos suscetível a deformações causadas pela compressão.

2.7.3 Estabilidade da mistura e volume de vazios

Os componentes da mistura asfáltica, agregados e ligantes, possuem elevada influência na qualidade do pavimento e a estabilidade desses materiais é essencial para a garantia da performance da camada nas estradas e rodovias. O procedimento responsável pela determinação da estabilidade da mistura é o Ensaio Marshall, em que os corpos de prova sofrem uma força de compressão pela prensa Marshall.

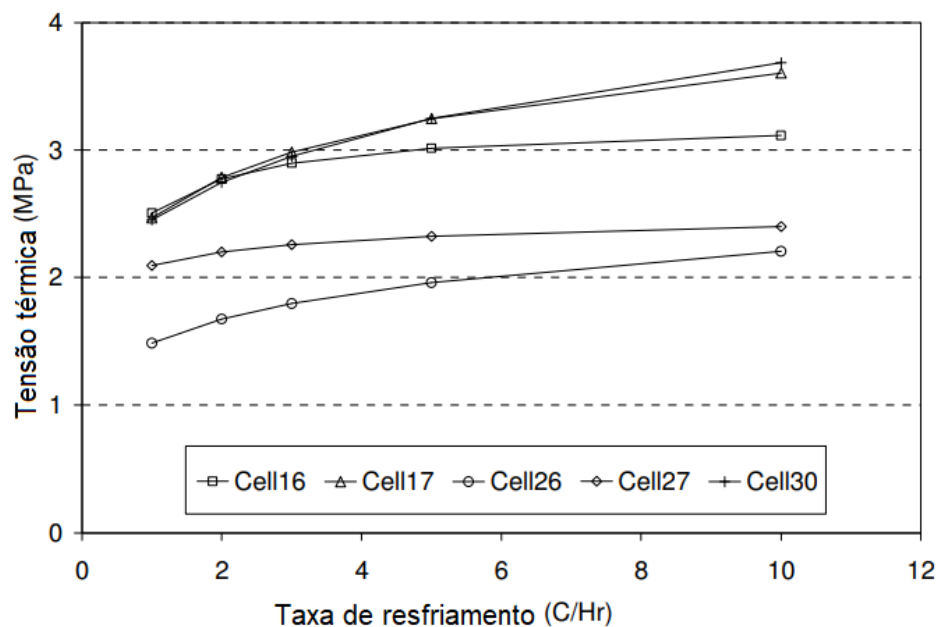
Uma pesquisa, realizada por Özgan e Serin (2013), investigou o impacto dos ciclos de congelamento e degelo na mistura asfáltica expondo-a por esses ciclos durante 24 dias. Nessa revisão, por meio da análise de resultados do ensaio Marshall, a estabilidade da camada de revestimento estudada teve seu valor diminuído em 63,8% no fim dos 24 dias. Din, Mir e Farooq (2019), autores que analisaram os ensaios feitos por Özgan e Serin, citam que foi possível observar a diminuição de vazios preenchidos por betume e o aumento de vazios nos agregados minerais. Outro fator importante para a estabilidade da mistura é o volume de vazios, este sofreu acréscimo significativo durante o estudo: o volume de vazios da camada localizada abaixo do revestimento asfáltico, conhecida como *binder*, teve aumento de 61,9% e o próprio revestimento teve valor 70% maior.

O aumento do volume de vazios e a instabilidade na mistura asfáltica podem causar defeitos no pavimento como: durabilidade reduzida e baixa resistência à trilha de rodas. De acordo com Delavy (2021), a trilha de roda, além de ter como resultado um pista irregular, está diretamente ligada ao acúmulo de água no pavimento que leva ao risco de aquaplanagem. Assim sendo, a estabilidade da mistura e a interação entre seus componentes, bem como o volume de vazios presente na camada, é de extrema importância para a garantia de um pavimento seguro e é diretamente influenciada pelos ciclos de congelamento e degelo.

2.7.4 Tensões térmicas

Apeageyi, Dave e Buttlar (2008) realizaram um estudo para verificar os efeitos da variação de temperatura no acúmulo das tensões térmicas nos pavimentos flexíveis. Eles perceberam que os locais mais frios nem sempre apresentavam as maiores taxas de resfriamento, deixando claro que não há necessidade de climas extremos para formação de fissuras térmicas e sim de grandes variações de temperatura. Pode-se observar na Figura 16 a relação entre a taxa de resfriamento e o estresse térmico que o pavimento é submetido.

Figura 16 - Taxa de resfriamento x tensão térmica



Fonte: Adaptado de Apeageyi, Dave e Buttlar (2008)

A Figura 16 apresenta 5 corpos de prova que diferem no tipo de ligante asfáltico (120-150 Pen ou AC-20, correspondente ao CAP-20) e ao tipo de tráfego (leve ou pesado):

- Cell16: tráfego pesado e ligante AC-20, com espessura de 190 mm e resistência à tração de 2,23 MPa em -10°C;
- Cell17: tráfego pesado e ligante AC-20, com espessura de 190 mm e resistência à tração de 2,44 MPa em -10°C;

- Cell26: tráfego leve e ligante 120-150 Pen, com espessura de 160 mm e resistência à tração de 2,26 MPa em -10°C;
- Cell27: tráfego leve e ligante 120-150 Pen, com espessura de 160 mm e resistência à tração de 2,90 MPa em -10°C;
- Cell30: tráfego leve e ligante 120-150 Pen, com espessura de 160 mm e resistência à tração de 2,73 MPa em -10°C.

Estes foram submetidos a taxas de resfriamento com variações de 1, 2, 3, 5 e 10°C/hora, a fim de atingir a temperatura final de -30°C. Por meio da análise de Apeageyi, Dave e Buttlar (2008), realizada em um *software* que utiliza um modelo de previsão de fissuração térmica, é notório o crescimento da tensão térmica com o aumento da taxa de resfriamento. Tal constatação afirma a influência dos ciclos de congelamento e degelo na formação de fissuras, uma vez que a mudança de temperatura influencia diretamente no ciclo.

Dessa observação tem-se a importância da variação de temperatura no surgimento de fissuras. A trinca térmica é comum em países localizados nas zonas temperadas do globo terrestre onde ocorrem transições de temperaturas positivas para negativas em um mesmo dia, resultando em defeitos graves nos pavimentos. Este fenômeno é frequente no território brasileiro, a amplitude térmica no país é elevada principalmente no inverno, manifestando-se por manhãs frias seguidas de tardes quentes.

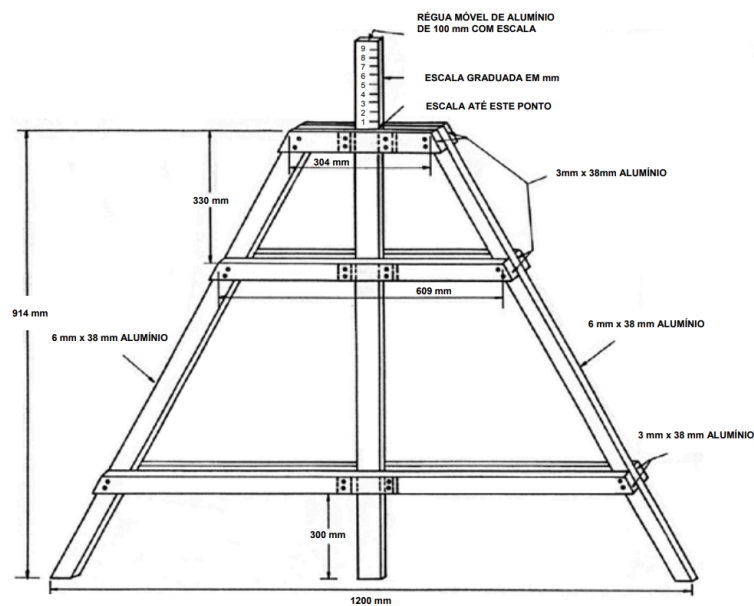
Portanto, é crucial o uso de técnicas e materiais específicos para esse clima, realizando o monitoramento constante de estradas nessas regiões e mantendo uma manutenção regular no revestimento, quando necessário. Dessa forma, o processo de surgimento das trincas térmicas, embora seja uma realidade nessas áreas, será atenuado, fato que irá contribuir para o aumento da vida útil dos pavimentos flexíveis em locais com baixas temperaturas.

2.8 Avaliação do pavimento

A avaliação funcional da superfície de um pavimento é um processo indispensável e minucioso, que visa a verificação do desempenho da camada de revestimento, propondo a identificação e classificação dos defeitos que nela existem. Fundamentada na normativa DNIT 006/2003, esta avaliação permite uma contagem precisa e uma classificação detalhada das ocorrências, fornecendo um panorama claro sobre o estado do pavimento (DNIT, 2003b). Tal procedimento é fundamental para a manutenção e aprimoramento das condições da infraestrutura viária, garantindo sua segurança, funcionalidade e durabilidade ao longo dos anos.

O serviço deve ser realizado com o auxílio de uma treliça de alumínio, conforme ilustrado na Figura 17. Este equipamento possui 1,20 m de comprimento e é dotado de uma régua móvel em seu ponto médio, o que possibilita a medição precisa das trilhas de rodas em milímetros. Para assegurar a acurácia das medições, é indispensável o uso de materiais auxiliares como trenas, giz, tinta, formulários de anotação, entre outros. Estes instrumentos complementares são essenciais para registrar e documentar as medições de forma sistemática e precisa, o que garante a integridade dos dados coletados.

Figura 17 - Treliça de alumínio



Fonte: DNIT (2003b)

O processo da avaliação do pavimento é estruturado em quatro etapas principais: localização, demarcação da superfície, medição das flechas e inventários dos defeitos. A etapa de localização consiste na identificação exata do local avaliado, seguida pela demarcação da superfície, que envolve a delimitação das áreas de interesse. A medição das flechas, por sua vez, é a fase em que é verificada a deformação do pavimento e, por fim, o inventário dos defeitos compreende a catalogação detalhada das imperfeições identificadas.

Cada uma dessas etapas é crucial para assegurar uma avaliação precisa da superfície do pavimento. Isto servirá para a formulação de estratégias de manutenção e reparo da camada, contribuindo para a longevidade e qualidade do sistema viário.

2.8.1 Localização e demarcação das superfícies a serem avaliadas

A localização da superfície analisada pode ser realizada através de duas possíveis maneiras:

- Rodovia de pista simples: A cada 20 metros, alternados em relação ao eixo, com uma periodicidade de 40 em 40 metros a cada faixa; ou
- Rodovia de pista dupla: A cada 20 metros na faixa de tráfego mais solicitada e que tem maior demanda estrutural.

Após a localização, a superfície deve ser demarcada com tinta específica e numerada de acordo com a estaca correspondente ou a distância até o marco quilométrico. E, posteriormente, dois traços auxiliares devem ser feitos, um a 3 metros antes e outro a 3 metros depois da demarcação principal, o que facilitará a identificação do trecho analisado.

Essa etapa é de extrema importância, visto que possibilita o agrupamento sistemático dos defeitos por trecho, o que confere maior especificidade nos resultados obtidos. Adicionalmente, a divisão da superfície proporciona um diagnóstico detalhado dos tipos de degradação mais recorrentes em locais

específicos da via. Isto, por sua vez, auxilia na formulação de estratégias direcionadas e específicas para os trechos.

2.8.2 Medição das flechas

A medição das flechas consiste na avaliação do afundamento das trilhas de roda na via, sendo um tópico de suma importância devido à sua relação direta com a deformação que os pneus dos veículos causam na camada de rolamento da rodovia. Ela compreende o valor, medido em milímetros, do deslocamento da camada de revestimento, como visto na Figura 18. A medição é realizada tanto na trilha de roda interna quanto externa, anotando-se o valor máximo observado em cada uma.

Figura 18 - Medição das flechas



Fonte: AGER (2021)

Este defeito não só acelera a degradação do revestimento, mas também propicia a formação de uma lâmina de água no trecho em que ocorre (Moura, 2010). O acúmulo de água nas trilhas de roda pode impedir o escoamento do líquido, o que favorece o ciclo de gelo e degelo na camada pavimentada.

2.9 Diagnóstico dos defeitos presentes na superfície

Após a avaliação do pavimento, os defeitos que nele existem são identificados de forma organizada e setorizada. Para melhor compreensão do que está exposto, é essencial realizar um diagnóstico minucioso da superfície, que não se limita apenas à identificação visual do ocorrido, mas também foca em apresentar a causa do defeito e verificar os fatores contribuintes para sua ocorrência.

No contexto da conservação de pavimentos congelados, serão priorizados os defeitos relacionados a fissuras, afundamentos, texturas irregulares e aqueles que possibilitam o contato direto da água com a estrutura do pavimento. Esta abordagem permite uma intervenção direcionada para cada tipo de defeito e auxilia na implementação de estratégias corretivas mais adequadas para a situação, visando garantir a segurança das rodovias mediante condições adversas de climas frios.

2.9.1 Trincas

As trincas, ou fissuras, presentes em um pavimento são indicadores importantes de uma deterioração na camada, especialmente em regiões sujeitas a ciclos de congelamento e degelo. Na normativa DNIT 005/2003-TER, as trincas podem ser classificadas em dois grupos principais: isoladas e interligadas. A primeira consiste em um defeito único e independente, que não se conecta a outras trincas adjacentes. Já a segunda é correspondente a um conjunto de fissuras que se conectam e formam padrões mais complexos. Em adição, existem subcategorias dessas fissuras, a fim de possibilitar uma identificação mais precisa dos defeitos.

As trincas isoladas podem ser agrupadas em:

- Trincas isoladas transversais curtas e longas (TTC e TTL);
- Trincas isoladas longitudinais curtas e longas (TLC e TLL); e
- Trinca isolada devido à retração térmica (TRR).

Já as trincas interligadas são divididas entre:

- “Jacaré” com e sem erosão nas bordas (J e JE); e

- “Bloco” com e sem erosão nas bordas (TB e TBE).

Além disso, conforme Araujo (2019), as trincas também podem ser classificadas conforme a sua espessura e gravidade:

- FC-1 para fendas de até 1 mm;
- FC-2 para fendas superiores a 1 mm e sem erosão em suas bordas; e
- FC-3 para fendas superiores a 1 mm e com erosão em suas bordas.

A Figura 20 ilustra alguns tipos de fissuras, destacando trincas isoladas à esquerda e trincas interligadas à direita. Este tipo de defeito é extremamente prejudicial ao pavimento uma vez que permite a entrada de água em sua estrutura. Durante períodos frios, a água se expande e se contrai, aumentando ainda mais as trincas e acelerando a degradação do pavimento.

Figura 20 - Exemplos de fissuras



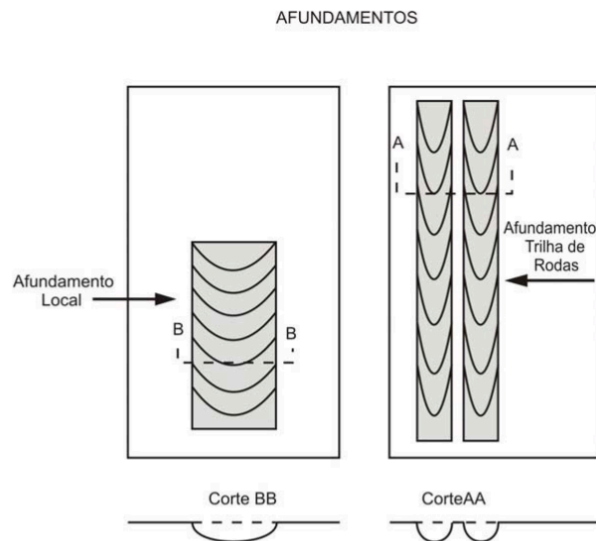
Fonte: Fan *et al.* (2023)

2.9.2 Afundamentos

Os afundamentos são depressões existentes na camada de rolamento e podem ter duas origens: afundamento de origem plástica ou afundamento de consolidação. De acordo com a norma DNIT 005/2003-TER, o afundamento plástico ocorre devido à fluência plástica de alguma camada do pavimento, enquanto o

afundamento de consolidação é causado pela diferença de consolidação entre as camadas. Este tipo de defeito pode se manifestar se forma localizada ou ao longo das trilhas de rodas, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Afundamentos no pavimento



Fonte: DNIT (2003a)

Os afundamentos em pavimentos, independentemente de sua origem, têm um impacto significativo na segurança da via. Esses defeitos proporcionam o acúmulo de água na camada superficial de rolamento, o que propicia a formação de lâminas que favorecem a aquaplanagem em dias de chuva. Além disso, a água também pode infiltrar-se em camadas do pavimento e ser congelada durante um período de temperaturas baixas, o que causa a expansão do material e acelera a propagação dos defeitos já existentes.

Os afundamentos podem ser agrupados em:

- Afundamento plástico local (ALP);
- Afundamento plástico de trilha (ATP);
- Afundamento de consolidação local (ALC); e
- Afundamento de consolidação de trilha (ATC).

2.9.3 Outros defeitos de pavimento e possíveis causas

Além dos defeitos previamente mencionados, é crucial abordar outros defeitos que afetam significativamente a funcionalidade dos pavimentos, especialmente em regiões que sofrem com baixas temperaturas. Entre eles, tem-se como destaque as panelas e remendos, que devem ser diagnosticados de forma minuciosa em relação ao tema de pavimentos congelados, visto que possibilitam maior contato da água com a camada de rolamento. A água é considerada a maior inimiga de um pavimento em regiões de clima frio e sua interação com ele deve ser reprimida ao máximo para preservar a infraestrutura viária.

As panelas são pequenos buracos presentes no pavimento, caracterizadas por serem uma depressão na superfície, sua presença pode favorecer o acúmulo de água no local, e, conseqüentemente, a penetração de água na camada. Remendos são intervenções realizadas para corrigir defeitos na camada de rolamento, porém sua má execução pode resultar em diferenças na textura e espessura do revestimento, criando novos pontos de vulnerabilidade. Estes problemas são de extrema importância e devem ser avaliados, diagnosticados e tratados de forma rápida e eficiente.

Além disso, para a realização do diagnóstico dos defeitos, é fundamental a compreensão de suas causas. Sendo assim, Rocha e Costa (2009) elaboraram uma tabela detalhando as prováveis causas de diversos defeitos de pavimento, como observado na Tabela 04. Este elemento é de extrema valia para profissionais da área, visto que fornece um resumo de possibilidades diagnósticas dos defeitos encontrados.

Tabela 04 - Causas dos defeitos de pavimento

DEFEITO		DESCRIÇÃO	PROVÁVEIS CAUSAS
Trincas Isoladas	Longitudinais	Apresenta direção predominante paralela ao eixo da via.	Junta de construção mal executada. Contração / dilatação do revestimento. Propagação de trincas de camadas subjacentes.
	Transversais	Apresenta direção predominante ortogonal ao eixo da via.	Contração / dilatação do revestimento. Propagação de trincas de camadas subjacentes.
Trincas Interligadas	Jacaré	Assemelhando-se ao couro de jacaré ou crocodilo.	Ação repetida das cargas de tráfego.
	Bloco	Configuração próxima a um retângulo, podendo os blocos apresentar vários tamanhos.	Variações térmicas. União de trincas transversais e longitudinais.
Afundamento	Plástico	Apresenta além da depressão na região das trilhas de rodas um sollevamento lateral.	Ruptura das camadas do pavimento pela ação do tráfego.
	Consolidação	Caracteriza-se por uma depressão do revestimento na região das trilhas de roda.	Compactação insuficiente das camadas. Mistura asfáltica com baixa estabilidade. Infiltração de água nas camadas.
Ondulação/ corrugação		Caracteriza-se por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento de caráter plástico e permanente	Instabilidade da mistura betuminosa ou base. Excesso de umidade das camadas. Materiais estranhos na mistura. Retenção da água na mistura.
Deterioração de remendos		Região do pavimento onde ocorreu substituição do material original.	Tráfego intenso. Uso de materiais de má qualidade. Condições ambientais agressivas. Problemas construtivos.
Painéis		Cavidade que se forma num primeiro estágio no revestimento apresentando dimensões variadas.	Trinca por fadiga. Desgaste de alta severidade.

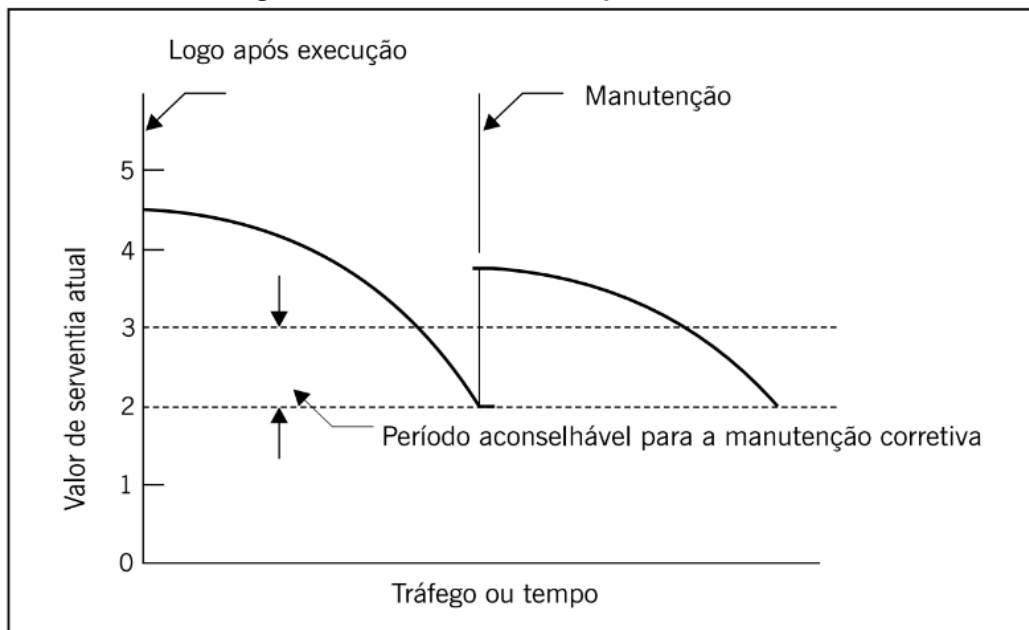
Fonte: Rocha e Costa (2009)

2.10 Conservação do pavimento

O tópico de conservação rodoviária refere-se a um conjunto de práticas e técnicas voltadas para a manutenção e melhoria das condições dos pavimentos ao longo dos anos. Esse conjunto de atividades, que incluem ações preventivas e corretivas, visa garantir a estabilidade, segurança e durabilidade das vias. Para uma gestão eficaz das rodovias, é necessário um estudo detalhado das metodologias e tecnologias empregadas na conservação de pavimentos, sendo definidas as medidas necessárias, orçamentação dos serviços e programação das atividades.

As ações de preservação servem para que o pavimento se mantenha funcional em todo o seu tempo de operação. Com os anos e o uso, o desempenho do material diminui, exigindo manutenções periódicas para assegurar a eficiência e a funcionalidade do sistema. Conforme ilustrado na Figura 22, o pavimento perde suas características originais de forma gradual, tornando indispensável a aplicação de técnicas de conservação e manutenção para restabelecer sua estabilidade e melhorar a qualidade da via.

Figura 22 - Relação entre tempo e intervenção



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Em contrapartida, é fundamental distinguir conservação e restauração rodoviária. A conservação visa melhorar a qualidade do pavimento através de técnicas específicas, enquanto a restauração é aplicada para rodovias já em estado crítico, onde há necessidade de remoção total ou parcial da camada deteriorada. A conservação do pavimento existe para que não seja necessária a restauração dele.

Assim, é possível afirmar a importância de técnicas de conservação rodoviária no contexto das estradas brasileiras. Esse tipo de trabalho desempenha um papel crucial na manutenção da infraestrutura viária do país e garante a segurança e funcionalidade das rodovias. A prática é essencial para o prolongamento da vida útil do pavimento, uma vez que auxilia a prevenir a deterioração acelerada causada por fatores ambientais e pelo tráfego intenso. Logo, a conservação dos pavimentos é uma prática vital para a gestão eficiente das rodovias brasileiras.

2.10.1 Conscientização ambiental e econômica

Um fator importante acerca da conservação de pavimentos é o cuidado com o meio ambiente e a importância econômica dessa ação. É sabido que essa prática é sustentável ambiental e economicamente se comparada com a correção do pavimento, que gera resíduos excessivos e necessita de novos materiais para sua realização. Sendo assim, o enfoque na conservação dos pavimentos contribui para a otimização dos recursos públicos, promovendo um equilíbrio entre desenvolvimento e sustentabilidade.

O setor de pavimentação rodoviária é de extrema necessidade nos dias atuais, porém sua existência pode causar danos ao meio ambiente. Conforme Ribeiro *et al.* (2018) “o segmento (...) contribui de forma negativa em termos da produção de poluentes atmosféricos, causando elevado impacto na qualidade do ar”, tal afirmação explicita a necessidade de frear o uso de materiais asfálticos. Essa conquista pode ser alcançada por meio do uso de técnicas de conservação.

A Resolução nº 23 do CONAMA de 2010 aprovou o “MN-050.R-5 - CLASSIFICAÇÃO DE ATIVIDADES POLUIDORAS”, um documento que classifica as

atividades com base em seu potencial poluidor e que possui considerações sobre conservação e pavimentação de estradas. Na Tabela 05 é possível visualizar a comparação entre as atividades.

Tabela 05 - Potencial poluidor de atividades

DESCRIÇÃO	PP
Obras públicas de urbanização – implantação, ampliação, pavimentação e manutenção de vias urbanas, praças, etc.	I
Pavimentação de estradas e pavimentação especial, exceto as obras e intervenções de conservação ou melhorias, nos limites da faixa de domínio de rodovias, previstas no art. 2º da Resolução CONEMA nº 04, de 18/11/ 2008.	B

A = Alto
M = Médio
B = Baixo
I = Insignificante

Fonte: Adaptado de Brasil (2010)

Por meio do material acima pode-se verificar que a pavimentação de estradas possui potencial poluidor, ou possibilidade de causar poluição, considerado “B-BAIXO”, já as obras de manutenção de vias urbanas têm potencial poluidor “I-INSIGNIFICANTE” para a pesquisa. A partir da avaliação desse material é possível afirmar que a conservação (descrita como manutenção) polui menos do que a pavimentação tradicional, necessária em casos de recuperação. Dito isso, existem benefícios ambientais em priorizar essa prática.

Além do viés ambiental, a técnica de conservação possui custo significativamente reduzido se comparado à recuperação total do pavimento. Fortes (1994) reforça a diferença de custo entre os dois:

Se os recursos disponíveis são insuficientes para investir na manutenção das rodovias, o problema se agrava quando há necessidade de reconstruir o pavimento, pois esta prática implica maior alocação de recursos financeiros.

É importante destacar que as manutenções são uma alternativa economicamente mais saudável para os cofres públicos, pois abordam de forma pontual os defeitos presentes, sem a necessidade de intervenções em grandes áreas. Em adição, a conservação do pavimento abrange práticas, em sua maioria,

mais rápidas de serem realizadas, o que possibilita que a via se mantenha interditada por menos tempo. Em conclusão, o último tópico a ser abordado é o valor dos materiais empregados, que são significativamente inferiores aos utilizados para a recuperação completa. Além disso, na maioria das vezes, não há necessidade de utilizar máquinas de grande porte, o que também contribui para a redução de despesas.

2.10.2 Drenagem

O sistema de drenagem consiste em captar e conduzir as águas que estão sobre a pista e suas adjacências de forma rápida e eficiente (Brasil, 2005). Para evitar defeitos de pavimentos decorrentes do acúmulo de água, que se agravam com o congelamento, a drenagem da pista deve ser feita de forma planejada e integrada. É possível observar dispositivos de drenagem nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 - Boca coletora múltipla



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 24 - Boca coletora lateral

Fonte: Autoria própria (2023)

A presença de coletores de água ao longo da via é de extrema importância para que não haja acúmulo de água. Nas figuras acima podem ser observados dois dispositivos utilizados na cidade de Denver, Colorado, que enfrenta longos períodos com neve e adotou essa estratégia para evitar defeitos em seu pavimento.

Outro fator importante a respeito da drenagem é a necessidade de constantes manutenções a fim de evitar acúmulo de materiais que possam comprometer a eficiência do sistema. A limpeza deve ser feita como parte das técnicas de conservação do pavimento, assegurando que o equipamento funcione plenamente e garanta a funcionalidade da via. Na Figura 25 é possível observar uma boca de lobo parcialmente coberta por gelo, o que impede seu pleno funcionamento.

Figura 25 - Boca de lobo obstruída

Fonte: Autoria própria (2023)

A obstrução do sistema de drenagem pode gerar o acúmulo de água na pista, como na Figura 26. Esse fenômeno resulta na formação de uma lâmina de água, que facilita a penetração do líquido nas camadas do pavimento, causando defeitos mencionados anteriormente neste trabalho.

Figura 26 - Empoçamento de água

Fonte: Autoria própria (2023)

Sendo assim, a manutenção do sistema de drenagem é essencial para garantir o funcionamento das vias. A eficiência na remoção de água da superfície da camada previne danos estruturais e redução da vida útil do pavimento. Por fim, a prática de conservação e manutenção adequada da drenagem da via representa uma economia significativa a longo prazo, reduzindo a necessidade de reparos extensivos.

2.10.3 Conservação corretiva rotineira *versus* conservação preventiva periódica

O Manual de Conservação Rodoviária elaborado pelo DNIT em 2005 divide as tarefas de conservação em 5 grupos diferentes:

- Conservação Corretiva Rotineira;
- Conservação Preventiva Periódica;
- Conservação de Emergência;
- Restauração; e
- Melhoramentos da Rodovia.

Neste capítulo serão abordados diretamente os dois primeiros grupos. A presente análise incluirá as ações específicas de cada macroatividade e as principais diferenças entre elas. A conservação especificada como corretiva rotineira refere-se a um conjunto de operações destinadas a reparar ou sanar um defeito presente na infraestrutura rodoviária (Brasil, 2005). A Tabela 06 apresenta uma especificação detalhada dos tipos de serviços desse grupo, associados diretamente aos defeitos causados ou agravados pela presença de água, um dos principais fatores problemáticos de pavimentos congelados.

Tabela 06 - Conservação corretiva rotineira

Conservação Corretiva Rotineira	
Serviço	Descrição
Selagem de trinca	Enchimento de trinca e fissuras no revestimento betuminoso com material asfáltico para impedir a penetração de água nas camadas inferiores.
Tapa buraco	Reparar buraco ou depressão secundária no revestimento, de modo a evitar maiores danos ao pavimento.
Remendo profundo com demolição mecanizada	Remover a base defeituosa, substituir o material de suporte deficiente e recuperar o revestimento com mistura asfáltica. Se necessário, execute drenagem.
Remendo profundo com demolição manual	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Os defeitos presentes no pavimento devem ser corrigidos com a maior celeridade possível para evitar o agravamento das condições da via e comprometer a segurança dos usuários. Ademais, em períodos frios do ano, é crucial evitar o acúmulo de água sobre esses defeitos, tornando a necessidade de correção ainda mais urgente. Sendo assim a Tabela 07 apresenta os prazos definidos pelo Contrato de Restauração e Manutenção (CREMA) para a execução dessas correções.

Tabela 07 - Conservação corretiva rotineira

Ações e Prazos (AP) para correção	
Caracterização	Prazo
Correção de panela ou buraco	24 horas
Correção de depressão ou recalque	1 semana
Correção de exsudação	1 mês
Correção de trincas severas	1 mês
Correção de flechas nas trilhas de roda	1 mês

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Por outro lado, o serviço de conservação preventiva periódica tem como objetivo principal evitar o surgimento de defeitos e também prevenir o agravamento dos existentes. Essas atividades devem ser realizadas com frequência durante o ano, garantindo a integridade do pavimento. É possível observar os itens na Tabela 08.

Tabela 08 - Conservação preventiva periódica

Conservação Preventiva Periódica	
Serviço	Descrição
Recomposição de revestimento primário	Corrigir o desgaste da ação do tráfego e da erosão na pista de rolamento através da adoção de material selecionado, com objetivo de recompor a seção transversal
Capa selante com pedrisco	Aplicação de material betuminoso, seguida de imediata aplicação do agregado, tem como finalidade corrigir os revestimentos esgarçados, restabelecer a impermeabilização e servir como antiderrapante
Lama asfáltica fina	Aplicação de uma mistura fluida de agregado miúdo, filler, emulsão asfáltica e água
Recomposição de revestimento com areia asfalto a frio/a quente	Aplicação de uma capa de mistura asfáltica para corrigir defeitos na superfície.
Recomposição de revestimento com mistura betuminosa a frio/a quente	Aplicação de uma capa de mistura asfáltica para corrigir defeitos na superfície e recompor a seção transversal
Combate à exsudação com pedrisco	Espalhamento manual de agregado sobre a superfície, serve para evitar escorregamento em líquidos.
Tratamento superficial duplo com asfalto polímero	Duas aplicações sucessivas de ligante modificado por polímero tipo SSB cobertas cada uma por camada de agregado mineral
Micro revestimento de pré-misturado a frio com asfalto polímero	Associação de agregados, filler, emulsão asfáltica modificada por polímero tipo SSB, água e aditivos, de consistência fluida.
Concreto betuminoso usinado a quente com asfalto polímero	Mistura usinada constituída de agregados, filler e CAP modificado por polímero tipo SSB, espalhado e comprimido a quente

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Em suma, é possível verificar que existem diversos serviços para garantir a qualidade das estradas brasileiras. A rápida intervenção nos defeitos, especialmente no inverno, é essencial para evitar problemas cotidianos e aqueles associados ao congelamento. Por sua vez, a manutenção preventiva deve ser constante em todos os períodos do ano, assegurando as condições ideais de trafegabilidade. Logo, a combinação dos dois tipos de conservação é essencial para a qualidade e durabilidade da infraestrutura rodoviária em regiões sujeitas a baixas temperaturas.

2.10.4 Técnicas de conservação para pavimentos flexíveis

Neste item, serão apresentadas, de forma detalhada, diversas práticas de conservação de pavimentos. Este serviço é de extrema importância para a manutenção e integridade das vias, uma vez que proporciona a funcionalidade do local. As técnicas abordadas reduzem a necessidade de intervenções corretivas e os custos associados a elas, tornando essa prática mais benéfica estrutural e financeiramente.

2.10.4.1 Reparos em camadas saturadas

O reparo em camadas saturadas do pavimento é especificado pela Instrução de Serviço de Conservação 09/04 (ISC 09/04) do Manual de Conservação do DNIT. Esse serviço consiste no tratamento de camadas do pavimento em que há presença de água confinada, seguindo as diretrizes estabelecidas pelas normas DNIT 141/2022 – ES e DNIT 015/2006 - ES. Para a manutenção em base, sub-base ou subleito são necessários:

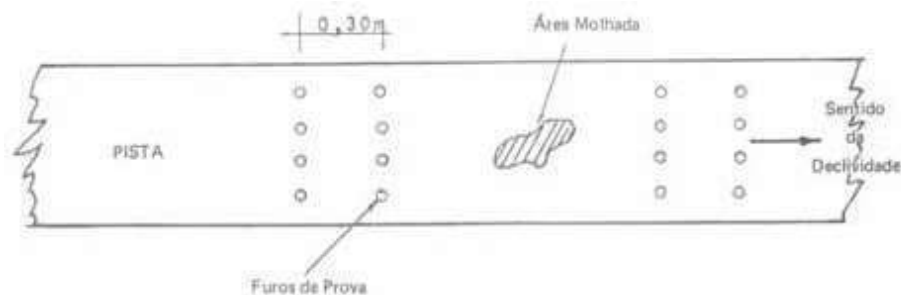
- Solos;
- Mistura de solos;
- Escória;
- Mistura de solos com materiais britados; e
- Conjunto de sinalização.

As etapas executivas compreendem, conforme Brasil (2005):

1. Demarcação da área a ser corrigida e seus dois limites extremos;
2. Inspeção, limpeza e, se necessário, reparo do sistema de drenagem;
3. Verificação do sistema de drenagem superficial e profunda nas seções em corte;
4. Verificação das condições da pista de rolamento e acostamentos;
 - a. Pista de rolamento: Investigar a existência de trincas e fissuras e, caso sejam constatadas, proceder com os tratamentos necessários;

- b. Acostamento: Verificar a permeabilidade e declividade do local e, quando necessário, realizar a recomposição do local a fim de restabelecer as condições ideais;
5. Localização de possíveis minas d'água: verificação da presença de manchas úmidas no pavimento e expulsão de água pelas fendas, especialmente em períodos sem chuva.
 - a. Realizar a abertura de furos de prova (Figura 27) antes e depois das áreas molhadas, com uma profundidade suficiente para atingir os materiais secos;
 - b. Após a localização da mina, deve ser realizado um estudo para definir e realizar um sistema de drenagem adequado para a situação;
 - c. Testar a eficácia da drenagem implementada para garantir a correção e cessar a expulsão de água;
 - d. Promover a recomposição do subleito e das camadas do pavimento.

Figura 27 - Localização de minas



Fonte: Brasil (2005)

2.10.4.2 Reparos das camadas de base e sub-base

O reparo das camadas de base e sub-base é detalhadamente descrito pela ISC 10/04 do Manual de Conservação do DNIT. Ele inclui a correção de camadas de solo estabilizado, macadame hidráulico, macadame betuminoso e solo-cimento, tratando sobre seus defeitos. São utilizadas duas normativas para embasamento da instrução: DNIT 108/2009 - ES e DNIT 141/2022 – ES. Os materiais necessários incluem: solos, mistura de solos, escória e mistura de solos com materiais britados.

Já os equipamentos utilizados para o serviço são:

- Motoniveladora pesada com escarificador;
- Carro tanque distribuidor de água;
- Rolos compactadores (pé-de-carneiro, liso, liso-vibratório e pneumático);
- Grade de discos;
- Pulvi-misturador e central de mistura;
- Soquetes mecânicos, manuais e placas vibratórias.

Com base em Brasil (2005), a execução do serviço compreende as etapas a seguir:

1. Demarcação da área em formato de quadriláteros ao redor do defeito, ultrapassando seu contorno em, no mínimo, 20 cm;
2. Escarificação do revestimento até cerca de 50 cm dos limites demarcados e remoção do material;
3. Remoção das camadas inferiores até a obtenção de superfície firme, podendo chegar até o subleito, se necessário;
4. Efetuar o nivelamento da superfície firme, respeitando a declividade de 8(V):1(H) das paredes da caixa;
5. Limpeza da cava e remoção dos materiais soltos e desagregados;
6. Instalação de dispositivos de drenagem profunda e/ou superficial, conforme necessidade. Caso exista água ou camada saturada no local, deve ser realizado o sistema de drenagem estrutural, conforme a ISC 09/04;
7. Recomposição do subleito (caso necessário):
 - a. Espalhamento de material, com características equivalentes ou superiores ao do subleito existente, e correção de umidade. A camada deve ser compactada com rolos compactadores ou soquetes até atingir a espessura de 10 cm a 15 cm;
 - b. Realização de camadas sucessivas até o topo da camada do subleito.
8. Recomposição da camada de sub base e base:
 - a. Espalhamento de material, idêntico ao da base primitiva, e correção de umidade;

- b. Compactação da camada: iniciada na borda externa da camada. A compactação das camadas seguintes deve incluir um terço da largura da faixa já concluída. A camada deve possuir espessura entre 10 cm e 15 cm;
 - c. Realização de camadas sucessivas até onde for necessário.
9. Imprimação da base com CM-30 ou emulsão asfáltica (proteger o local até sua completa cura).
 - a. Caso a base seja de solo-cimento, é recomendado a adição de aditivo à mistura para acelerar o tempo de cura e evitar que o trecho fique parado por muito tempo.
10. Colocação da camada existente:
 - a. Tratamento superficial duplo: Realização do revestimento com base na norma DNIT 147/2012 - ES;
 - b. CBUQ: Execução da camada com o existente na norma DNIT 033/2021 – ES.

2.10.4.3 Reparos de defeitos dos pavimentos betuminosos em áreas restritas

O tipo de reparo especificado é definido pela ISC 11/04 do Manual de Conservação do DNIT. Ele configura a recuperação de defeitos como exsudação, desagregação, desgaste, agregado polido e escorregamentos. Para seu completo entendimento devem ser verificadas as Normas: DNIT 154/2010 - ES, DNIT 144/2014 - ES, DNIT 145/2014 - ES, DNIT 139/2010 - ES, DNIT 141/2022 – ES, DNIT 153/2010 - ES e DNIT 031/2006 - ES. O material utilizado será:

- Brita graduada (para recomposição da base e sub-base);
- CM-30 ou emulsão asfáltica (para intervenções na base);
- Mistura betuminosa de pré-misturado a frio (para áreas pequenas);
- Concreto asfáltico (para recomposição de panos ou segmentos inteiros);
- Brita (para realização das sangrias) conforme Tabela 09;

Tabela 09 - Granulometria de brita para sangrias

Peneiras		% , em peso, passando
Pol.	mm	
1 ½"	38,1	100
1"	25,4	75 - 100
¾"	19,1	25 - 80
½"	12,7	0 - 15
3/8"	9,5	0 - 5
nº 4	4,8	0

Fonte: DNIT (2010d)

Os equipamentos necessários para a execução do serviço são resumidos por: caminhões com caçambas, compressor de ar, perfuratrizes pneumáticas com implemento de corte, retro-escavadeira, soquetes mecânicos e/ou vibratórios portáteis, distribuidor de produtos betuminosos, rolo pneumático, rolo vibratório liso e conjuntos de sinalização.

O reparo deve ser feito pelos passos descritos por Brasil (2005):

1. Demarcação do perímetro da área degradada em formato de quadriláteros
2. Remoção do revestimento até a obtenção de profundidade adequada para realizar a recomposição do pavimento (podendo chegar até o subleito);
3. As paredes da escavação devem respeitar a declividade de 8(V):1(H);
4. Interligação da caixa com os dispositivos de drenagem profunda e/ou superficial, ou por sangrias;
5. Regularização da camada existente de modo a proporcionar a compactação de uma camada de no mínimo 15 cm que está imediatamente abaixo do revestimento existente;
6. Preenchimento da caixa com brita graduada até o topo das camadas granulares em camadas sucessivas de 10 cm a 15 cm compactadas uma a

- uma por soquetes mecânicos manuais. Devem ser verificados a geometria e teor de umidade e corrigido, caso necessário;
7. Imprimação com CM-30 ou emulsão asfáltica;
 8. Enchimento da caixa com mistura betuminosa até o nível da superfície;
 9. Aplicação de pintura de ligação;
 10. Espalhamento da lama asfáltica de forma lenta e uniforme;
 11. Verificação e correção de possíveis falhas imediatamente após a aplicação da lama asfáltica;
 12. Liberar o tráfego:
 - a. Emulsão catiônica: de 2 a 3 horas após a finalização do serviço;
 - b. Emulsão aniônica: prazo indeterminado, dependendo das condições de ruptura;
 13. Verificar o acabamento e conferir se a nova superfície se torna indistinguível após a abertura do tráfego.

2.10.4.4 Reparos em ondulações, afundamentos e trilhas de roda

O reparo para esses defeitos é descrito pela ISC 12/04 do Manual de Conservação do DNIT. Esse serviço tem como objetivo a recuperação do pavimento que possui os seguintes defeitos: ondulações, afundamentos e trilhas de roda. A instrução tem como referência as Normas: DNIT 154/2010 - ES, DNIT 144/2014 - ES, DNIT 145/2014 - ES, DNIT 139/2010 - ES, DNIT 141/2022 – ES, DNIT 153/2010 - ES e DNIT 031/2006 - ES.

O serviço necessita dos seguintes materiais para ser realizado:

- Brita graduada (para recomposição da base e sub-base);
- CM-30 ou emulsão asfáltica (para intervenções na base);
- Mistura betuminosa de pré-misturado a frio (para áreas pequenas); e
- Concreto asfáltico (para recomposição de panos ou segmentos inteiros).

Serão utilizados os seguintes equipamentos: caminhões com caçambas, compressor de ar, perfuratrizes pneumáticas com implemento de corte,

retro-escavadeira, soquetes mecânicos e/ou vibratórios portáteis, distribuidor de produtos betuminosos, rolo pneumático, rolo vibratório liso e conjuntos de sinalização.

A execução dos serviços obedece a seguinte ordem (Brasil, 2005):

1. Limpeza extensiva da área a ser reparada, feita de preferência por vassoura mecânica ou de piaçava, quando a primeira não estiver disponível;
2. Remoção dos detritos e jateamento de ar comprimido na área;
3. Demarcação da área a ser reparada;
4. Aplicação da pintura de ligação com CM-30 ou emulsão asfáltica;
5. Preenchimento do rebaixo com mistura asfáltica (de preferência, usinada a quente):
 - a. Lançamento da mistura com espessura entre 3 cm e 8cm. Caso seja mais profundo que 8 cm, devem ser realizadas camadas sucessivas, respeitando as especificações;
 - b. Realizar o espalhamento do material com motoniveladora (em áreas maiores) ou de forma manual com ancinho;
 - c. Verificar a planicidade das camadas;
 - d. Realizar o chanframento das camadas;
 - e. Promover a compactação dos materiais preferencialmente por rolo pneumático ou com rolo liso metálico ou vibratório;
 - f. Fazer o lançamento da mistura de revestimento (de preferência CBUQ) logo após a finalização da camada de regularização;
 - g. Realizar a compactação exclusivamente no sentido longitudinal do tráfego;
 - h. Finalizar com os acabamentos: superfície harmônica e bem acabada, lisa e com drenagem funcional.

2.10.4.5 Reparos em falhas, panelas e buracos

O reparo de falhas, panelas e buracos é especificado pela ISC 13/04 e define os procedimentos a serem executados para a execução da manutenção. Ele se baseia nas normas técnicas DNIT 154/2010 - ES, DNIT 144/2014 - ES, DNIT 145/2014 - ES, DNIT 139/2010 - ES, DNIT 141/2022 – ES, DNIT 153/2010 - ES e DNIT 031/2006 - ES. Os materiais utilizados são:

- Material de recomposição do pavimento: brita graduada;
- Imprimação e pintura de ligação: asfalto diluído CM-30 ou emulsão asfáltica;
- Revestimento: mistura betuminosa pré-misturada a frio ou concreto betuminoso para áreas maiores;
- Execução das sangrias: brita.

Além disso, são necessários equipamentos específicos para esse tipo de serviço, tais como: caminhões com caçambas, compressor de ar, perfuratrizes pneumáticas, retro-escavadeira, soquetes mecânicos, distribuidor de produtos betuminosos, rolo pneumático e vibratório, sinalização adequada.

A etapa executiva, conforme Brasil (2005), depende do tipo de pavimento e pode ser dividida em: pavimentos constituídos de CBUQ e pavimentos constituídos de tratamento superficial. Sendo assim:

1. CBUQ

- a. Demarcação do perímetro do defeito em forma de quadrilátero, conforme Figura 28;

Figura 28 - Demarcação da área



Fonte: São Paulo (2019)

- b. Corte e remoção do material degradado, formando bordas verticais;
- c. Interligação da caixa com os dispositivos de drenagem profunda e/ou superficial, ou por sangrias;
- d. Limpeza da caixa com vassouras ou jato de ar comprimido (não pode existir material solto em seu interior);
- e. Aplicação de pintura de ligação com emulsão asfáltica (para revestimento) ou CM-30 (para base). Deve-se cobrir o fundo e as paredes da caixa;
- f. Enchimento da caixa com material de reposição (pré-misturado a quente ou a frio, ou CAP)
 - i. Lançamento com pás quadradas (Figura 29), do bordo até o centro;

Figura 29 - Enchimento da caixa



Fonte: Gaspar (2022)

- ii. A espessura compactada deve ser de 3 cm a 8 cm e, caso a profundidade seja maior, deve ser feito por camadas;
- iii. Espalhamento com ancinho umedecido com óleo queimado.
- g. Compactação da mistura das bordas para o centro (na última camada deve ser feita também na faixa adjacente para que não haja separação entre o pavimento antigo e o reparo);
- h. Verificação do acabamento e harmonia com a via.

2. Tratamento superficial

- a. Demarcação do perímetro do defeito em forma de quadrilátero;
- b. Corte e remoção do centro para os bordos
 - i. Paredes devem ser verticais e a escavação irá até o fundo da camada danificada;
 - ii. Interligação da caixa com os dispositivos de drenagem profunda e/ou superficial, ou por sangrias;
- c. Limpeza e remoção de todo o material da cava com vassoura e, se possível, jatear com o bico de ar comprimido para remover o material pulverulento;

- d. Preenchimento com material granular semelhante ao da base. As camadas devem ter de 10 cm a 15 cm e serem compactadas uma a uma.
- e. Compactação com rolo vibratório ou com rolo liso metálico ou pneumático dos bordos para o centro (utilizar tábuas de madeira nos bordos para proteção do local);
- f. Aplicação de ligante betuminoso (emulsão de ruptura rápida) na taxa de 0,5 l/m²;
- g. Espalhamento do agregado de cobertura imediatamente após o ligante;
- h. Realizar a compressão da camada com rolo pneumático ou liso (a abertura para o tráfego só pode ser liberada após a ruptura da emulsão);
- i. Verificação do acabamento e harmonia com a via.

2.10.4.6 Reparos em fissuras e trincas

A ISC 14/04 descreve o reparo de fissuras e trincas, em especial: remendos superficiais para trincas com largura ≤ 3 mm, remendos superficiais para trincas com largura > 3 mm e remendos profundos e têm como referência as normas DNIT 154/2010 - ES, DNIT 144/2014 - ES, DNIT 145/2014 - ES, DNIT 139/2010 - ES, DNIT 141/2022 – ES, DNIT 153/2010 - ES e DNIT 031/2006 - ES.

Para a execução, são necessários os seguintes materiais: brita graduada para camadas de base e sub-base, asfalto diluído CM-30 ou emulsão asfáltica para imprimação e pintura de ligação, mistura betuminosa pré-misturada a frio ou concreto asfáltico para revestimento e brita para execução das sangrias. Além disso, os equipamentos utilizados são:

- Caminhões com caçambas;
- Compressor de ar;
- Perfuratrizes pneumáticas;

- Retroescavadeira;
- Soquetes mecânicos;
- Distribuidor de produtos betuminosos;
- Rolos pneumático e vibratório; e
- Sinalização adequada.

Para Brasil (2005), a execução dos reparos é dividida em 3: remendos superficiais para trincas ≤ 3 mm, remendos superficiais para trincas > 3 mm e remendos profundos.

1. Remendo superficial para trinca com largura igual ou inferior a 3 mm
 - a. Demarcação da área em formato de quadriláteros;
 - b. Limpeza de área com vassouras ou jato de ar comprimido;
 - c. Aplicação de ligante betuminoso (emulsão de ruptura rápida) na taxa de $0,5 \text{ l/m}^2$;
 - d. Espalhamento do agregado de cobertura imediatamente após o ligante, conforme Figura 30.

Figura 30 - Espalhamento do agregado



Fonte: Baddini (2019)

- e. Realizar a compressão da camada com rolo pneumático/liso ou pela passagem das rodas traseiras de um caminhão carregado (a abertura para o tráfego só pode ser liberada após a ruptura da emulsão);

2. Remendo superficial para trinca com largura maior que 3 mm
 - a. Demarcação do perímetro em forma de quadrilátero;
 - b. Corte e remoção da superfície degradada, primeiramente formando uma vala ao redor do defeito, como visto na Figura 31.

Figura 31 - Corte do material degradado



Fonte: Hilti (2020)

- c. Limpeza do local com vassouras ou jato de ar comprimido;
- d. Aplicação de ligante betuminoso (emulsão asfáltica de ruptura rápida).
- e. Colocação de mistura betuminosa de granulação fina no interior das fendas com auxílio de vassouras;
- f. Compactação da cama com rolo pneumático ou rodas traseiras de um caminhão carregado;
- g. Aplicação de ligante betuminoso (emulsão asfáltica de ruptura rápida).
- h. Colocação de pré-misturado a quente ou a frio (limpar as bordas da caixa e remover partículas graúdas), como na Figura 32.

Figura 32 - Colocação da mistura betuminosa



Fonte: Alvarenga (2011)

- i. Verificação do acabamento e harmonia com a via.

3. Remendo profundo

- a. Demarcação do perímetro em forma de quadrilátero;
- b. Corte e remoção da superfície degradada até profundidade em que se possa estabelecer um apoio firme. Deverá se estender até pelo menos 30 cm de distância da parte saudável do pavimento. Caixa com borda reta com declividade de 8(V):1(H) e formato retangular.
- c. Execução da camada intermediária
 - i. Preenchimento da caixa com material granular até o nível do topo da base;
 - ii. Compactação da camada com soquete mecânico ou placas vibratórias. A espessura da camada máxima é de 15 cm.
- d. Execução da camada de revestimento
 - i. Aplicação de ligante betuminoso (emulsão asfáltica de ruptura rápida);
 - ii. Colocação de mistura asfáltica usinada a quente. Realizar a limpeza das bordas para remover partículas graúdas.

- iii. Compactação da camada com rolo pneumático ou rodas traseiras de um caminhão carregado, conforme Figura 33.

Figura 33 - Caminhão com rolo pneumático



Fonte: Case Construction (2020)

3 MÉTODO

Para a realização deste trabalho foi feita uma coleta de dados por meio de consulta a fontes internacionais e nacionais, referente a pavimentação asfáltica em rodovias nos locais sujeitos a baixas temperaturas e, com presença de pavimentos congelados. O propósito desta pesquisa é compilar as informações mais relevantes sobre o tema a fim de contribuir com a pavimentação em áreas frias do Brasil, desenvolvendo um manual técnico para aprimorar as rodovias dessas regiões.

Com o objetivo de estruturar a metodologia deste trabalho, foi realizada uma revisão sistemática de literatura, seguida pela elaboração de uma tabela que organiza os principais materiais consultados. A elaboração da revisão deu-se pela pergunta de pesquisa: como realizar a conservação de pavimentos flexíveis sujeitos a baixas temperaturas? Após a definição das palavras-chaves, foi possível realizar a seleção dos materiais, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Relação de materiais sobre a interação entre temperatura e pavimentos

AUTOR	ANO	TIPO DE PESQUISA	IDIOMA	TÍTULO	CONCLUSÕES
Alex Apeageyi; Eshan V. Dave; William Buttlar.	2008	Artigo	Inglês	Effect of Cooling Rate on Thermal Cracking of Asphalt Concrete Pavements	O acúmulo de tensões no pavimento tem como principal fator a grande variação de temperatura e não a presença de temperaturas extremas
Alessandra Caroline Moellmann Lautharte; Alessandra Ponciano; André Luiz Bock.	2017	Artigo	Português	Análise da influência da variação de temperatura em misturas asfálticas usinadas à quente: Módulo de resiliência e tração por compressão diametral	A existência de baixas temperaturas propicia o aumento da rigidez do pavimento, este fator gera maior propensão a fissuras
Adosindro Joaquim de Almeida; Leto Momm; Glicério Trichês; Keyla Junko Shinohara.	2018	Artigo	Inglês	Evaluation of the influence of water and temperature on the rheological behavior and resistance to fatigue of asphalt mixtures	O efeito da água no pavimento é aumentado quando combinado com a temperatura

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 10 - Relação de materiais sobre a interação entre temperatura e pavimentos (continuação)

AUTOR	ANO	TIPO DE PESQUISA	IDIOMA	TÍTULO	CONCLUSÕES
Behzad Behnia; William Buttlar; Henrique Reis.	2018	Artigo	Inglês	Evaluation of Low-Temperature Cracking Performance of Asphalt Pavements Using Acoustic Emission: A Review	O stress térmico presente no pavimento em dias frios é decorrente da contração das camadas
T. Ahmad; H. Khawaja.	2018	Artigo	Inglês	Review of Low-Temperature Crack (LTC) Developments in Asphalt Pavements	Quedas de temperatura de 9,5°C ou mais ocasionam contração térmica no pavimento
Ishfaq Mohi ud Din; Mohammad Shafi Mir; Mohammad Adnan Farooq.	2020	Artigo	Inglês	Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Properties of Asphalt Pavements in Cold Regions: A Review	Os ciclos de congelamento e descongelamento ocasionam a deterioração da viscosidade do ligante e diminui a resistência do pavimento
Mai Alawneh; Haithem Soliman; Ania Anthony.	2020	Artigo	Inglês	Investigating the Freeze-Thaw Damage in Asphalt Concrete Using Imaging Techniques	A infiltração de água em uma microfissura da camada pode, após ciclos de gelo e gelo, ocasionar a quebra da mistura
Letícia Alberto; Borges Madureira;	2022	Livro digital	Português	Misturas Asfálticas - Conceituação, Materiais e Dosagem: Módulo 4 - dosagem de misturas asfálticas	A viscosidade do ligante asfáltico é alterada conforme a temperatura. Baixas temperaturas ocasionam altas viscosidades.
San Luo; Tianwen Bai; Mingqin Guo; Yi Wei; Wenbo Ma.	2022	Artigo	Inglês	Impact of Freeze–Thaw Cycles on the Long-Term Performance of Concrete Pavement and Related Improvement Measures: A Review	Os ciclos de congelamento e degelo provocam a desintegração do pavimento, visto que causa a deterioração do material
Piotr Mazurowski	2023	Artigo	Inglês	Freeze-Thaw Weathering and Degradation: The Effect on Pavements	O congelamento da água ocasiona um aumento de até 9% do seu volume e a pressão de expansão gerada pode atingir 220 Mpa, o que é capaz de fraturar uma rocha
Shoddo Elias Haile; Yuanzhen Liu.	2023	Artigo	Inglês	The effect of freeze-thaw on the performance of recycled concrete pavement	Pavimentos expostos a baixas temperaturas têm maior tendência em sofrer danos severos devido a mecânica de expansão e contração das camadas

Fonte: Autoria própria (2024)

Esse formato de revisão possibilitou uma análise sistemática e objetiva dos estudos utilizados, permitindo uma avaliação aprofundada dos dados e resultados obtidos. Deve-se destacar que não foram encontrados manuais para manutenção de pavimentos flexíveis sujeitos a baixas temperaturas, o que torna o resultado do presente trabalho ainda mais inovador. Com auxílio desta organização, buscou-se facilitar a compreensão das referências teóricas e empíricas selecionadas. Assim, a metodologia adotada garante a compilação dos dados mais significativos para o estudo.

3.1 Classificação da pesquisa

Em relação aos objetivos do trabalho, o estudo se desdobra em duas vertentes: exploratória e descritiva. A fase inicial abrangerá uma pesquisa exploratória que, conforme Munaretto, Corrêa e Cunha (2013), procura aprofundar a compreensão do tema abordado, tornando-o mais acessível para introduzir e apresentar o tema para os leigos. Após a contextualização e elucidação do assunto, será realizada uma pesquisa descritiva, pautada na observação minuciosa de bibliografias relacionadas ao tema, análise e interpretação dos dados, além da descrição dos elementos pertinentes.

Isto posto, este trabalho terá sua abordagem metodológica realizada por dois tipos distintos de pesquisa científica e tem como objetivo fomentar a inovação no segmento da pavimentação brasileira, a partir da introdução do tema de pavimentos congelados, seguida de aprofundamento no assunto por meio de uma revisão de literatura.

3.2 Apresentação e análise dos dados

Após a definição do tema a ser pesquisado no trabalho, os dados e informações necessárias para sua realização foram obtidos por meio de levantamento bibliográfico de artigos científicos, dissertações, teses, literaturas especializadas em pavimentação e normas técnicas, abrangendo tanto a língua

portuguesa quanto a inglesa. Os materiais alcançados ao longo da pesquisa serão relevantes para a análise do tema e elaboração de recursos educacionais sobre pavimentos congelados.

De forma a definir a relevância do tema apresentado na literatura, uma lista dos itens e instrumentos mais importantes para a exposição e aprofundamento do tema foi elaborada. Os dados serão avaliados quanto à sua pertinência e aplicabilidade ao contexto da pavimentação no Brasil. Caso o estudo encontrado através de pesquisas esteja contemplado nessa lista, será objeto de análise e interpretação, a fim de obter dados relevantes para o tema.

Os itens e elementos cruciais para o conteúdo do trabalho são:

1. Literaturas já consagradas no segmento de pavimentação no Brasil;
2. Dados climatológicos do território brasileiro durante os meses de inverno;
3. Métodos construtivos de pavimentos congelados previamente testados e validados;
4. Artigos publicados em países com rigorosos períodos de neve a respeito do tema da pavimentação;
5. Literaturas explicativas sobre o processo do ciclo gelo-degelo e suas implicações nos pavimentos; Projetos e memoriais descritivos de pavimentação realizados em regiões sujeitas a baixas temperaturas.

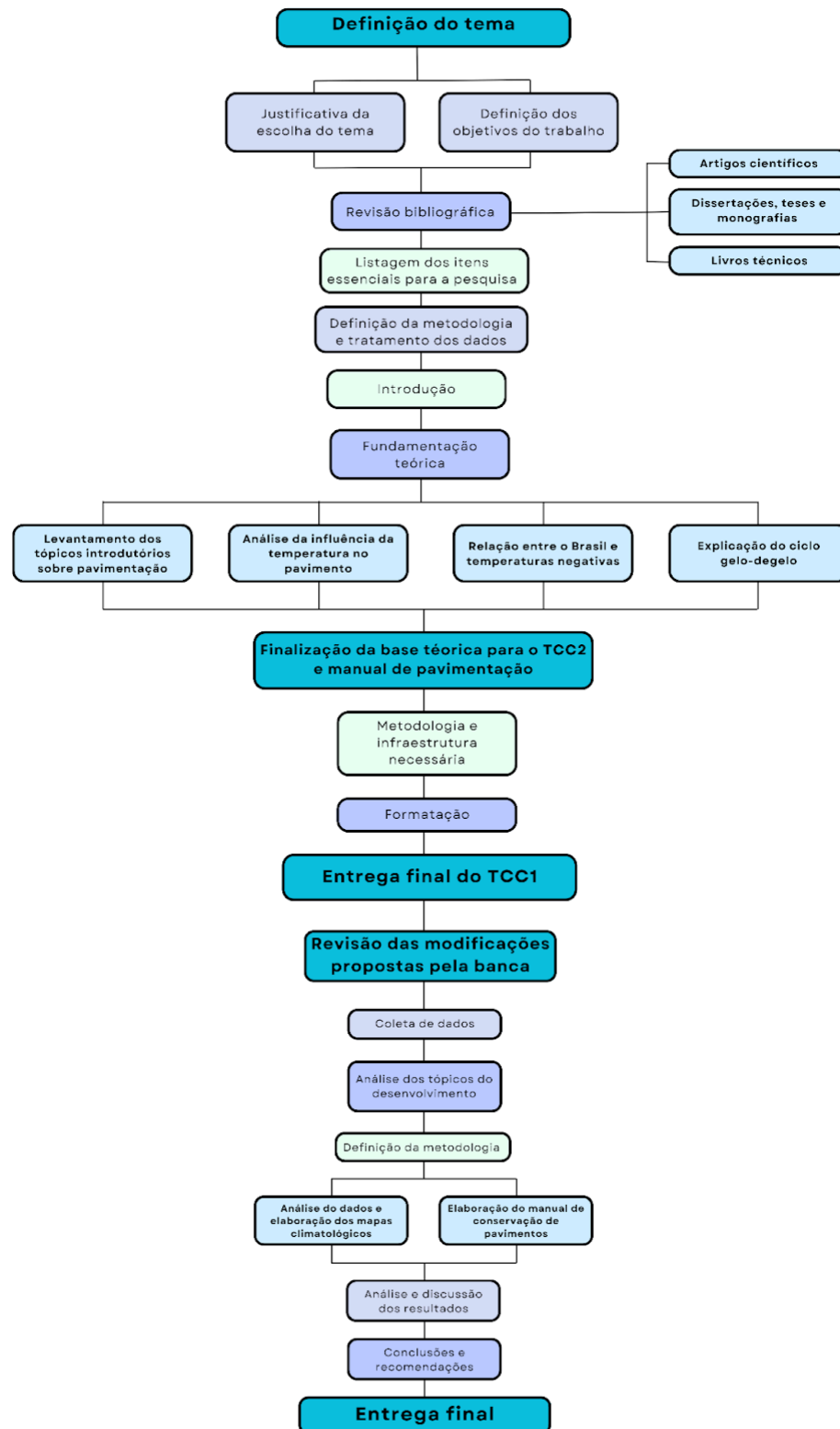
A partir da definição dos materiais essenciais para a condução da pesquisa, há necessidade de processar as informações obtidas através deles. Sendo assim, os itens selecionados, devido a relevância, serão compilados e organizados por temas, como: introdução ao assunto, dados sobre o clima brasileiro, informações sobre o ciclo gelo-degelo, projetos de pavimentação, entre outros tópicos. Cada categoria de informação será processada de forma independente e, assim, há garantia de que cada aspecto abordado será processado de maneira detalhada.

A climatologia brasileira, por exemplo, será examinada e os dados escolhidos serão apresentados com o auxílio de gráficos e tabelas. Outro caso são as literaturas relacionadas ao ciclo de gelo e degelo que, após a análise das

informações obtidas, serão processadas e sintetizadas em uma revisão bibliográfica, aperfeiçoada com uso de figuras e esquemas para melhor compreensão. Dessa maneira, a apresentação dos dados analisados será conduzida através de recursos visuais que facilitam a assimilação do tema e contará com a escrita clara e objetiva dos tópicos de interesse.

Por fim, o método de pesquisa adotado para o desenvolvimento do presente projeto foi definido para alcançar o objetivo principal e, também, os objetivos específicos já delineados. A partir disso, se alinha com a revisão dos estudos mais significativos sobre pavimentação, auxiliando na compilação de informações para promover a compreensão aprofundada do tema. Logo, a metodologia utilizada na pesquisa está alinhada com os objetivos estabelecidos e contribui de forma significativa na estruturação do trabalho. É possível observar o fluxograma do desenvolvimento do trabalho na Figura 34.

Figura 34 - Fluxograma para desenvolvimento do trabalho

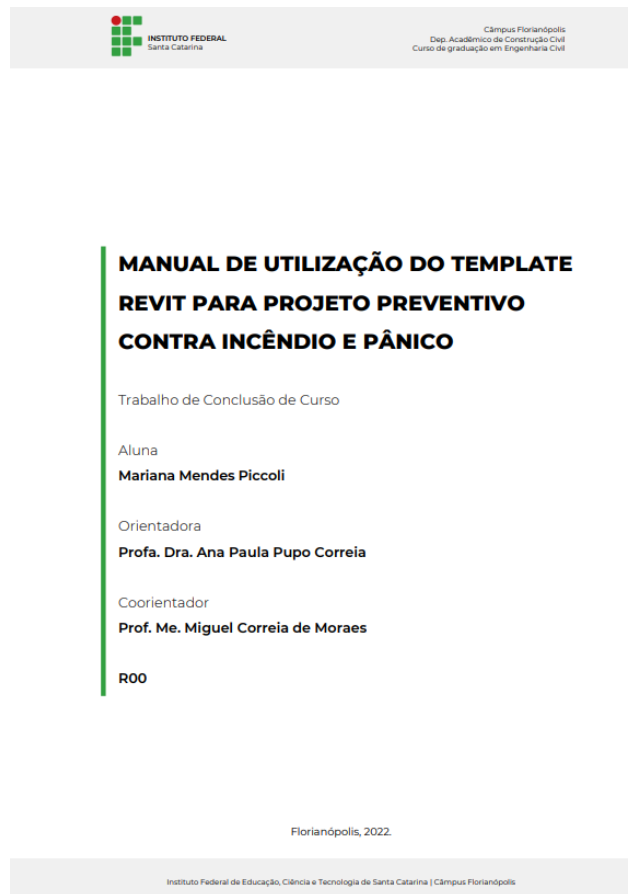


Fonte: Autoria própria (2024)

3.3 Elaboração do manual

O manual elaborado como resultado deste trabalho foi baseado no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) da engenheira civil Mariana Mendes Piccoli, graduada pelo Instituto Federal de Santa Catarina. No material, presente na Figura 35, é possível observar o modelo de manual adotado pela autora.

Figura 35 - Manual utilizado como base



Fonte: Piccoli (2022)

O material elaborado para a conservação de pavimentos congelados conta com os seguintes elementos: capa, apresentação, sumário, tópicos principais, considerações finais e referências bibliográficas. Os tópicos principais abordados no manual são:

- Diagnóstico dos defeitos presentes na superfície; e

Tabela 11 - Informações das estações meteorológicas (continuação)

NOME	LATITUDE	LONGITUDE	DIAS COM TEMPERATURA ≤0
RIO DO CAMPO	-26,93749999	-50,14555555	3
RIO NEGRINHO	-26,2486111	-49,57416666	43
SÃO JOAQUIM	-28,27555554	-49,93472221	78
SÃO MIGUEL DO OESTE	-26,78638888	-53,51416666	3
URUSSANGA	-28,53249999	-49,31527777	2
XANXERÊ	-26,938666	-52,39809	15
CIDADE GAÚCHA	-23,35916666	-52,93194443	0
CLEVELÂNDIA	-26,41722221	-52,3486111	29
CURITIBA	-25,4486111	-49,23055554	0
DIAMANTE DO NORTE	-22,63944444	-52,89027777	0
DOIS VIZINHOS	-25,69916666	-53,09527777	4
FOZ DO IGUAÇU	-25,60194444	-54,48305554	0
GENERAL CARNEIRO	-26,3986111	-51,35361111	112
ICARAÍMA	-23,39027777	-53,63583333	0
INÁCIO MARTINS	-25,567879	-51,077946	30
IVAÍ	-25,01083333	-50,85388888	0
JAPIRA	-23,77333332	-50,18055554	1
JOAQUIM TAVORA	-23,50527777	-49,94638888	6
MAL. CÂNDIDO RONDON	-24,53333333	-54,01916666	9
MARINGÁ	-23,40527777	-51,93277777	0
MORRETES	-25,50888888	-48,80861111	0
NOVA FÁTIMA	-23,41527777	-50,57777777	1
PARANAPOEMA	-22,65833333	-52,13444444	0
PLANALTO	-25,72194443	-53,74805555	3
SÃO MATEUS DO SUL	-25,83555555	-50,36888888	57
VENTANIA	-24,28027777	-50,21027777	1
ALEGRETE	-29,70916666	-55,52555554	25
BAGÉ	-31,34777777	-54,01333333	17
BENTO GONÇALVES	-29,164581	-51,534202	16
CAÇAPAVA DO SUL	-30,54527777	-53,46694443	1
CAMAQUÃ	-30,80805555	-51,83416666	0
CAMPO BOM	-29,674293	-51,064042	3
CANELA	-29,36888888	-50,82722221	23
CANGUÇU	-31,40333333	-52,70083333	5
CRUZ ALTA	-28,60344	-53,673597	28
DOM PEDRITO	-31,0025	-54,61805554	23
ERECHIM	-27,65777777	-52,30583333	16
FREDERICO WESTPHALEN	-27,39555555	-53,42944443	13

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 11 - Informações das estações meteorológicas (continuação)

NOME	LATITUDE	LONGITUDE	DIAS COM TEMPERATURA ≤ 0
IBIRUBA	-28,65333333	-53,11194444	19
JAGUARÃO	-32,53472221	-53,37583332	11
LAGOA VERMELHA	-28,222381	-51,512845	25
MOSTARDAS	-31,24833333	-50,90638888	0
PALMEIRA DAS MISSÕES	-27,92027777	-53,31805554	11
PASSO FUNDO	-28,22666666	-52,40361111	17
PORTO ALEGRE	-30,1861111	-51,17805554	0
QUARAÍ	-30,368578	-56,437115	67
RIO GRANDE	-32,07888888	-52,16777777	1
RIO PARDO	-29,87222221	-52,38194443	1
SANTA MARIA	-29,72499999	-53,72055554	13
SANTA ROSA	-27,89055555	-54,47999999	17
SANTANA DO LIVRAMENTO	-30,75055555	-55,40138888	14
SANTIAGO	-29,191599	-54,885653	8
SANTO AUGUSTO	-27,85444444	-53,7911111	6
SÃO BORJA	-28,65	-56,01638888	4
SÃO GABRIEL	-30,34138888	-54,31083333	16
SÃO JOSÉ DOS AUSENTES	-28,7486111	-50,05777777	69
SÃO LUIZ GONZAGA	-28,41722221	-54,9625	1
SOLEDADE	-28,859211	-52,542387	18
SANTA VITÓRIA DO PALMAR	-33,74222221	-53,37222221	0
TEUTÔNIA	-29,44916666	-51,82333332	6
TORRES	-29,35027777	-49,73333333	0
TRAMANDAÍ	-30,01027777	-50,13583333	0
URUGUAIANA	-29,83999999	-57,08194443	7
VACARIA	-28,51361111	-50,88277777	76

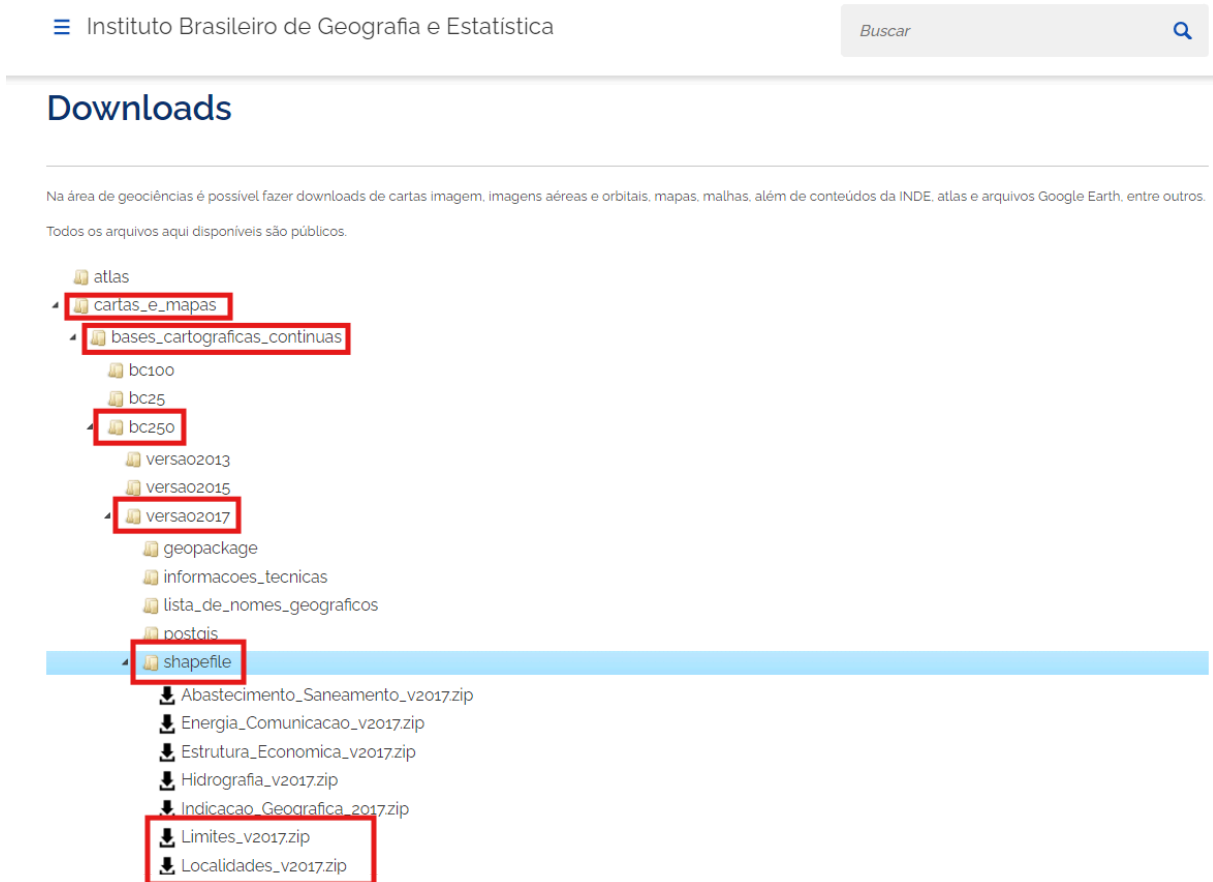
Fonte: Autoria própria (2024)

Após a análise dos dados obtidos, foi possível elaborar mapas de símbolos proporcionais que destacam as áreas com maior ocorrência de dias com temperaturas negativas, conforme visto no item “Resultados e Discussões”. Essa etapa ocorreu por meio do *software* QGIS.

Para a realização dos mapas foram utilizados 3 *shapefiles* disponibilizados no site do IBGE. O material, encontrado na aba de geociências, pode ser visto

conforme Figura 38 e apresenta: limites dos países da América do Sul e limites dos estados brasileiros, no arquivo Limites, e capitais, no arquivo Localidades.

Figura 38 - Obtenção dos dados para elaboração dos mapas



Fonte: Autoria própria (2024)

A inserção dos arquivos no *software* QGis ocorre por meio do “Gerenciador de Fontes de Dados” na aba “Vetor”. Os países foram definidos pela cor branca, os estados pela cor cinza e o estado em destaque, posteriormente, recebeu a cor azul. Além disso, as capitais foram representadas por círculos amarelos. É possível observar a base dos mapas climatológicos na Figura 39.

Figura 39 - Base modelo para os mapas climatológicos

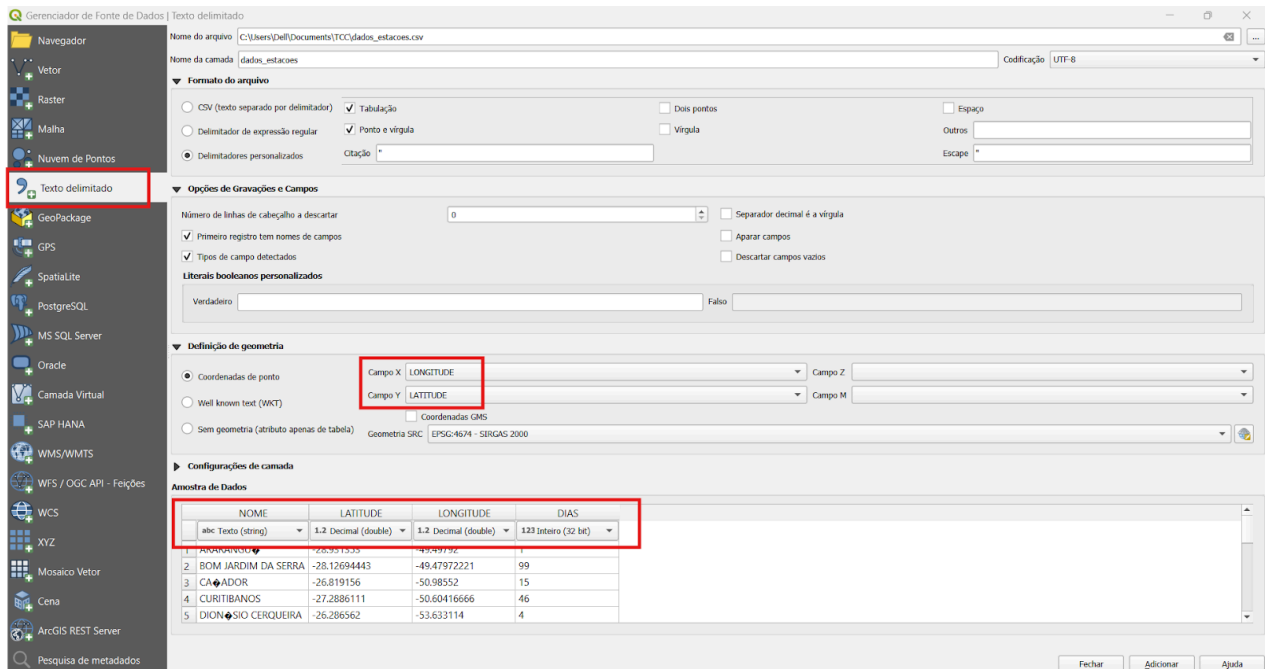


Fonte: Autoria própria (2024)

Após a elaboração do mapa, um arquivo .csv contendo as informações sobre as estações meteorológicas foi adicionado ao *software* pelo “Gerenciador de Fontes de Dados” na aba “Texto delimitado”. Os dados necessários para a elaboração são: Nome da estação, latitude e longitude do local e a quantidade de dias com temperaturas menores ou iguais a 0°C, conforme já observado na Tabela 11.

A Figura 40 explicita as especificações necessárias para a inserção da tabela no QGIS. Na parte de “Definição de geometria”, o “Campo X” é representado pela longitude e o “Campo Y” pela latitude. Já em “Configurações de camada” a coluna com o nome das estações é em formato de texto, as coordenadas em formato de decimal e os dias são inseridos como número inteiros.

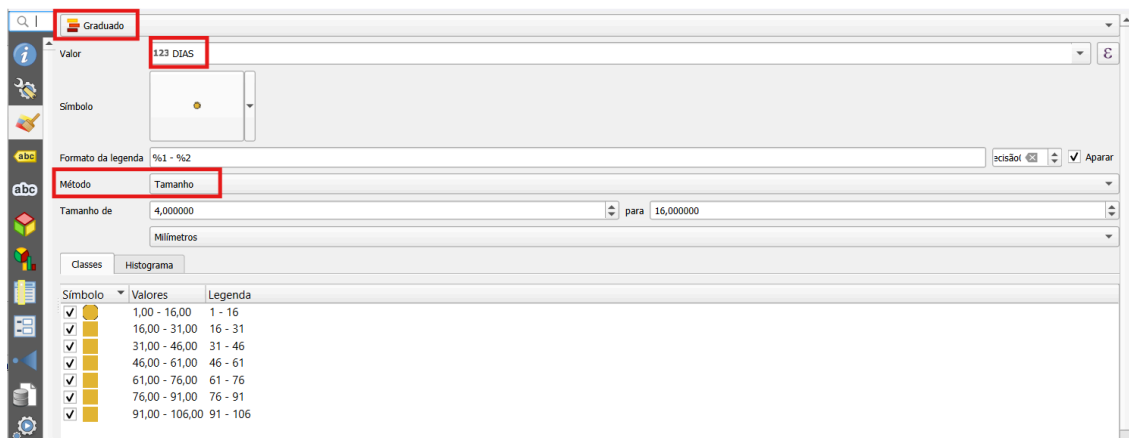
Figura 40 - Inserção da tabela no software QGis



Fonte: Autoria própria (2024)

O que faz com que os símbolos aumentem conforme a concentração de dias é a simbologia dos pontos no software. Neste caso, o símbolo deve ser “Graduado”, o “Valor” se refere a coluna de dias na tabela e o método é “Tamanho”, conforme Figura 41.

Figura 41 - Mapa de pontos



Fonte: Autoria própria (2024)

Sendo assim, é possível elaborar o mapa de símbolos proporcionais com base nos dias de temperaturas menores ou iguais a zero e as coordenadas das estações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será possível observar os resultados obtidos a partir da revisão de literatura, conforme proposto na metodologia, além dos materiais elaborados com a análise dos dados obtidos. A seguir, serão detalhados os resultados principais relacionados aos objetivos de pesquisa.

4.1 Desafios climáticos: temperatura e ciclo gelo-degelo nos pavimentos

Foi possível observar a influência da temperatura ao longo deste trabalho por meio de maneiras variadas. Madureira (2022) se alinha com Carvalho *et al.* (2020) a medida em que inferem que ligantes possuem sua viscosidade aumentada em baixas temperaturas, provocando consistência elevada. É possível, então, afirmar que áreas sujeitas a temperaturas negativas sofrem na obtenção de camadas uniformes no pavimento, uma vez que a mistura torna-se mais rígida. A elevada rigidez da mistura a torna mais vulnerável às forças de expansão e contração, o que favorece a incidência de defeitos no pavimento.

A partir da constatação da influência da temperatura no cenário rodoviário, é essencial mencionar a interação entre a presença de água nas camadas e baixas temperaturas. Na revisão elaborada por Ahmad e Khawaja (2018), conclui-se que a água é o maior inimigo da estabilidade do pavimento, sendo a maior responsável pelo surgimento de fissuras. A presença de líquidos nas camadas ocasiona a formação de lentes de gelo, gerando instabilidade, desagregação e levantamento dos materiais.

Portanto, tem-se como resultado a compreensão das consequências da presença de baixas temperaturas no Brasil. Este clima, embora não seja predominante no território nacional, pode ter um impacto devastador nas vias sujeitas a ele. Assim, compreender as implicações citadas é de extrema importância para a conservação eficaz dos pavimentos.

4.2 Mapa climático da região Sul do Brasil

Neste capítulo, são apresentados os resultados da elaboração de um mapa climatológico de regiões frias do Brasil, que destaca a quantidade de dias com temperaturas negativas na região Sul do país ao longo da última década. Para isso, o estudo se resumiu a estações localizadas em diversos municípios dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, locais com maior incidência de dias com temperaturas negativas no território nacional.

A fim de atingir este objetivo, foram verificados e compilados os dados históricos anuais de temperatura fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A Tabela 12 é o resultado da análise detalhada das planilhas fornecidas e apresenta a quantidade de dias em que existiram temperaturas negativas ou iguais a zero durante o período de 10 anos (2014 a 2023) nas cidades citadas.

Tabela 12 - Quantidade de dias com temperatura menor ou igual a zero

LOCAL	ESTADO	DIAS COM TEMPERATURAS ≤ 0
FLORIANÓPOLIS	SC	0
INDAIAL	SC	0
ITAJAÍ	SC	0
LAGUNA	SC	0
ARARANGUÁ	SC	1
URUSSANGA	SC	2
RIO DO CAMPO	SC	3
SÃO MIGUEL DO OESTE	SC	3
DIONÍSIO CERQUEIRA	SC	4
NOVO HORIZONTE	SC	8
ITUPORANGA	SC	10
JOAÇABA	SC	10
CAÇADOR	SC	15
XANXERÊ	SC	15
LAGES	SC	35
RIO NEGRINHO	SC	43
CURITIBANOS	SC	46
MAJOR VIEIRA	SC	67
SÃO JOAQUIM	SC	78
BOM JARDIM DA SERRA	SC	99

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 12 - Quantidade de dias com temperatura menor ou igual a zero (continuação)

LOCAL	ESTADO	DIAS COM TEMPERATURAS ≤ 0
CIDADE GAÚCHA	PR	0
CURITIBA	PR	0
DIAMANTE DO NORTE	PR	0
FOZ DO IGUAÇU	PR	0
ICARAÍMA	PR	0
IVAÍ	PR	0
MARINGÁ	PR	0
MORRETES	PR	0
PARANAPOEMA	PR	0
JAPIRA	PR	1
NOVA FÁTIMA	PR	1
VENTANIA	PR	1
PLANALTO	PR	3
DOIS VIZINHOS	PR	4
JOAQUIM TAVORA	PR	6
MAL. CÂNDIDO RONDON	PR	9
CLEVELÂNDIA	PR	29
INÁCIO MARTINS	PR	30
SÃO MATEUS DO SUL	PR	57
GENERAL CARNEIRO	PR	112
CAMAQUÃ	RS	0
MOSTARDAS	RS	0
PORTO ALEGRE	RS	0
SANTA VITÓRIA DO PALMAR	RS	0
TORRES	RS	0
TRAMANDAÍ	RS	0
CAÇAPAVA DO SUL	RS	1
RIO GRANDE	RS	1
RIO PARDO	RS	1
SÃO LUIZ GONZAGA	RS	1
CAMPO BOM	RS	3
SÃO BORJA	RS	4
CANGUÇU	RS	5
SANTO AUGUSTO	RS	6
TEUTÔNIA	RS	6
URUGUAIANA	RS	7
SANTIAGO	RS	8
JAGUARÃO	RS	11

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 12 - Quantidade de dias com temperatura menor ou igual a zero (continuação)

LOCAL	ESTADO	DIAS COM TEMPERATURAS ≤ 0
PALMEIRA DAS MISSÕES	RS	11
FREDERICO WESTPHALEN	RS	13
SANTA MARIA	RS	13
SANTANA DO LIVRAMENTO	RS	14
BENTO GONÇALVES	RS	16
ERECHIM	RS	16
SÃO GABRIEL	RS	16
BAGÉ	RS	17
PASSO FUNDO	RS	17
SANTA ROSA	RS	17
SOLEDADE	RS	18
IBIRUBA	RS	19
CANELA	RS	23
DOM PEDRITO	RS	23
ALEGRETE	RS	25
LAGOA VERMELHA	RS	25
CRUZ ALTA	RS	28
QUARAÍ	RS	67
SÃO JOSÉ DOS AUSENTES	RS	69
VACARIA	RS	76

Fonte: Autoria própria (2024)

A partir da tabela acima, observa-se a existência de estações meteorológicas sem a presença de dias com temperaturas negativas, excluindo-as do estudo realizado. Em razão disso, a Tabela 13 foi elaborada de forma a apresentar somente locais que têm a possibilidade de enfrentar o ciclo de congelamento e degelo do pavimento.

Tabela 13 - Locais com temperaturas menores ou iguais a zero

LOCAL	ESTADO	DIAS COM TEMPERATURAS ≤ 0
ARARANGUÁ	SC	1
URUSSANGA	SC	2
RIO DO CAMPO	SC	3
SÃO MIGUEL DO OESTE	SC	3
DIONÍSIO CERQUEIRA	SC	4
NOVO HORIZONTE	SC	8
ITUPORANGA	SC	10
JOAÇABA	SC	10

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 13 - Locais com temperaturas menores ou iguais a zero (continuação)

LOCAL	ESTADO	DIAS COM TEMPERATURAS ≤ 0
CAÇADOR	SC	15
XANXERÊ	SC	15
LAGES	SC	35
RIO NEGRINHO	SC	43
CURITIBANOS	SC	46
MAJOR VIEIRA	SC	67
SÃO JOAQUIM	SC	78
BOM JARDIM DA SERRA	SC	99
JAPIRA	PR	1
NOVA FÁTIMA	PR	1
VENTANIA	PR	1
PLANALTO	PR	3
DOIS VIZINHOS	PR	4
JOAQUIM TAVORA	PR	6
MAL. CÂNDIDO RONDON	PR	9
CLEVELÂNDIA	PR	29
INÁCIO MARTINS	PR	30
SÃO MATEUS DO SUL	PR	57
GENERAL CARNEIRO	PR	112
CAÇAPAVA DO SUL	RS	1
RIO GRANDE	RS	1
RIO PARDO	RS	1
SÃO LUIZ GONZAGA	RS	1
CAMPO BOM	RS	3
SÃO BORJA	RS	4
CANGUÇU	RS	5
SANTO AUGUSTO	RS	6
TEUTÔNIA	RS	6
URUGUAIANA	RS	7
SANTIAGO	RS	8
JAGUARÃO	RS	11
PALMEIRA DAS MISSÕES	RS	11
FREDERICO WESTPHALEN	RS	13
SANTA MARIA	RS	13
SANTANA DO LIVRAMENTO	RS	14
BENTO GONÇALVES	RS	16
ERECHIM	RS	16
SÃO GABRIEL	RS	16
BAGÉ	RS	17

Fonte: Autoria própria (2024)

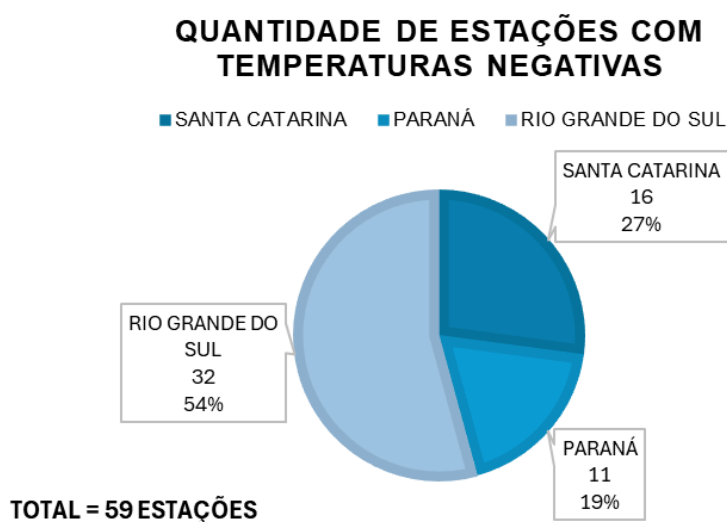
Tabela 13 - Locais com temperaturas menores ou iguais a zero (continuação)

LOCAL	ESTADO	DIAS COM TEMPERATURAS ≤ 0
BAGÉ	RS	17
PASSO FUNDO	RS	17
SANTA ROSA	RS	17
SOLEDADE	RS	18
IBIRUBA	RS	19
CANELA	RS	23
DOM PEDRITO	RS	23
ALEGRETE	RS	25
LAGOA VERMELHA	RS	25
CRUZ ALTA	RS	28
QUARAÍ	RS	67
SÃO JOSÉ DOS AUSENTES	RS	69
VACARIA	RS	76

Fonte: Autoria própria (2024)

Com base na análise dos dados, é possível concluir que foram identificados 16 pontos do estado de Santa Catarina onde ocorreram temperaturas negativas no período de 10 anos. No Paraná, foram registrados 11 locais, o que o torna o estado com a menor frequência de baixas temperaturas entre os três estudados. Por outro lado, o Rio Grande do Sul se destaca com 32 pontos de congelamento, sendo o principal foco deste estudo. Essa relação pode ser observada no Gráfico 01.

Gráfico 01 - Número de estações com temperaturas negativas

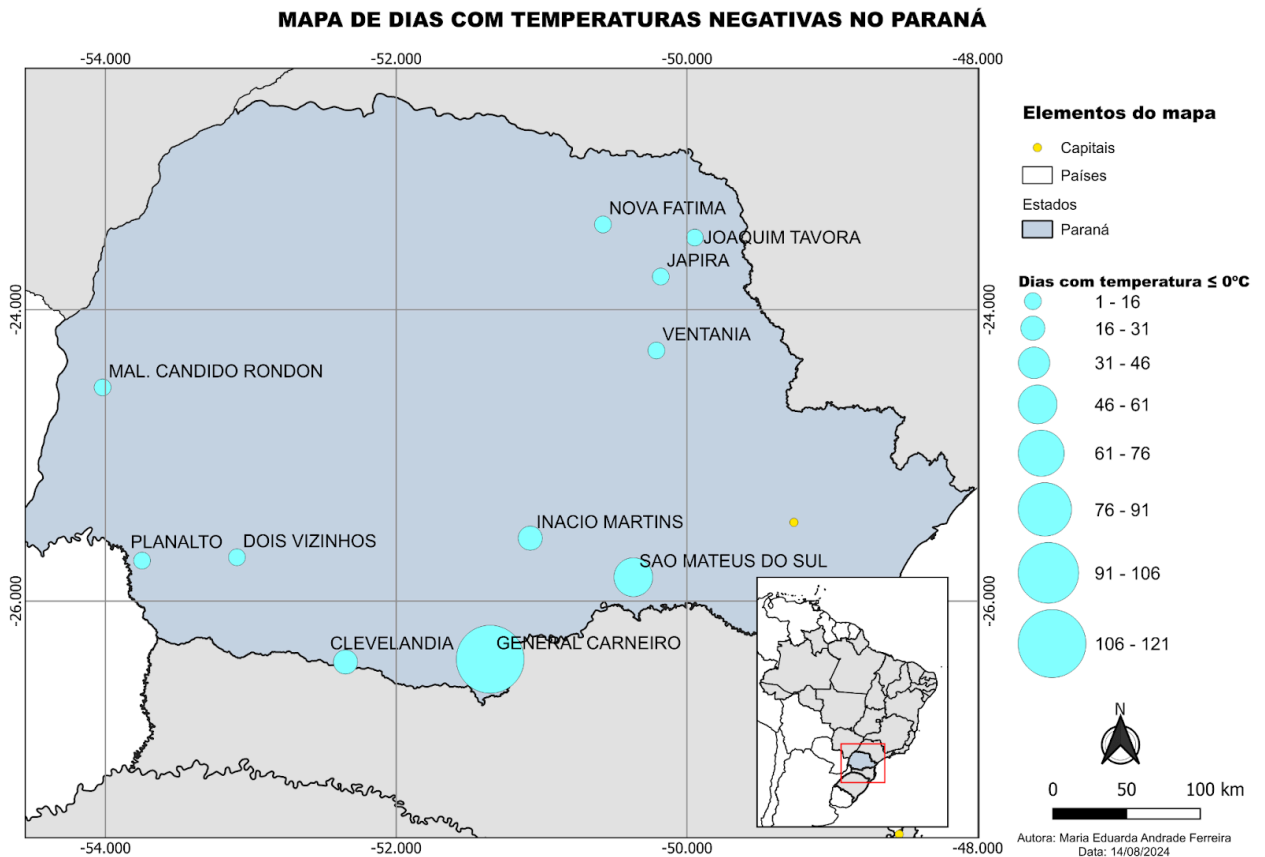


Fonte: Autoria própria (2024)

Para facilitar a compreensão dos dados expostos por meio de tabelas, foram elaborados 4 mapas de símbolos proporcionais, correspondendo às seguintes áreas: Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e região Sul. Os símbolos utilizados permitem a identificação de regiões com maior e menor frequência de temperaturas negativas, o que simplifica a visualização dos padrões climáticos.

A Figura 42 representa o mapa do Paraná, nele é possível observar de forma clara os locais com maior incidência de dias frios, ele está posicionado como o estado com menor frequência de baixas temperaturas. Essa baixa ocorrência pode estar ligada à localização do Paraná e suas características topográficas, que oferecem condições reduzidas para temperaturas extremas.

Figura 42 - Mapa de dias com temperaturas negativas no Paraná

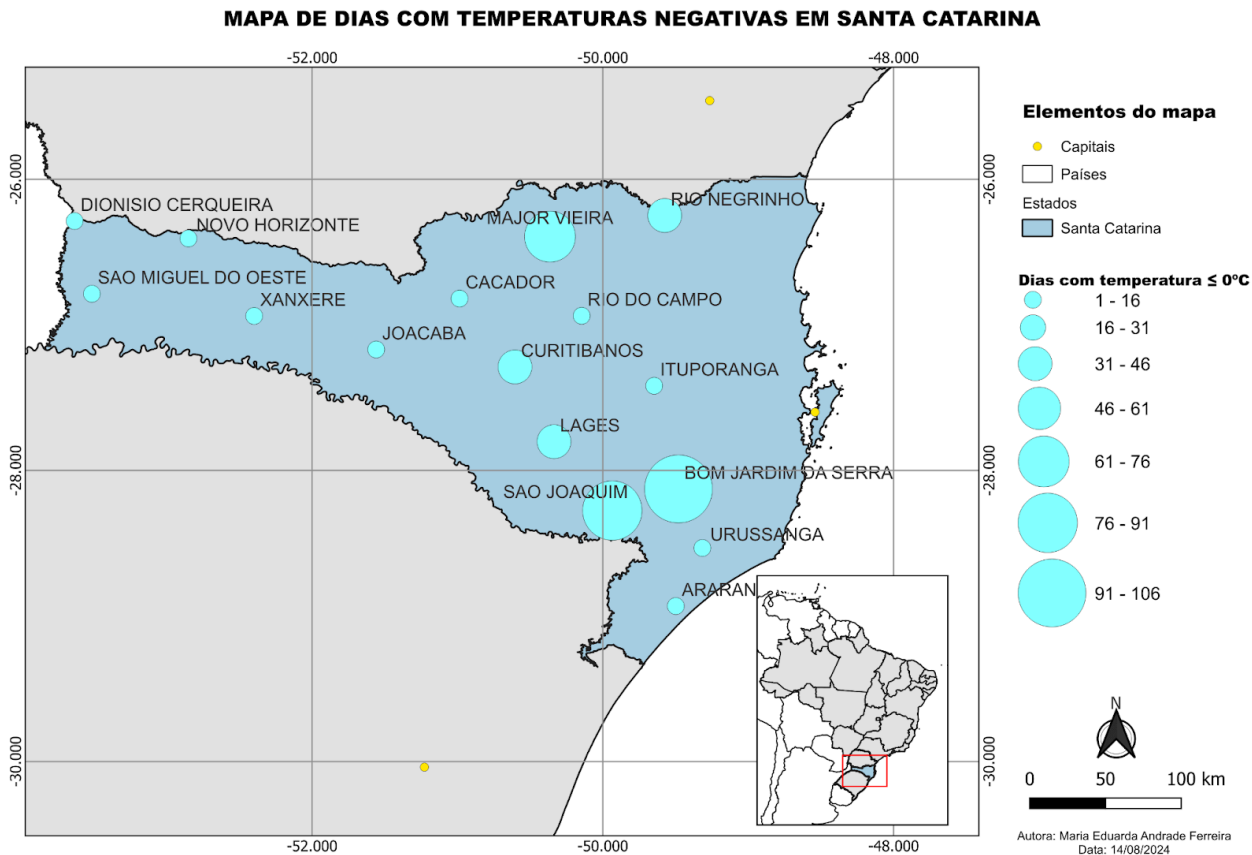


Fonte: A autoria própria (2024)

Já a Figura 43 abaixo, exibe o mapa climático de Santa Catarina, com destaque para Bom Jardim da Serra, São Joaquim e Major Vieira. Essas cidades

estão localizadas em pontos de maior altitude no estado, causando condições climáticas mais extremas.

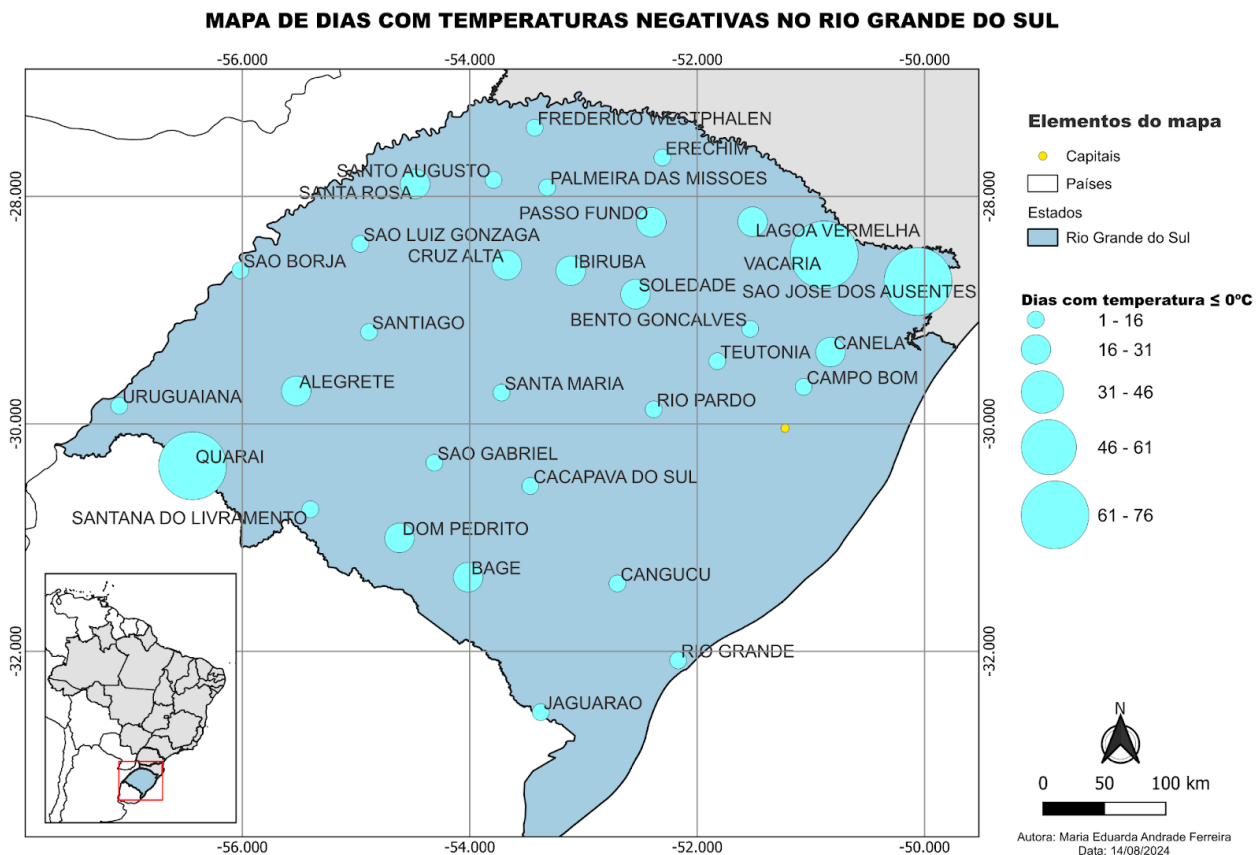
Figura 43 - Mapa de dias com temperaturas negativas em Santa Catarina



Fonte: Autoria própria (2024)

O mapa do Rio Grande do Sul, representado pela Figura 44, explicita a grande quantidade de dias com baixas temperaturas no estado. Nele é apresentada a maior quantidade de pontos com temperaturas negativas, o que reflete suas características climáticas e geográficas que favorecem a ocorrência de temperaturas baixas, em especial em locais com maior altitude e longes do litoral.

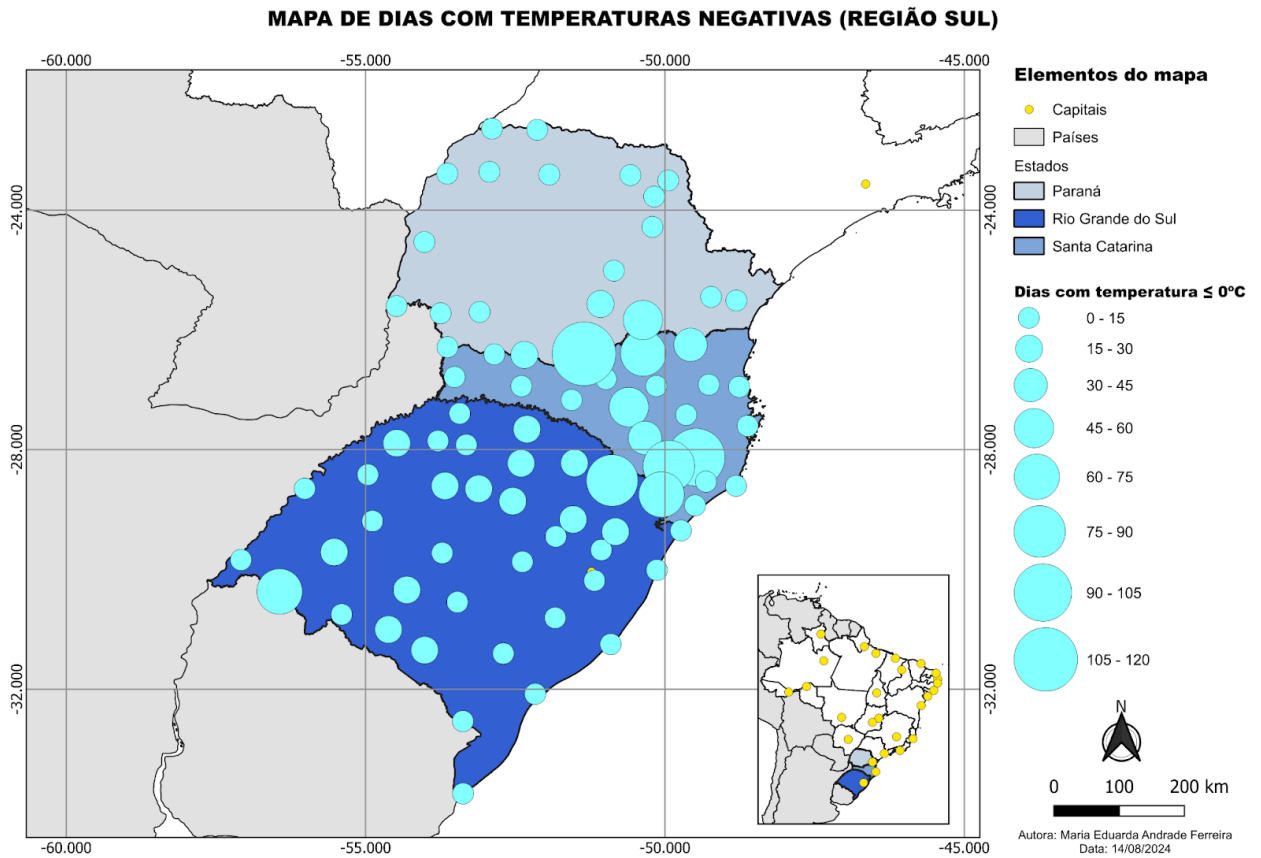
Figura 44 - Mapa de dias com temperaturas negativas no Rio Grande do Sul



Fonte: Autoria própria (2024)

Por fim, a Figura 45 mostra o mapa da região Sul como um todo. Esse material é de extrema importância porque possibilita o reconhecimento dos padrões climáticos da região, fornecendo uma base sólida para a aplicação prática do estudo.

Figura 45 - Mapa de dias com temperaturas negativas na região Sul



Fonte: Autoria própria (2024)

A elaboração dos mapas demonstra ser uma ferramenta essencial para a compreensão das variações espaciais na ocorrência de temperaturas negativas. Por meio deles é possível identificar, de forma ágil, as áreas com maior e menor incidência de dias frios. Logo, é extremamente importante para a visualização dos dados de forma ilustrativa.

Além disso, esses mapas desempenham um papel essencial para a elaboração dos manuais rodoviários. Os mapas de símbolos proporcionais possibilitam a adaptação das recomendações e diretrizes de acordo com a frequência de congelamento em diferentes regiões. É possível, por meio das informações coletadas, desenvolver estratégias de conservação de pavimentos especificamente ajustadas às condições climáticas de cada área.

Logo, os mapas fornecem informações valiosas para prever as necessidades de áreas propensas a temperaturas negativas, permitindo a identificação de locais críticos. Com isso, pode-se verificar a necessidade de tratamentos especiais, como técnicas de conservação específicas e aprimoramento dos sistemas de drenagem em regiões determinadas. Dessa forma, além da otimização de recursos associados à manutenção das vias, os mapas contribuem para a melhora na durabilidade e segurança dos pavimentos.

4.3 Técnicas de conservação

Com base no objetivo de compilar as técnicas de conservação de pavimentos, foi possível elaborar quadros sobre a execução de diferentes tipos de técnicas de conservação e reparos, com ênfase nos defeitos associados à presença de água. As Tabelas 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam detalhes sobre a composição das equipes, produtividade, ferramentas e materiais utilizados, além da execução das técnicas.

O anexo C.07 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT apresenta a técnica “tapa-panela”. Pode-se observar na Tabela 14 a execução do procedimento.

Tabela 14 - Técnica de conservação para panelas

ANEXO C.07	TAPA PANELA	
EXECUÇÃO:	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. TRANSPORTAR O MATERIAL DE JAZIDAS PRÉ-SELECIONADAS	
	3. COLOCAR O MATERIAL NO DEFEITO	
	4. NIVELAR COM PÁ E ANCINHO	
	5. COMPACTAR COM SOQUETE	
	6. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	6 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	2,1 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	PÁ E ANCINHO	CARRO DE MÃO
	PICARETA	SOQUETE
MATERIAL:	MATERIAL DE JAZIDA	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

A Tabela 15, por sua vez, representa o anexo C.15 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT. Esse documento expõe o serviço de selagem de trincas.

Tabela 15 - Técnica de conservação para trincas

ANEXO C.15	SELAGEM DE TRINCA	
EXECUÇÃO:	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. PREENCHER O DEFEITO COM MATERIAL BETUMINOSO	
	3. COBRIR COM AREIA OU PÓ DE PEDRA	
	4. ESPALHAR O MATERIAL COM ROLO	
	5. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	0,1 ENCARREGADO	3 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	50 LITROS	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	ROLO MANUAL	PÁ
	VASSOURA	VASILHAME
MATERIAL:	AGREGADO FINO	MATERIAL BETUMINOSO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

O anexo C.16 (Brasil, 2005) detalha a técnica de tapa buraco, presente na Tabela 16.

Tabela 16 - Técnica de conservação para buracos

ANEXO C.16	TAPA BURACO	
EXECUÇÃO (BURACOS):	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. REMOVER MATERIAL	
	2.1 DEIXAR O DEFEITO EM FORMATO RETANGULAR	
	2.2 VERIFICAR SE OS BORDOS ESTÃO RETOS E VERTICAIS	
	3. APLICAR PINTURA LIGAÇÃO NOS BORDOS E FUNDOS	
	4. ADICIONAR CAMADAS DE ATÉ 7 CM DE MISTURA ASFÁLTICA	
	5. COMPACTAR AS CAMADAS INDIVIDUALMENTE	
	6. NIVELAR AS SUPERFÍCIES E DEIXÁ-LAS LIMPAS	
	7. REMOVER SINALIZAÇÃO	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Tabela 16 - Técnica de conservação para buracos (continuação)

EXECUÇÃO (DEPRESSÃO SECUNDÁRIA): Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. ESCOVAR DE 10 CM A 15 CM ALÉM DO CONTORNO DA ÁREA	
	2.1 VARRER O LOCAL	
	3. APLICAR PINTURA DE LIGAÇÃO	
	4. ADICIONAR CAMADAS DE ATÉ 7 CM DE MISTURA ASFÁLTICA	
	5. COMPACTAR AS CAMADAS INDIVIDUALMENTE	
	6. NIVELAR AS SUPERFÍCIES E DEIXÁ-LAS LIMPAS	
	7. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	6 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	0,5 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	PICARETA	SOQUETE
	VASSOURA DE PIAÇAVA	CARRO DE MÃO
	PÁ	PLACA VIBRATÓRIA
	CAMINHÃO BASCULANTE	
MATERIAL:	AGREGADO FINO	MATERIAL BETUMINOSO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

A Tabela 17, exemplifica como realizar um remendo profundo mecanizado, conforme o anexo C.17 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT.

Tabela 17 - Execução de remendo profundo mecanizado

ANEXO C.17	REMENDO PROFUNDO MECANIZADO	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. REMOVER A ÁREA COM DEFEITO	
	3. COBRIR COM O MATERIAL PARA BASE	
	3.1 COMPACTAR EM CAMADAS DE 20 CM	
	4. APLICAR PINTURA DE LIGAÇÃO	
	5. ADICIONAR CAMADAS DE ATÉ 7 CM DE MISTURA ASFÁLTICA	
	5.1 COMPACTAR	
	6. NIVELAR AS SUPERFÍCIES E DEIXÁ-LAS LIMPAS	
	7. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	6 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	1 M ³	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Tabela 17 - Execução de remendo profundo mecanizado (continuação)

FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	CAMINHÃO BASCULANTE	COMPRESSOR DE AR
	MARTELETE ROMPEDOR	SOQUETE VIBRATÓRIO
	PLACA VIBRATÓRIA COM MOTOR	FERRAMENTAS DIVERSAS
MATERIAL:	MATERIAL PARA BASE	ASFALTO DILUÍDO
	MISTURA BETUMINOSA	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

O anexo C.18 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT descreve a execução de remendo profundo manual, como visto na Tabela 18.

Tabela 18 - Execução de remendo profundo manual

ANEXO C.18	REMENDO PROFUNDO MANUAL	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. REMOVER A ÁREA COM DEFEITO	
	3. COBRIR COM O MATERIAL PARA BASE	
	3.1 COMPACTAR EM CAMADAS DE 20 CM	
	4. APLICAR PINTURA DE LIGAÇÃO	
	5. ADICIONAR CAMADAS DE ATÉ 7 CM DE MISTURA ASFÁLTICA	
	5.1 COMPACTAR	
6. NIVELAR AS SUPERFÍCIES E DEIXÁ-LAS LIMPAS		
7. REMOVER SINALIZAÇÃO		
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	7 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	0,55 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	CAMINHÃO BASCULANTE	SOQUETE VIBRATÓRIO
	COMPACTADOR MANUAL	PÁ
	VASSOURA DE PIAÇAVA	SOQUETE
	PICARETA	CARRINHO DE MÃO
MATERIAL:	MATERIAL PARA BASE	ASFALTO DILUÍDO
	MISTURA BETUMINOSA	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

É importante destacar que a execução de capa selante com pedrisco, anexo C.35 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT, presente na Tabela 19, não deve ser realizada em temperatura inferior a 10°C. Sendo assim, deve-se verificar se existe a possibilidade de realizar esse serviço nos dias de inverno.

Tabela 19 - Execução de capa selante com pedrisco

ANEXO C.35	CAPA SELANTE COM PEDRISCO	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. FAZER O DESVIO DO TRÁFEGO	
	3. ELIMINAR MATERIAIS SOLTOS DA PISTA	
	4. APLICAR O MATERIAL BETUMINOSO	
	4.1 COBRIR IMEDIATAMENTE COM AGREGADO COM ESPALHADOR	
	4.2 UTILIZAR VASSOURA DE RASTO PARA UNIFORMIZAR A SUPERFÍCIE	
	5. COMPACTAR O AGREGADO	
	5.1 INTERROMPER COMPACTAÇÃO AO PERCEBER ESMAGAMENTO	
	5.2 REMOVER EXCESSO DO MATERIAL	
	6. LIBERAR TRÁFEGO COM CONTROLE DE VELOCIDADE	
	7. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	8 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	1,35 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	TRATOR AGRÍCOLA	CARREGADEIRA DE PNEUS
	ROLO COMPACTADOR DE PNEUS	VASSOURA MECÂNICA
	DISTRIBUIDOR DE AGREGADOS	CAMINHÃO BASCULANTE
	TANQUES DE ESTOCAGEM DE ASFALTO	AQUECEDOR DE FLUÍDO TÉRMICO
	EQUIPAMENTO DISTRIBUIDOR DE ASFALTO	
	VASSOURAS	PÁS
	ANCINHOS	GARFO
MATERIAL:	LIGANTE BETUMINOSO	AGREGADO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

A Tabela 20 representa o anexo C.36 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT com a técnica de aplicação de lama asfáltica.

Tabela 20 - Aplicação de lama asfáltica

ANEXO C.36	LAMA ASFÁLTICA	
<p>EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local</p> <p>EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local</p>	<u>PARA A CARGA:</u>	
	1. VERIFICAR DISTÂNCIA ENTRE O DEPÓSITO DE MATERIAL E O CAMINHÃO	
	1.1 NÃO PODE ULTRAPASSAR 10 KM	
	2. VERIFICAR O TEMPO DE CARGA	
	2.1 A CARGA DE AREIA/PÓ DE PEDRA DEVE SER SIMULTÂNEA À DO CIMENTO	
	2.2 A CARGA DO DISTRIBUIDOR DE ÁGUA E EMULSÃO DEVE SER SIMULTÂNEA	
	3. LIMPAR A CAIXA DISTRIBUIDORA EM TODA APLICAÇÃO	
	3.1 ELA NÃO ACOMPANHARÁ O EQUIPAMENTO NO PERCURSO	
	<u>PARA A APLICAÇÃO:</u>	
	4. 2 SERVENTES VERIFICAM O ESPALHAMENTO DA MASSA, CONFERINDO MISTURA, LIMPEZA E UMEDECIMENTO DA PISTA	
	4.1 1 SERVENTE É RESPONSÁVEL PELO CONTROLE DO TEOR DE CIMENTO	
	4.2 2 SERVENTES DEVEM CORRIGIR IMPERFEIÇÕES COM O RODO	
	4.3 1 SERVENTE DEVERÁ SINALIZAR A PISTA INTERROMPIDA	
5. PARAR O SERVIÇO DE MODO QUE FIQUE LIBERADO A NOITE, APÓS A CURA		
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	10 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	838 M ²	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	TRATOR AGRÍCOLA	CARREGADEIRA DE PNEUS
	ROLO COMPACTADOR DE PNEUS	VASSOURA MECÂNICA
	CAMINHÃO TANQUE	CAMINHÃO BASCULANTE
	TANQUES DE ESTOCAGEM DE ASFALTO	AQUECEDOR DE FLUÍDO TÉRMICO
	EQUIPAMENTO DISTRIBUIDOR DE LAMA ASFÁLTICA	
	FERRAMENTAS DE CORTE	VASSOURAS DE PIAÇAÇA
MATERIAL:	EMULSÃO	AREIA
	PÓ DE PEDRA	CIMENTO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

O anexo C.37 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT apresenta o serviço de recomposição com areia-asfalto a frio, representado pela Tabela 21.

Tabela 21 - Execução de recomposição com areia-asfalto a frio

ANEXO C.37	RECOMPOSIÇÃO COM AREIA ASFALTO A FRIO	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. FAZER O DESVIO DO TRÁFEGO	
	3. ELIMINAR MATERIAIS SOLTOS DA PISTA	
	4. APLICAR A PINTURA DE LIGAÇÃO	
	5. ESPALHAR O MATERIAL EM CAMADAS	
	5.1 COMPACTAR AS CAMADAS INDIVIDUALMENTE	
	6. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	8 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	13 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	TRATOR AGRÍCOLA	VASSOURA MECÂNICA
	ROLO COMPACTADOR DE PNEUS	CAMINHÃO BASCULANTE
	VIBRO-ACABADORA DE ASFALTO	ROLO COMPACTADOR ESTÁTICO TANDEM
	CARRINHOS DE MÃO	
	VASSOURAS	PÁS
	ANCINHOS	REGADORES
MATERIAL:	LIGANTE BETUMINOSO	MISTURA AREIA-ASFALTO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Em contrapartida, a Tabela 22 apresenta a recomposição com areia-asfalto a quente, vista no anexo C.38 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT.

Tabela 22 - Execução de recomposição com areia-asfalto a quente

ANEXO C.38	RECOMPOSIÇÃO COM AREIA ASFALTO A QUENTE	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. FAZER O DESVIO DO TRÁFEGO	
	3. ELIMINAR MATERIAIS SOLTOS DA PISTA	
	4. APLICAR A PINTURA DE LIGAÇÃO	
	5. ESPALHAR O MATERIAL EM CAMADAS	
	5.1 COMPACTAR AS CAMADAS INDIVIDUALMENTE	
	6. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	8 SERVENTES

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Tabela 22 - Execução de recomposição com areia-asfalto a quente (continuação)

ANEXO C.38	RECOMPOSIÇÃO COM AREIA ASFALTO A QUENTE	
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	17 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	TRATOR AGRÍCOLA	VASSOURA MECÂNICA
	ROLO COMPACTADOR DE PNEUS	CAMINHÃO BASCULANTE
	VIBRO-ACABADORA DE ASFALTO	ROLO COMPACTADOR ESTÁTICO TANDEM
	CARRINHOS DE MÃO	
	VASSOURAS	PÁS
	ANCINHOS	REGADORES
MATERIAL:	LIGANTE BETUMINOSO	MISTURA AREIA ASFALTO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

A técnica de recomposição com mistura betuminosa usinada a frio pode ser observada na Tabela 23. O serviço é especificado no anexo C.39 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT.

Tabela 23 - Técnica de recomposição com mistura betuminosa usinada a frio

ANEXO C.39	RECOMPOSIÇÃO COM MISTURA BETUMINOSA USINADA A FRIO	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. FAZER O DESVIO DO TRÁFEGO	
	3. ELIMINAR MATERIAIS SOLTOS DA PISTA	
	4. CORRIGIR DEFEITOS E BURACOS EXISTENTES	
	5. APLICAR A PINTURA DE LIGAÇÃO COM ASFALTO EMULSIONADO/DILUÍDO	
	6. ESPALHAR A MASSA ASFÁLTICA NA QUANTIDADE ESTIPULADA	
	6.1 COMPACTAR O MATERIAL DE ACORDO COM A TÉCNICA ESCOLHIDA	
	7. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	8 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	11 M ³	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Tabela 23 - Técnica de recomposição com mistura betuminosa usinada a frio (continuação)

ANEXO C.39	RECOMPOSIÇÃO COM MISTURA BETUMINOSA USINADA A FRIO	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	TRATOR AGRÍCOLA	VASSOURA MECÂNICA
	ROLO COMPACTADOR DE PNEUS	CAMINHÃO BASCULANTE
	VIBRO-ACABADORA DE ASFALTO	ROLO COMPACTADOR ESTÁTICO TANDEM
	CARRINHOS DE MÃO	
	VASSOURAS	PÁS
	ANCINHOS	REGADORES
MATERIAL:	LIGANTE BETUMINOSO	MISTURA BETUMINOSA

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

De outra forma, a Tabela 24 apresenta a técnica de recomposição com mistura betuminosa usinada a quente, anexo C.40 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT.

Tabela 24 - Técnica de recomposição com mistura betuminosa usinada a quente

ANEXO C.40	RECOMPOSIÇÃO COM MISTURA BETUMINOSA USINADA A QUENTE
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO
	2. FAZER O DESVIO DO TRÁFEGO
	3. VARRER A SUPERFÍCIE
	4. APLICAR A PINTURA DE LIGAÇÃO DE MATERIAL BETUMINOSO
	5. DISTRIBUIR A MISTURA ASFÁLTICA COM MOTONIVELADORA
	5.1 INICIAR IMEDIATAMENTE A COMPACTAÇÃO
	5.2 CADA CAMADA DEVE POSSUIR ATÉ 5 CM APÓS COMPACTAÇÃO
	5.3 COMPRESSÃO INICIA NOS BORDOS DE FORMA LONGITUDINAL ATÉ O EIXO
	5.4 COMPRESSÃO NAS CURVAS OCORRE DO BORDO MAIS BAIXO PARA MAIS ALTO
	5.5 COMPRESSÕES ANTERIORES DEVEM SER RECOBERTAS PELA METADE DA LARGURA DO EQUIPAMENTO
	6. AGUARDAR RESFRIAMENTO PARA LIBERAÇÃO DO TRÁFEGO
	7. REMOVER SINALIZAÇÃO

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Tabela 24 - Técnica de recomposição com mistura betuminosa usinada a quente (continuação)

ANEXO C.40	RECOMPOSIÇÃO COM MISTURA BETUMINOSA USINADA A QUENTE	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	8 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	14 M ³	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	TRATOR AGRÍCOLA	VASSOURA MECÂNICA
	ROLO COMPACTADOR DE PNEUS	CAMINHÃO BASCULANTE
	VIBRO-ACABADORA DE ASFALTO	ROLO COMPACTADOR ESTÁTICO TANDEM
	CARRINHOS DE MÃO	
	VASSOURAS	PÁS
	ANCINHOS	
MATERIAL:	LIGANTE BETUMINOSO	MISTURA ASFÁLTICA

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

É importante destacar que a técnica de combate à exsudação com pedrisco, anexo C.41 do Manual de Conservação Rodoviária do DNIT, Tabela 25, tem a necessidade de ser executada em dias quentes ou, no mínimo, com o agregado previamente aquecido.

Tabela 25 - Técnica de conservação para exsudação

ANEXO C.41	COMBATE À EXSUDAÇÃO COM PEDRISCO	
EXECUÇÃO: Verificar necessidade de participação da PRF para controle do tráfego no local	1. COLOCAR SINALIZAÇÃO	
	2. ESPALHAR E COMPACTAR O AGREGADO ESCOLHIDO	
	3. VERIFICAR A COBERTURA TOTAL DA ÁREA TRATADA	
	4. LIBERAR O TRÁFEGO COM CONTROLE DE VELOCIDADE	
	5. REMOVER O EXCESSO DE PEDRISCO	
	6. REMOVER SINALIZAÇÃO	
EQUIPE:	1 ENCARREGADO	5 SERVENTES
PRODUÇÃO POR EQUIPE X HORA:	450 M ²	
FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS:	ROLO TANDEM	CAMINHÃO BASCULANTE
	VASSOURAS	PÁS
MATERIAL:	AGREGADO	

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

4.4 Recomendações técnicas para pavimentos sujeitos a baixas temperaturas

O objetivo geral deste trabalho é consolidar os estudos mais significativos sobre pavimentos congelados através da elaboração de um manual técnico. O manual, um dos resultados obtidos, visa facilitar e orientar os profissionais a respeito da conservação das rodovias brasileiras, especialmente aquelas sujeitas a baixas temperaturas.

A fim de atingir o objetivo definido, foi desenvolvida uma cartilha com recomendações técnicas de conservação de pavimentos, apresentada no APÊNDICE A. O documento, em forma de manual, conta com 22 folhas em formato A5 e apresenta técnicas de manutenção para: trincas, buracos, panelas, exsudação, derrapagem, rugosidade e trilhas de roda.

A sua estrutura foi pensada de forma a facilitar a compreensão do material e visualização dos tópicos, sendo assim, cada defeito de pavimento conta com 2 páginas. A primeira, possui o nome do defeito seguido por uma breve descrição e uma imagem ilustrativa, logo após apresenta a interferência da água/temperatura no material. Já a segunda página contém o tipo de técnica utilizada, a equipe necessária e sua produtividade, ferramentas e equipamentos, e, por fim, as etapas de execução em tópicos. Pode-se observar um layout do manual por meio da Figura 46.

Figura 46 - Layout do manual de recomendações técnicas



Fonte: Autoria própria (2024)

O manual desenvolvido neste trabalho é destinado a engenheiros, encarregados e técnicos que atuam no setor de pavimentação. O conteúdo foi elaborado de forma a ser acessível e aplicável para profissionais diretamente envolvidos na infraestrutura viária, facilitando a tomada de decisões técnicas e operacionais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, a elaboração de um manual técnico sobre a conservação de pavimentos em regiões sujeitas a baixas temperaturas, definiu-se quatro objetivos específicos. Inicialmente, foi feita uma revisão dos estudos existentes sobre pavimentos congelados, que possibilitou o entendimento acerca da variação de temperatura nas características das camadas construtivas. Logo após, uma vasta pesquisa climatológica foi realizada de modo a fornecer 4 mapas com informações sobre áreas e incidências de dias frios. A fim de compreender o processo ocorrido nos pavimentos localizados em regiões com baixas temperaturas no Brasil, foram discutidos os impactos do ciclo de gelo e degelo, bem como maneiras de evitá-los. Por fim, foram compiladas técnicas de conservação de pavimentos com o intuito de evitar os danos extremos causados pela baixa temperatura.

O presente trabalho apresentou a relevância do estudo da influência de baixas temperaturas nos pavimentos brasileiros. A análise e identificação de possíveis melhorias nas rodovias nacionais ocorreu a partir da coleta de dados em fontes nacionais e internacionais, por meio disso pode-se concluir:

- A presença de água no pavimento deve ser minimizada ao máximo. Para isso, é fundamental realizar obras de drenagem adequadas, tratamento de defeitos e manter a camada o mais impermeável possível;
- A infiltração de água pode ser considerada uma das principais causas de defeitos em pavimentos para áreas com baixas temperaturas;
- O congelamento da água possui um alto potencial de destruição, com pressão de expansão podendo chegar até 220 Mpa, ocorre um aumento de até 9% no volume do líquido;
- O principal causador de stress térmico no pavimento não são temperaturas extremamente baixas, e sim grandes variações de temperatura;

Os mapas elaborados como resultado deste estudo tem importância notável no contexto da pavimentação brasileira. A partir deles torna-se possível a escolha,

de forma consciente, de regiões onde serão necessárias operações de manutenção com maior força durante o inverno. Foram observadas no total: 11 estações meteorológicas no Paraná, 16 em Santa Catarina e 32 no Rio Grande do Sul. Ao relacionar os valores expostos nas tabelas do presente trabalho, o estado de Santa Catarina presenciou 439 dias com temperaturas iguais ou menores a zero na última década, 253 dias no Paraná e 577 dias no Rio Grande do Sul. Com isso, pode-se concluir que:

- O Rio Grande do Sul possui a maior quantidade de pontos com temperaturas menores ou iguais a zero, mas, apesar disso, não registra as áreas com maior incidência de dias frios;
- Em Santa Catarina, três locais apresentam uma concentração superior a 50 dias com temperaturas $\leq 0^{\circ}\text{C}$: Major Vieira, com 67 dias; São Joaquim, com 78 dias; e Bom Jardim da Serra, com 99 dias, sendo a estação meteorológicas mais afetada;
- O Paraná apresenta o local com o maior número de dias de temperaturas negativas: São Mateus do Sul, com 112 dias.

Sendo assim, foi permitido que se conhecesse mais sobre a climatologia do Brasil e seus padrões climáticos por meio dos mapas e tabelas expostos.

A cartilha de recomendações técnicas, por sua vez, traz de forma sucinta e ilustrada as melhores técnicas para conservação de pavimentos em locais frios. Por meio dela, pode-se conferir desde os materiais necessários até a forma de execução dos serviços, compilando, em um material, todo o processo realizado. Este manual é de suma importância para o auxílio em obras de conservação e orientação de profissionais da área.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se:

1. Atualizar as pesquisas climatológicas ao longo das décadas, a fim de acompanhar as mudanças climáticas e seus impactos nos pavimentos;
2. Realizar estudos in loco em regiões de baixas temperaturas, com foco em identificar os principais desafios e soluções para pavimentação nessas áreas; e

3. Ampliar o manual técnico para constar sobre todas as etapas, desde o projeto até a execução e manutenção, com enfoque nas melhores práticas para as condições climáticas de interesse.

6 INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA

A infraestrutura necessária abrange os materiais, tanto físicos quanto tecnológicos, que permitem a realização deste trabalho, além de parcerias estratégicas que serão empregadas para o melhor desenvolvimento do tema escolhido. A abordagem detalhada da infraestrutura é de extrema importância para a execução adequada da monografia, uma vez que apresenta de maneira clara e objetiva os elementos que precisam ser utilizados ou adquiridos.

Os recursos necessários para realização do trabalho serão, em sua maioria, tecnológicos. Bibliotecas digitais, bases de dados e pesquisas online, tanto em português quanto em inglês, constituirão a fundamentação teórica para o desenvolvimento do assunto. Neste contexto, um computador com acesso à internet e *softwares* de texto são os responsáveis pela redação e formatação do trabalho, que se fundamenta nos assuntos abordados de forma online.

A incorporação de programas de engenharia, como AutoCad e QGis, comumente utilizados em projetos de pavimentação, desempenha um papel fundamental na execução do trabalho. Uma vez que são fundamentais para a manipulação de projetos de engenharia, estes itens são indispensáveis no presente trabalho.

A realização deste projeto contou com uma parceria de extrema relevância, cujo objetivo é aprofundar ainda mais o conhecimento sobre pavimentos congelados. A cidade de Avon, no estado do Colorado, EUA, caracterizada por temperaturas extremas, possui papel fundamental na colaboração. O engenheiro de projetos e o gerente de frotas (*fleet manager*) da cidade, que concordaram, por meio de diálogos mantidos através de e-mails, participar do trabalho, estão disponíveis para o fornecimento de informações sobre pavimentos congelados. A contribuição de profissionais que trabalham em uma cidade que atrai turistas do mundo inteiro devido à sua neve e clima será fundamental para o embasamento técnico do trabalho. Serão fornecidas informações sobre a remoção de neve na pista, veículos

utilizados para manutenção das rodovias e seus custos, além de materiais empregados na execução de um pavimento adequado a condições de frio extremo.

Logo, a parceria firmada e os recursos tecnológicos são a infraestrutura necessária para o desenvolvimento do trabalho. A importância de recursos teóricos e práticos para a pesquisa contribuirá de forma significativa na realização da estrutura proposta.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGER (Mato Grosso). **Equipe da CRRPH realiza fiscalização com novo equipamento**. 2021. Disponível em: <https://www.ager.mt.gov.br/-/17707902-equipe-da-crrph-realiza-fiscalizacao-com-novo-equipamento>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- AHMAD, T; KHAWAJA, H. Review of Low-Temperature Crack (LTC) Developments in Asphalt Pavements. **The International Journal Of Multiphysics**, Tromsø, v. 12, n. 2, p. 169-188, 30 jun. 2018. Disponível em: <https://www.themultiphysicsjournal.com/index.php/ijm/article/view/12-2-169>. Acesso em: 24 set. 2023.
- ALAWNEH, Mai M.; SOLIMAN, Haithem; ANTHONY, Ania. Investigating the Freeze-Thaw Damage in Asphalt Concrete Using Imaging Techniques. In: 2020 TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA CONFERENCE & EXHIBITION, 2020, Saskatchewan. **Anais eletrônicos**. Ottawa: Tac, 2020. p. 1-21. Disponível em: <https://www.tac-atc.ca/en/conference/papers/investigating-freeze-thaw-damage-asphalt-concrete-using-imaging-techniques>. Acesso em: 25 set. 2023.
- ALMEIDA, Adosindro Joaquim de et al. Evaluation of the influence of water and temperature on the rheological behavior and resistance to fatigue of asphalt mixtures. **Construction And Building Materials**. Florianópolis, p. 401-409. 15 out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.030>. Acesso em: 14 set. 2023.
- ALMEIDA, Antonia Fabiana Marques et al. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL PARA AVALIAÇÃO DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR PENETRAÇÃO. In: 33º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Ceará: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2019. p. 1329-1339. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20IV/2_187_AC.pdf. Acesso em: 21 set. 2023.
- ALMEIDA-COSTA, Ana; BENTA, Agostinho. Fadiga em pavimentos rodoviários flexíveis: uma abordagem experimental. In: CONGRESSO NACIONAL DE MECÂNICA EXPERIMENTAL, 9., 2014, Aveiro. **Anais [...]**. Aveiro: Cnme, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288490419_FADIGA_EM_PAVIMENTOS_RODOVIARIOS_FLEXIVEIS_UMA_ABORDAGEM_EXPERIMENTAL#fullTextFileContent. Acesso em: 24 set. 2023.
- ALVARENGA, Luis. **Prefeitura apresenta novo equipamento tapa-buraco**. 2011. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/rio/prefeitura-apresenta-novo-equipamento-tapa-buraco-3046062>. Acesso em: 06 ago. 2024.
- APEAGYEI, Alex; DAVE, Eshan; BUTTLAR, William. Effect of Cooling Rate on Thermal Cracking of Asphalt Concrete Pavements. **Asphalt Paving Technology**, [S.l.], v. 77, p. 709-738, jan. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260060276_Effect_of_Cooling_Rate_on_Thermal_Cracking_of_Aspphalt_Concrete_Pavements#fullTextFileContent. Acesso em: 24 set. 2023.
- ARAÚJO, Livia Pinheiro de; RIBEIRO, Roberto Carlos da Conceição; CORREIA, Julio César Guedes. Relação entre a resistência mecânica do pavimento asfáltico e a interação de seus constituintes. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2006. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/711>. Acesso em: 15 set. 2023.

ARAUJO, Sãmira Aparecida Portela de. **Fendilhamento em pavimento flexível**. 2019. 34 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Atenas, Paracatu, 2019. Disponível em: http://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/spic/monography/FENDILHAMENTO_EM_PAVIMENTO_FLEXIVEL.pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

BADDINI, Rafael. **Prefeitura intensifica Megaoperação Tapa Buraco em Sorocaba**. 2019. Disponível em: <https://agencia.sorocaba.sp.gov.br/prefeitura-intensifica-megaoperacao-tapa-buraco-em-sorocaba/>. Acesso em: 06 ago. 2024.

BEHNIA, Behzad; BUTTLAR, William; REIS, Henrique. Evaluation of Low-Temperature Cracking Performance of Asphalt Pavements Using Acoustic Emission: a review. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 306, 21 fev. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/2/306>. Acesso em: 06 ago. 2024.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 504f, 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022. 750 p. Disponível em: <https://triumfotransbrasiliana.com.br/wp-content/uploads/2022/07/PA-Completo-2022.pdf>. Acesso em: 02 set. 2023.

BIEDACHA, Marina Myszak. **Dimensionamento de pavimento asfáltico pelo método DNER e comparativo com o atual método mecanístico-empírico MeDiNa**. 2020. 132 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/27496>. Acesso em: 19 jun. 2023.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de conservação rodoviária**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2005. 564p. (IPR. Publ., 710). Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/710_manual_de_conservacao_rodoviaria.pdf. Acesso em: 28 mai. 2024.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719). Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 05 jun. 2023

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa**. Rio de Janeiro, 2020. 78p. (TED 682/2014). Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 23, de 07/05/2010**. Aprova o MN-050.R-5 - Classificação de atividades poluidoras.

BRITISH STANDARD. **EN 12593**: Bitumen and bituminous binders — Determination of the Fraass breaking point. Londres: Bsi, 2007. Disponível em: <https://nazhco.com/wp-content/uploads/2020/09/BS-EN-12593-2007.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.

CARVALHO, Isabela Silva de et al. **Estudo do Concreto Asfáltico Estocável**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. e-12881, dez. 2020. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/40292/21948>. Acesso em: 21 set. 2023.

Case Construction. **Rolo compactador com pneus PT240D**. 2020. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/case/product-20181-2282587.html>. Acesso em: 06 ago. 2024.

CNT, SEST e SENAT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**: relatório gerencial. Brasília, 2019. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/322>. Acesso em: 22 jun. 2023.

COLLEGE PARK. THE WEATHER PREDICTION CENTER. **Storm Summary Message**. College Park: NCEP, 2022. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20221229192738/https://www.wpc.ncep.noaa.gov/discussions/nfdsc1.html>. Acesso em: 05 out. 2023.

CRUZ, Cassia Maria Santos et al. Modais de transporte no Brasil. **Pesquisa e Ação**, [s. l], v. 5, n. 2, p. 1-27, jun. 2019. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/657/710>. Acesso em: 22 jun. 2023.

CUNHA, Henrique Côrtes; OLIVEIRA, Ricardo Fonseca de. Dimensionamento de um pavimento flexível entre os municípios de Monte Carmelo e Abadia dos Dourados. **Getec: Gestão, tecnologias e ciências**, Monte Carmelo, v. 10, n. 26, p. 17-34, abr. 2021. Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2363>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CURTIS, Christine W.; ENSLEY, Keith; EPPS, Jon. **Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption**. Washington: National Academy Of Sciences, 1993. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-a-341.pdf>. Acesso em: 05 set. 2023.

DELAVY, Francieli Schoenhals. **Desempenho de revestimento em terceira faixa executados com ligante HiMA e SBS**: estudo de caso de segmentos monitorados na sc-114. 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/226836/PECV1249-D.pdf?sequence=-1>. Acesso em: 20 set. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2003a. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 006**: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2003b. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/dnit006_2003_pro.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 137**: Pavimentação – Regularização do subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010a. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_137_2010_es-1.pdf. Acesso em: 4 out. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138:** Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010b. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_138_2010_es-1.pdf. Acesso em: 4 out. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 150:** Pavimentação asfáltica – Lama asfáltica – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010c. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_150_2010-es-1.pdf. Acesso em: 22 set. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 154:** Pavimentação asfáltica – Recuperação de defeitos em pavimentos asfálticos - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010d. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_154_2010_es-1.pdf. Acesso em: 17 jul. 2024.

DIN, Ishfaq Mohi Ud; MIR, Mohammad Shafi; FAROOQ, Mohammad Adnan. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Properties of Asphalt Pavements in Cold Regions: a review. **Transportation Research Procedia**, Mumbai, v. 48, p. 3634-3641, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.087>. Acesso em: 23 set. 2023.

FAN, Lili et al. **Pavement Cracks Coupled With Shadows:** a new shadow-crack dataset and a shadow-removal-oriented crack detection approach. *IEEE/Caa Journal Of Automatica Sinica*, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 1593-1607, jul. 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jas.2023.123447>. Disponível em: <https://www.ieee-jas.net/article/doi/10.1109/JAS.2023.123447>. Acesso em: 27 jun. 2024.

FERNANDES, Laís Gonçalves et al. **Abrangência espacial da neve em Santa Catarina, Brasil, nos dias 22 e 23 de julho de 2013.** *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 360-370, jan./abr. 2016. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467546196033>. Acesso em: 11 mar. 2023.

FERREIRA, Wellington Lorrán Gaia et al. **Analysis of water flow in an asphalt pavement surface layer with different thicknesses and different permeability coefficients.** *Road Materials And Pavement Design*, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 82-100, 16 maio 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2019.1617186>. Acesso em: 15 jun. 2024.

FORTES, Fabio Quintela. **Pavimentos de baixo custo:** considerações sobre seus defeitos e propostas de conservação e recuperação. 1994. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-20092022-111004/en.php>. Acesso em: 18 jul. 2024.

GASPAR, Thiago. **Prefeitura inicia operação tapa buraco nas ruas e avenidas de Fortaleza;** saiba como solicitar reparo. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/04/07/prefeitura-inicia-operacao-tapa-buraco-nas-ruas-e-avenidas-de-fortaleza-saiba-como-solicitar-reparo.ghtml>. Acesso em: 06 ago. 2024.

GEWEHR, Juliano. **Tratamento superficial e microrrevestimento.** 2018. Disponível em: <https://asfaltodequalidade.blogspot.com/2018/11/>. Acesso em: 22 set. 2023.

HAILE, Shoddo Elias; LIU, Yuanzhen. **The effect of freeze-thaw on the performance of recycled concrete pavement.** *International Journal Of Advanced Engineering Research And Science*, Taiyuan, v. 10, n. 2, p. 1-14, fev. 2023. Disponível em:

<https://ijaers.com/detail/the-effect-of-freeze-thaw-on-the-performance-of-recycled-concrete-pavement/>. Acesso em: 15 set. 2023.

HILTI. **Martelo demolidor elétrico TE 3000-AVR para demolições pesadas**. 2020. Disponível em: https://www.hilti.com.br/c/CLS_POWER_TOOLS_7125/CLS_DEMOLITION_HAMMER_BREAKER_S_UB_7125/r11668382. Acesso em: 06 ago. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e estados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: 10 mar. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Clima**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/images/educa/clima.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2023.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados históricos anuais**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 12 ago. 2024.

JRCOR. **Empresa de lama asfáltica pronta para pavimento**. Disponível em: <https://www.jrcor.com.br/empresa-lama-asfaltica-pronta-pavimentos.php>. Acesso em: 14 set. 2023.

LAUTHARTE, Alessandra Caroline Moellmann; PONCIANO, Alessandra; BOCK, André Luiz. Análise da influência da variação de temperatura em misturas asfálticas usinadas à quente: módulo de resiliência e tração por compressão diametral. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 28., 2017, Ijuí. **Anais [...]**. Ijuí: Unijui, 2017. ISSN: 2318-3438. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/cricte/article/view/8878/7585>. Acesso em: 20 set. 2023.

LUO, San et al. Impact of Freeze–Thaw Cycles on the Long-Term Performance of Concrete Pavement and Related Improvement Measures: a review. **Materials**. Basel, p. 4568. jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15134568>. Acesso em: 20 set. 2023.

MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (comp.). **Misturas Asfálticas - Conceituação, Materiais e Dosagem**: módulo 4 - dosagem de misturas asfálticas. Brasília: Escola Nacional de Administração Pública, 2022. 19 p. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/7689/4/M%C3%B3dulo%204%20-%20Dosagem%20de%20misturas%20asf%C3%A1lticas.pdf>. Acesso em: 4 out. 2023.

MANTAS, Vasco. Iter populo debetur: rede viária e legislação no império romano. **Pólis/Cosmópolis: identidades globais & locais**, Coimbra, v. 1, n. 1, p. 273-301, dez. 2016. Disponível em: <https://ucdigitalis.uc.pt/pombalina/item/69095>. Acesso em: 28 fev. 2023.

MAZUROWSKI, Piotr (Geórgia). Tensar Corp. **Freeze-Thaw Weathering and Degradation: the effect on pavements**. 2023. Disponível em: <https://www.tensarcorp.com/resources/articles/freeze-thaw-weathering-and-degradation-the-effect-on-road-pavements>. Acesso em: 21 jul. 2023.

MIDEI, Ricardo Augusto. **Projeto de pavimentação**. 2016. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/projeto-de-pavimenta%C3%A7%C3%A3o-ricardo-augusto-midei/>. Acesso em: 4 out. 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Instituto Nacional de Meteorologia (ed.). **Normais climatológicas do Brasil: 1991-2020**. Brasília: INMET, [202-]ja. Mapa de temperaturas mínimas (°C). Disponível em: https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1991-2020/temperatura_minima. Acesso em: 29 jul. 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Instituto Nacional de Meteorologia (ed.). **Normais climatológicas do Brasil: Temperatura**. Brasília: INMET, [202-]b. Temperatura Mínima Mensal e Anual (°C). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/normais/Normal-Climatologica-TMIN.xlsx>. Acesso em: 29 jul. 2023.

MOURA, Edson de. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em trilha e em laboratório**. 2010. 299 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-17082010-094223/publico/Tese_Edson_de_Moura.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

MUNARETTO, Lorimar Francisco; CORREA, Hamilton Luiz; CUNHA, Júlio Araújo Carneiro da. Um estudo sobre as características do método Delphi e de grupo focal, como técnicas na obtenção de dados em pesquisas exploratórias. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 9-24, 7 jan. 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/2734/273428927002.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

ÖZGAN, Ercan; SERIN, Sercan. Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science And Technology*, [S.l.], v. 85, p. 131-136, jan. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.09.003>. Acesso em: 14 set. 2023.

PEREIRA, Georgia Geovania. **Influência da temperatura na resistência à fadiga da mistura asfáltica e na estimativa da vida útil do pavimento**: abordagem da energia dissipada acumulada e fenomenológica. 2017. 121 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/181991>. Acesso em: 18 jun. 2023.

PEREIRA, José Inácio Almeida et al. Tipos de asfalto (CBUQ, AAUQ e RAP): imprimação e pintura de ligação. **Brazilian Journal Of Development**. Curitiba, p. 73916-73933. nov. 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/54368/40221>. Acesso em: 22 set. 2023.

PICCOLI, Mariana Mendes. **ELABORAÇÃO DE TEMPLATE REVIT PARA APROVAÇÃO DE PROJETOS DE PREVENÇÃO CONTRA INCÊNDIO E PÂNICO NO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA**: edificações de ocupação residencial multifamiliar vertical. 2022. 200 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 478 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/756-salomao-pinto>. Acesso em: 20 set. 2023.

PONTE, Raul Serafim et al. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas. **Transportes**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 85–94, 2014. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/792>. Acesso em: 20 set. 2023.

PORTUGAL. INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA. **Normais Climatológicas**. Lisboa: República Portuguesa, [201-]. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/clima/index.html?page=normais.xml>. Acesso em: 29 jul. 2023.

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. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 32., 2018, Gramado.

Anais [...]. Gramado: Anpet, 2018. p. 1831-1842. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/56106/1/2018_eve_jpribeiro.pdf. Acesso em: 18 jul. 2024.

ROCHA, Robson Soares da; COSTA, Eduardo Antonio Lima. **Patologias de Pavimentos Asfálticos e suas Recuperações**: Estudo de Caso da Avenida Pinto de Aguiar. 2009. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Salvador, Bahia, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/29402465/PATOLOGIAS_DE_PAVIMENTOS_ASF%C3%81LTICOS_E_SUAS_RECUPERA%C3%87%C3%95ES_ESTUDO_DE_CASO_DA_AVENIDA_PINTO_DE_AGUIAR... Acesso em: 28 jun. 2024.

SANTA CATARINA. Epagri/ Ciram. Secretaria de Estado da Agricultura de Santa Catarina. **Recordes de frio em SC**. 2011. Elaborado por Maria de Lourdes Mello e Kellen de Cássia B. Kruscinsk. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/recordes-de-frio/>. Acesso em: 29 jul. 2023.

SÃO PAULO. PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Tapa-buraco é realizado em vias do Lajeado, Jardim São Carlos e Jardim São Paulo**. 2019. Disponível em: <https://capital.sp.gov.br/web/guaianases/w/noticias/93364>. Acesso em: 06 ago. 2024.

SCHMITZ, Cláudio Marcus. **A precipitação de neve no Brasil meridional**. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12024>. Acesso em: 10 mar. 2023.

SILVA, José Eudes Marinho da; CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira. Pavimentos de concreto: histórico, tipos e modelos de fadiga. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 3, p. 14-33, 3. tri. 2014. Disponível em: https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2014/RMCT_012_E2C_11.pdf. Acesso em: 22 jun. 2023.

SPADA, Jorge Luís Goudene. **Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea**. 2003. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

TERRENA ASFALTOS. 2017. **Asfalto quente CBUQ**. Disponível em: <https://terrenaasfaltos.com.br/servicos-de-pavimentacao/asfalto-quente-cbuq/>. Acesso em: 22 set. 2023.

**APÊNDICE A - RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA PAVIMENTOS SUJEITOS
A BAIXAS TEMPERATURAS**

RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SUJEITOS A BAIXAS TEMPERATURAS

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia Civil - Instituto Federal de Santa Catarina

Aluna
Maria Eduarda Andrade Ferreira

Orientador
Prof. Dr. Fabio Krueger da Silva

Florianópolis, 2024

Apresentação

Este manual foi elaborado como parte do TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) da aluna Maria Eduarda Andrade Ferreira, graduada no Bacharelado de Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Santa Catarina. O material foi realizado sob a orientação do Prof. Dr. Fabio Krueger da Silva e tem como objetivo a elaboração de um arquivo para o auxílio da conservação de pavimentos que sofrem com a presença de baixas temperaturas em determinados períodos do ano.

Em um país de dimensões continentais com 8.510.345,540 km², conforme dados do IBGE (2022), as rodovias são essenciais para a integração do território brasileiro. No entanto, os pavimentos enfrentam desafios significativos na região, especialmente onde existem condições adversas de clima, como temperaturas negativas. Essa situação pode resultar em danos à estrutura da rodovia. A formação de gelo, acúmulo de água, expansão e contração das camadas devido ao ciclo de gelo e degelo, são capazes de comprometer a qualidade e segurança da via.

Sendo assim, o principal objetivo deste manual é oferecer orientações técnicas para profissionais da engenharia civil envolvidos na manutenção rodoviária de locais sujeitos a temperaturas negativas. Este documento servirá como um recurso adicional para a compreensão e análise do pavimento congelado, além de possibilitar o diagnóstico dos defeitos e apresentar técnicas de recuperação. O material é uma ferramenta de consulta para a tomada de decisões fundamentadas em relação à conservação de pavimentos em condições climáticas adversas.

É importante ressaltar que este manual segue as normas vigentes citadas em sua referência bibliográfica e representa um trabalho acadêmico.

Apresentação

Neste documento serão apresentados 3 tópicos principais: avaliação do pavimento, diagnóstico dos defeitos presentes na superfície e conservação do pavimento.

1. Avaliação do pavimento: envolve a análise do desempenho da camada de revestimento e visa identificar os defeitos nela existentes;
2. Diagnóstico dos defeitos: consiste em verificar a causa e fatores contribuintes para sua ocorrência, com foco na compreensão absoluta da situação; e
3. Conservação do pavimento: aborda e discute técnicas construtivas otimizadas para climas frios.

Sendo assim, o presente manual representa uma contribuição de extrema relevância no contexto de pavimentos congelados. Sua elaboração promove a segurança viária no Brasil, uma vez que oferece diretrizes essenciais para enfrentar os desafios impostos por condições meteorológicas desfavoráveis, um tema negligenciado no país.

É importante ressaltar que este manual segue as normas vigentes citadas em sua referência bibliográfica e representa um trabalho acadêmico.

SUMÁRIO

2	Apresentação
5	Trincas
7	Buracos
9	Panelas
11	Exsudação
13	Derrapagem
15	Rugosidade
17	Trilhas de roda
19	Conclusão
21	Referências

TRINCAS

As trincas, ou fissuras, presentes em um pavimento são indicadores importantes de uma deterioração na camada. Elas podem ser classificadas em dois grupos: isoladas (à esquerda) ou interligadas (à direita).



Fonte: Fan et al. (2023)



Fonte: Fan et al. (2023)



E qual a influência da água e baixas temperaturas nesse defeito?

Este tipo de defeito é extremamente prejudicial ao pavimento uma vez que permite a entrada de água em sua estrutura. Durante períodos frios, a água se expande e se contrai, aumentando ainda mais as trincas e acelerando a degradação do pavimento.

TRINCAS

A técnica de conservação das trincas serve para realizar a selagem desse defeito de pavimento e evitar a penetração de água e outros líquidos na camada.

Para isso, são necessários:



0,1 encarregado;
3 serventes.



Produção da equipe
50 L

Ferramentas e equipamentos:

ROLO MANUAL



Fonte: Fortemac (2024)

PÁ
VASSOURA
VASILHAME
CAMINHÃO CARROÇERIA

MATERIAIS: AGREGADO FINO
(diâmetro menor de 4,75 mm)
MATERIAL BETUMINOSO

EXECUÇÃO (Brasil, 2005)

1. Colocar a sinalização no local;
2. Preencher o defeito com material betuminoso;
3. Espalhar o material com o rolo manual;
4. Cobrir com areia ou pó de pedra;
5. Remover a sinalização.

BURACOS



Fonte: PRF (2021)

Os buracos, localizados no pavimento, podem decorrer de diversos fatores, como: tráfego constante de veículos, cargas mal projetadas, falta de manutenção, variação de temperatura, entre outros.

Por que sua existência é tão prejudicial em locais com temperaturas negativas?



Esse tipo de defeito sofre com a presença de água, pois possibilita a concentração do líquido em uma parte específica do pavimento, permitindo a infiltração em suas camadas de forma extensiva.

A permeabilidade de água na estrutura fortifica o ciclo de congelamento e degelo, uma vez que existe mais do líquido nas camadas.

BURACOS

A técnica de manutenção dos buracos ocorre para nivelar a superfície e proteger as camadas inferiores da infiltração de água.

Equipe:

1 encarregado;
6 serventes.



Produção da equipe



0,5 m³

MATERIAIS:

ASFALTO DILUÍDO
MISTURA BETUMINOSA



Ferramentas e equipamentos:

PICARETA	VASSOURA DE PIAÇAVA	PÁ
SOQUETE	CARRO DE MÃO	PLACA VIBRATÓRIA
		CAMINHÃO BASCULANTE

EXECUÇÃO (Brasil, 2005)

1. Colocar a sinalização
2. Remover o material
Deixar o defeito em formato "retangular"
Verificar se os bordos estão retos e verticais
3. Aplicar pintura de ligação nos bordos e no fundo
4. Adicionar camadas de até 7 cm de mistura asfáltica
5. Compactar as camadas individualmente
6. Nivelar as superfícies e deixá-las limpas
7. Remover a sinalização

PANELAS

As panelas são depressões no pavimento que surgem quando o material de revestimento se desintegra. Elas são causadas principalmente pela ação da água e pelo tráfego intenso, que agrava o desgaste da superfície.



Fonte: Oliveira et al. (2019)



Fonte: Ferreira et al. (2021)



E qual a influência da água?



A ação da água enfraquece a base do pavimento, o que diminui sua capacidade de suporte. A presença de panelas possibilita uma maior infiltração de água na camada, aumentando as fissuras.

PANELAS

A técnica de “tapa-panela” é utilizada para restaurar a integridade da via e uniformizar a superfície.

Para isso, são necessários:



1 encarregado;
6 serventes.



Produção da equipe
2,1 m³

Ferramentas e equipamentos:

PÁ
ANCINHO
CARRO DE MÃO
PICARETA
SOQUETE



Fonte: Elos (2024)

**MA
TE
RI
AIS:**



EXECUÇÃO

(Brasil, 2005)

1. Colocar sinalização
2. Transportar o material de jazidas pré-selecionadas
3. Preencher o defeito com o material escolhido
4. Realizar o nivelamento com pá e ancinho
5. Compactar com auxílio do soquete
6. Remover a sinalização

EXSUDAÇÃO

A exsudação ocorre quando há o surgimento de ligante em abundância na superfície do pavimento (DNIT, 2003). A principal causa é a quantidade excessiva do material na mistura.



Fonte: Hughes (2017)



E qual a ligação com o frio?

A exsudação diminui a aderência dos pneus na estrada, o que aumenta o risco de derrapagem. Em dias ondem ocorrem precipitações ou formação de gelo, a via se torna ainda mais escorregadia, aumentando a chance de acidentes.

EXSUDAÇÃO

O combate a exsudação com pedrisco serve para aumentar a aderência da superfície. Ao espalhar o agregado cria-se uma camada texturizada, aumentando a tração dos pneus.

Para isso, são necessários:



1 encarregado;
5 serventes.



Produção da equipe
450 m²

Ferramentas e equipamentos:

ROLO TANDEM



Fonte: CAT (2024)

CAMINHÃO BASCULANTE
VASSOURAS
PÁS

MATERIAIS:
AGREGADOS

EXECUÇÃO (Brasil, 2005)

1. Colocar sinalização
2. Espalhar e compactar o material escolhido
3. Verificar a cobertura total da área com defeito
4. Liberar o tráfego (com controle de velocidade)
5. Remover o excesso de pedrisco
6. Remover a sinalização

*É importante afirmar que esta técnica só pode ser realizada em dias quentes ou com o agregado previamente aquecido.

DERRAPAGEM



Fonte: Metz (2021)

A derrapagem, como dito no item “Exsudação”, aumenta a chance de acidentes nas estradas.

Como evitar derrapagens e aumentar a segurança dos motoristas e passageiros?



Segundo ABC (2019), devem ser tomadas as seguintes precauções:

1. **Confira a aderências dos pneus utilizados;**
2. **Dirija com suavidade, sem paradas bruscas ou fortes acelerações;**
3. **Não siga as trilhas de roda, nelas existem maior concentração de água e, conseqüentemente, gelo;**
4. **Aumente a distância de segurança do carro da frente;**

DERRAPAGEM

A técnica escolhida para a conservação da via com derrapagem é a lama asfáltica, ela serve para selar e proteger a superfície.

Equipe necessária:



1 encarregado;
10 serventes.



Produção da equipe
838 m²

**MA
TE
RI
AIS:** EMULSÃO
AREIA
PÓ DE PEDRA
CIMENTO

Ferramentas e equipamentos:

TRATOR AGRÍCOLA
CARREGADEIRA DE PNEUS
ROLO COMPACTADOR DE PNEUS
VASSOURA MECÂNICA
CAMINHÃO TANQUE
CAMINHÃO BASCULANTE

TANQUES DE ESTOCAGEM DE ASFALTO
AQUECEDOR DE FLUÍDO TÉRMICO
EQUIPAMENTO DISTRIBUIDOR DE LAMA ASFÁLTICA
RODOS
FERRAMENTAS DE CORTE
VASSOURAS DE PIAÇAVA

EXECUÇÃO (Brasil, 2005)

1. 2 serventes cuidam do espalhamento da massa (mistura, limpeza e umedecimento da pista)
2. 1 servente é responsável pelo controle do teor de cimento
3. 2 serventes corrigem imperfeições da aplicação com rodos
4. 1 servente sinaliza a interrupção da pista
5. Finalizar serviço de modo que o tráfego fique liberado a noite (após a cura)

- Verificar a distância entre os materiais e o caminhão
Não ultrapassar 10 km
- Verificar o tempo de carga
Carga de areia/pó de pedra
Carga de cimento
Carga do distribuidor de água
Carga do distribuidor de emulsão
- Realizar a limpeza da caixa distribuidora em todas as aplicações

RUGOSIDADE

A rugosidade nos pavimentos é de extrema importância, pois confere aderência dos pneus na pista. Apesar disso, quando há textura elevada na camada pode ocorrer desgaste nos pneus e acúmulo de água e sujeira na superfície.



Fonte: Santos (2020)



Qual a influência da água?

A água acumulada na rugosidade excessiva aumenta o risco de aquaplanagem e reduz a aderência dos pneus. Em baixas temperaturas, pode ocorrer o congelamento do líquido, gerando uma camada fina e escorregadia de gelo.

RUGOSIDADE

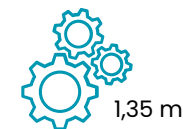
Para melhorar a rugosidade da via, pode-se realizar a aplicação de capa selante com pedrisco. Essa técnica restaura e protege a superfície.

Equipe:

1 encarregado;
8 serventes.



Produção da equipe



1,35 m³

MATERIAIS:

AGREGADO
LIGANTE BETUMINOSO



Ferramentas e equipamentos:

TRATOR AGRÍCOLA
CARREGADEIRA DE PNEUS
ROLO COMPACTADOR DE PNEUS
VASSOURA MECÂNICA
DISTRIBUIDOR DE AGREGADOS
CAMINHÃO BASCULANTE
EQUIPAMENTO DISTRIBUIDOR DE ASFALTO

VASSOURAS
PÁS
ANCINHOS
GARFO
TANQUES DE ESTOCAGEM DE ASFALTO
AQUECEDOR DE FLUÍDO TÉRMICO

EXECUÇÃO (Brasil, 2005)

1. Colocar a sinalização
2. Realizar o desvio do tráfego
3. Eliminar os materiais soltos da pista
4. Aplicar o material betuminoso
 - 4.1 Cobrir imediatamente com agregado (usando espalhador)
 - 4.2 Usar vassoura rastelo para uniformizar a superfície
5. Compactar o agregado
 - 5.1 Interromper quando houver esmagamento
 - 5.2 Remover o excesso de material
6. Liberar o tráfego
7. Remover a sinalização

TRILHAS DE RODA

As trilhas de rodas são sulcos presentes no pavimento, elas se aprofundam onde há passagem extensiva dos pneus.



Água e gelo nas trilhas de roda podem acentuar os problemas associados a essas marcas no pavimento. A infiltração da água na camada é facilitada e gera enfraquecimento da estrutura. Com baixas temperaturas e grandes variações, o ciclo de gelo e degelo atua com força no pavimento.

MATERIAIS:

- BRITA GRADUADA (PARA RECOMPOSIÇÃO DA BASE E SUB-BASE)
- CM-30 OU EMULSÃO ASFÁLTICA (PARA INTERVENÇÕES NA BASE)
- MISTURA BETUMINOSA DE PRÉ-MISTURADO A FRIO (PARA ÁREAS PEQUENAS)
- CONCRETO ASFÁLTICO (PARA RECOMPOSIÇÃO DE PANOS OU SEGMENTOS INTEIROS)

TRILHAS DE RODA

Ferramentas e equipamentos:

- CAMINHÕES COM CAÇAMBAS
- COMPRESSOR DE AR
- PERFURATRIZES PNEUMÁTICAS COM IMPLEMENTO DE CORTE
- SOQUETES MECÂNICOS E/OU VIBRATÓRIOS PORTÁTEIS
- DISTRIBUIDOR DE PRODUTOS BETUMINOSOS
- ROLO PNEUMÁTICO
- ROLO VIBRATÓRIO LISO
- RETRO-ESCAVADEIRA
- CONJUNTO DE SINALIZAÇÃO

EXECUÇÃO (Brasil, 2005)

1. Limpar o local e realizar jateamento de ar comprimido na área
2. Demarcar a área que será reparada
3. Aplicar pintura de ligação com CM-30 ou emulsão asfáltica
4. Lançar mistura asfáltica no rebaixo (camada entre 3 e 8 cm)
Caso seja mais profundo que 8 cm, realizar camadas sucessivas
5. Realizar o espalhamento do material
Áreas grandes: motoniveladora
Áreas pequenas: ancinho
6. Verificar a planicidade das camadas e realizar o chanframento
7. Compactar a camada, de preferência, com rolo pneumático
Pode ser usado rolo liso metálico ou vibratório, se necessário
8. Lançar o revestimento após a finalização da regularização
9. Compactar a camada exclusivamente no sentido longitudinal do tráfego
10. Promover os acabamentos

CONCLUSÃO

CONCLUSÃO

1

O serviço de conservação é de extrema importância para a manutenção e integridade das vias, uma vez que proporciona a funcionalidade do local. As técnicas abordadas reduzem a necessidade de intervenções corretivas e os custos associados a elas, tornando essa prática mais benéfica estrutural e financeiramente.

2

A rápida intervenção nos defeitos, especialmente no inverno, é essencial para evitar problemas cotidianos e aqueles associados ao congelamento. No entanto, a manutenção preventiva deve ser constante em todos os períodos do ano, não só em baixas temperaturas, assegurando as condições ideais de trafegabilidade.

3

Esta cartilha de recomendações técnicas, por sua vez, traz de forma sucinta e ilustrada as melhores práticas para conservação de pavimentos em locais frios. Por meio dela, pode-se conferir desde os materiais necessários até a forma de execução dos serviços, compilando, em um material, todo o processo realizado. Sendo assim, este manual é de suma importância para o auxílio em obras de conservação e orientação de profissionais da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC. **Cómo actuar si hay placas de hielo en la carretera.** 2019. Disponível em: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-como-actuar-si-placas-hielo-carretera-201901101752_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Fmotor%2Freportajes%2Fabci-como-actuar-si-placas-hielo-carretera-201901101752_noticia.html. Acesso em: 16 ago. 2024.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de conservação rodoviária.** 2.ed. Rio de Janeiro, 2005. 564p. (IPR. Publ., 710). Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/710_manual_de_conservacao_rodoviaria.pdf. Acesso em: 28 mai. 2024.

CAT. **Roletes Vibratórios em Tandem CB7.** Disponível em: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/compactors/tandem-vibratory-rollers/227227255591808.html. Acesso em: 10 ago. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005:** Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2003. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

ELOS. **Ancinho Curvo Robusto 16 Dentes C/ Cabo 120CM Ramada.** Disponível em: <https://www.eloscimento.com.br/ferramentas/ancinhos/ancinho-curvo-robusto-16-dentes-c-cabo-120cm-ramada/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FAN, Lili et al. **Pavement Cracks Coupled With Shadows:** a new shadow-crack dataset and a shadow-removal-oriented crack detection approach. *Ieee/Caa Journal Of Automatica Sinica*, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 1593-1607, jul. 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jas.2023.123447>. Disponível em: <https://www.ieee-jas.net/article/doi/10.1109/JAS.2023.123447>. Acesso em: 27 jun. 2024.

FERREIRA, Anne Vieira et al. **Estudo de caso das principais patologias em pavimentos flexíveis na Avenida João Netto de Campos em Catalão – GO.** 2021. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Una de Catalão, Catalão, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/17291>. Acesso em: 16 ago. 2024.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FORTEMAC. **Rolo Compactador Liso Vibratório de Asfalto 265Kg 5,5HP Branco à Gasolina FVC-250.** Disponível em: <https://www.fortemac.com.br/rolo-compactador-liso-vibratorio-de-asfalto-solo-265kg-5hp-frc250/p>. Acesso em: 18 ago. 2024.

HUGHES, Lucas Oliveira; FIGUEIREDO, Vitor Lemos; CRUZ, Zoraide Vieira. **Aplicação de Whitetopping Tradicional para Recuperação de Rodovias.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 2, Vol. 15. pp 05-20., janeiro de 2017. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/recuperacao-de-rodovias>. Acesso em: 14 ago. 2024.

METZ, Justin. **How NOT to Drive in Winter Weather.** 2021. Disponível em: <https://www.erieinsurance.com/blog/winter-driving-donts>. Acesso em: 11 ago. 2024.

OLIVEIRA, Samia Regina Ferreira et al.. **DIAGNÓSTICO DE PATOLOGIAS E AVALIAÇÃO FUNCIONAL EM TRECHO DA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA DO CAMPUS UFMA – BACANGA.** In: Anais da VII Semana de Engenharia do Maranhão. **Anais [...]** São Luís(MA) UFMA, 2019. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/viisengema/196626-DIAGNOSTICO-DE-PATOLOGIAS-E-AVALIACAO-FUNCIONAL-EM-TRECHO-DA-PAVIMENTACAO-ASFALTICA-DO-CAMPUS-UFMA--BACANGA>. Acesso em: 16 ago. 2024.

PRF (Rio Grande do Sul). **Buraco na BR-290 danifica carros e congestiona região das Ilhas, em Porto Alegre.** 2021. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2021/08/buraco-na-br-290-danifica-carros-e-congestiona-regiao-das-ilhas-em-porto-alegre-ckssvhaee0015013bk7xilk3s.html>. Acesso em: 16 ago. 2024.

SANTOS, Carlos. **Textura superficial do pavimento asfáltico:** parte 2. 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/textura-superficial-do-pavimento-asf%C3%A1ltico-parte-2-carlos-santos/>. Acesso em: 11 ago. 2024.