

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

FABRÍCIO KABEYA

**AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO DA
RODOVIA RAPOSO TAVARES (SP-270)**

Ilha Solteira - SP
2024



FABRÍCIO KABEYA

**AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO DA
RODOVIA RAPOSO TAVARES (SP-270)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Área de Concentração: Transportes

Orientador(a): Prof. Dr. Jairo Salim
Pinheiro de Lima

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- K11a Kabeya, Fabrício.
Avaliação de soluções para restauração de pavimento da rodovia Raposo Tavares (SP-270) / Fabrício Kabeya. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
62 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
024
- Orientador: Jairo Salim Pinheiro de Lima
- Inclui bibliografia
1. Pavimentação; . 2. Restauração. 3. Soluções.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURSO: ENGENHARIA CIVIL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSPORTES

REALIZADA EM: 09-12-2024

DISCENTE: Fabrício Kabeya

COMISSÃO EXAMINADORES

1. Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima – UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador).
2. Profa. Dra. Cláudia Scoton Antonio Marques – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinadora).
3. Prof. Dra. Tayla Castilho Criado (Examinadora).

Título do trabalho: Avaliação de soluções para restauração de pavimentos da Rodovia Raposo Tavares (SP-270).

Local: Unesp, Departamento de Engenharia Civil (vídeo chamada).

Horário de início: 10 h

Em sessão pública, após exposição em torno de 30 (trinta minutos), o discente foi arguido oralmente, e no final da exposição foi **"APROVADO"** pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente.

Ilha Solteira, 09 de dezembro de 2024.

Documento assinado digitalmente



JAIRO SALIM PINHEIRO DE LIMA
Data: 09/12/2024 11:25:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima
UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador)

Documento assinado digitalmente



CLAUDIA SCOTON ANTONIO MARQUES
Data: 09/12/2024 16:57:24-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Cláudia Scoton Antonio Marques

Documento assinado digitalmente



TAYLA CASTILHO CRIADO
Data: 09/12/2024 11:53:32-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dra. Tayla Castilho Criado
UNESP/FE Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente



FABRICIO KABEYA
Data: 09/12/2024 14:08:41-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Ciente:

Discente: Fabrício Kabeya

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Cursos: Agronomia, Ciências Biológicas, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 Caixa Postal 31 CEP 15385-000 Ilha Solteira São Paulo Brasil
pabx (18) 3743 1000 fax (18) 3742 2735 scom@adm.feis.unesp.br www.feis.unesp.br

Dedico este trabalho à ...

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e a contribuição de muitas pessoas, às quais gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar saúde, força e sabedoria para concluir este trabalho.

Aos meus pais, Flávio Kabeya e Cristiane Julieta Ferreira Kabeya, pelo apoio constante e por acreditarem em mim em todos os momentos. Sua confiança e motivação foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima, pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Suas sugestões e críticas construtivas foram essenciais para a melhoria deste estudo.

Aos meus amigos, companheirismo, pelas conversas, risadas e pela troca de conhecimentos durante todo o curso. A amizade de vocês tornou esta jornada mais leve.

À Faculdade de Engenharia (FEIS), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira e aos professores do curso de Engenharia Civil, pela formação acadêmica e pelo ambiente de aprendizado que proporcionaram ao longo desses anos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e que não foram mencionados individualmente. A contribuição de cada um foi essencial para a concretização desse objetivo.

RESUMO

A pavimentação de rodovias desempenha um papel fundamental na infraestrutura de transporte, impactando diretamente a eficiência econômica, a segurança viária e a qualidade de vida das pessoas. Este trabalho tem como foco a avaliação de duas técnicas distintas para a restauração do pavimento da Rodovia Raposo Tavares (SP 270), importante via de transporte no estado de São Paulo. As soluções analisadas são: (i) Fresagem e Recomposição com Cimento Asfáltico de Alto Módulo (CAP) e (ii) Reciclagem de Base com subsequente aplicação de revestimento asfáltico. O estudo visa comparar essas soluções em termos de custos de implantação, métodos construtivos e desempenho estrutural, para determinar qual intervenção é mais viável técnica e economicamente para os trechos. A metodologia adotada incluiu uma revisão da literatura existente sobre pavimentação asfáltica, a análise de projetos de restauração anteriores e o acompanhamento em campo de obras em execução. Para a coleta de dados, foram selecionados trechos específicos da Rodovia Raposo Tavares, abrangendo os lotes 2 e 3, que passam pelas cidades de Assis e Ourinhos. Além disso, o desempenho das soluções foi avaliado por meio de monitoramento anual e intermediário utilizando o equipamento FWD (*Falling Weight Deflectometer*), que permite a análise das deflexões do pavimento. A comparação final das soluções considerou não apenas o desempenho técnico e a durabilidade do pavimento, mas também os desafios operacionais e os custos envolvidos em cada método. Os resultados esperados deste trabalho visaram fornecer subsídios valiosos para os órgãos gestores de infraestrutura rodoviária, auxiliando na tomada de decisões sobre a escolha de técnicas de restauração que possam garantir maior durabilidade, menor custo e manutenção eficiente, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável e a melhoria das condições de transporte na região.

Palavras-chave: Pavimentação; Restauração; Cimento Asfáltico de Alto Módulo (CAP).

ABSTRACT

Highway pavement plays a crucial role in transportation infrastructure, directly impacting economic efficiency, road safety, and people's quality of life. This study focuses on evaluating two distinct techniques for the restoration of pavement on the Raposo Tavares Highway (SP 270), a major transportation route in the state of São Paulo. The solutions analyzed are: (i) Milling and Resurfacing with High Modulus Asphalt Concrete (HMAC) and (ii) Base Recycling with subsequent application of asphalt overlay. The study aims to compare these solutions in terms of implementation costs, construction methods, and structural performance to determine which intervention is more technically and economically viable for the restored sections. The adopted methodology includes a review of existing literature on asphalt pavement, analysis of previous restoration projects, and field monitoring of ongoing construction works. For data collection, specific sections of the Raposo Tavares Highway were selected, covering lots 2 and 3, which pass through the cities of Assis and Ourinhos. Moreover, the performance of the solutions will be evaluated through annual and intermediate monitoring using the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment, which allows the analysis of pavement deflections. The final comparison of the solutions will consider not only the technical performance and durability of the pavement but also the operational challenges and costs involved in each method. The expected results of this study aim to provide valuable insights for road infrastructure management bodies, assisting in decision-making regarding the selection of restoration techniques that can ensure greater durability, lower cost, and efficient maintenance, thus contributing to sustainable development and improved transportation conditions in the region.

Keywords: pavement; restoration; High Modulus Asphalt Concrete (HMAC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do pavimento	21
Figura 2 - Resumo dos defeitos - Codificação e Classificação.....	22
Figura 3 - Defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semirrígidos	23
Figura 4 - Outros defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semirrígidos.....	24
Figura 5 - Deflectômetro de impacto rápido	25
Figura 6 - Perfilômetro Inercial Laser	26
Figura 7 - Corredor Raposo Tavares.....	31
Figura 8 - Trecho A	35
Figura 9 - Trecho B	35
Figura 10 - Trecho C	36
Figura 11 - Trecho D	36
Figura 12 - Fresagem do pavimento	38
Figura 13 - Conferência de espessura	38
Figura 14 - Ensaio de viga benkelman	39
Figura 15 - Pintura de ligação	40
Figura 16 - Emulsão aplicada.....	40
Figura 17 - Temperatura da massa	41
Figura 18 - Aplicação da primeira camada de CBUQ.....	41
Figura 19 - Compactação da primeira camada de CBUQ	42
Figura 20 - Pintura de ligação da primeira camada aplicada.....	42
Figura 21 - Aplicação da segunda camada de CBUQ.....	43
Figura 22 - Compactação final da segunda camada de CBUQ.....	43
Figura 23 - Fresagem do revestimento asfáltico	45
Figura 24 - Fresagem da camada de base.....	46
Figura 25 - Conferência de espessura de fresagem	46
Figura 26 - Aplicação de cimento	47
Figura 27 - Reciclando sub-base com teor de 4% de cimento	47
Figura 28 - Compactação de sub-base com rolo pé de carneiro.....	48
Figura 29 - Determinação de umidade	48
Figura 30 - Ensaio de viga benkelman	49
Figura 31 - Aplicação da primeira camada de asfalto espuma na camada de base ..	49

Figura 32 - Compactação da primeira camada de base.....	50
Figura 33 - Aplicação da segunda camada de asfalto espuma na camada de base	50
Figura 34 - Compactação da segunda camada de base	51
Figura 35 - Aplicação de pintura de ligação	51
Figura 36 - Aplicação da primeira camada de CBUQ.....	52
Figura 37 - Compactação da primeira camada de CBUQ	52
Figura 38 - Aplicação da segunda camada de CBUQ	53
Figura 39 - Compactação e acabamento da segunda camada de CBUQ.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho A	54
Tabela 2 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho B	55
Tabela 3 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho C	55
Tabela 4 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho D	55
Tabela 5 - Variação do FWD	56
Tabela 6 - Variação do IRI	56
Tabela 7 - Custos totais trecho A	57
Tabela 8 - Custos totais trecho B	58
Tabela 9 - Custos totais trecho C	58
Tabela 10 - Custos totais trecho D	58
Tabela 11 - Comparação de custos entre trechos e soluções.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARTESP	Agência de Transporte do Estado de São Paulo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FRAM	Fresagem e Recomposição com cap de Alto Módulo
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
HMA	<i>High Modulus Asphalt</i>
IRI	International Roughness Index

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	PAVIMENTAÇÃO.....	19
3.1.1	Pavimentos Flexíveis	19
3.1.2	Pavimentos Semirrígidos	19
3.2	ESTRUTURA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO	20
3.3	PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS.....	21
3.4	<i>FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)</i>	24
3.5	<i>INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI)</i>	25
3.6	PAVIMENTO NO BRASIL	26
3.6.1	Condições Atuais dos Pavimentos.....	26
3.6.2	Perspectivas Futuras	28
3.7	CONCESSÃO DE RODOVIAS.....	29
3.8	ARTESP.....	29
3.9	RODOVIA RAPOSO TAVARES (SP-270).....	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	TRECHOS ESTUDADOS.....	31
4.1.1	Descrição dos Trechos	31
4.2	SOLUÇÕES ADOTADAS.....	32
4.2.1	Fresagem e recomposição com CAP de alto módulo	32
4.2.2	Reciclagem de base + revestimento asfáltico	33
4.3	PARÂMETROS A SEREM ANALISADOS	33
4.4	SELEÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO	34
4.5	PROCEDIMENTOS DE INTERVENÇÃO E SOLUÇÕES DE RESTAURAÇÃO	37
4.5.1	Fresagem e Recomposição com CAP de Alto Módulo	37
4.5.1.1	Etapas de Execução.....	37
4.5.2	Reciclagem de Base + Revestimento Asfáltico	44
4.5.2.1	Etapas de Execução.....	44

4.6	COLETA DE DADOS E MONITORAMENTO	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	ANÁLISE DAS DEFLEXÕES COM FWD	54
5.2	ANÁLISE DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE INTERNACIONAL (IRI) ..	56
5.3	ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DAS SOLUÇÕES	57
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação desempenha papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico de qualquer país, e no Brasil não é diferente. Com uma extensão territorial vasta e economia diversificada, o Brasil depende fortemente de sua infraestrutura viária para garantir a mobilidade de pessoas e o escoamento de produtos, especialmente em regiões que ainda carecem de outros modos de transporte, como ferrovias e hidrovias (MARTINS, 2017; CANDIDO, 2019). A qualidade das rodovias e vias urbanas é determinante para a competitividade econômica, influenciando diretamente o custo do transporte de mercadorias e o acesso a serviços e mercados (FERNANDES *et al.*, 2020).

Além do impacto econômico, a pavimentação tem papel vital na segurança viária. Vias pavimentadas, bem mantidas e com sinalização adequada reduzem significativamente o risco de acidentes, proporcionando viagens mais seguras para os usuários (SILVA, 2018). Em áreas urbanas, a pavimentação também contribui para a melhoria da qualidade de vida, ao minimizar problemas como a poeira e a lama, e ao facilitar o acesso a serviços essenciais, como saúde e educação (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

A estrutura de pavimento asfáltico é composta por diferentes camadas, cada uma com funções específicas para garantir a durabilidade e o desempenho da via. A camada superficial, ou revestimento, é responsável por suportar as cargas diretas do tráfego e proteger as camadas inferiores (ABNT, 2014). Abaixo do revestimento, encontram-se a camada de base, que distribui as cargas recebidas para as camadas inferiores, e a sub-base, que funciona como uma transição entre a base e o subleito, o solo natural (MARTINS & ALMEIDA, 2015). O subleito, por sua vez, fornece o suporte fundamental para todo o sistema do pavimento (COSTA, 2016). A qualidade e a integridade dessas camadas são essenciais para que o pavimento possa resistir às cargas de tráfego e às intempéries ao longo do tempo (RIBEIRO, 2021).

No entanto, com o passar do tempo e o aumento do tráfego, especialmente de veículos pesados, o pavimento asfáltico começa a mostrar sinais de deterioração, como trincas, buracos, deformações e perda de aderência (SOUZA *et al.*, 2022).

Essas falhas, se não tratadas de forma adequada e tempestiva, podem levar à degradação acelerada da via, resultando em maiores custos de reparo e maior risco para os usuários (LIMA E MENDES, 2020). É por isso que a manutenção regular do

pavimento é importante, pois garante a longevidade da infraestrutura viária, mantendo a segurança e a eficiência do transporte (NUNES, 2018). A manutenção pode incluir desde pequenas correções, como reparos de trincas, até intervenções mais complexas, como a fresagem e recomposição de camadas danificadas (ABNT, 2021).

Neste cenário, o estudo e a aplicação de técnicas avançadas de pavimentação, como a fresagem e recomposição com CAP de Alto Módulo e a reciclagem de base, se tornam cada vez mais relevantes pois, não apenas restauram a funcionalidade do pavimento, mas também prolongam a sua vida útil e melhoram a sua resistência às condições extremas de tráfego e clima que são comuns em várias regiões do Brasil (SANTOS *et al.*, 2023; CARVALHO, 2019).

A constante necessidade de manutenção das rodovias brasileiras justifica a busca por métodos que sejam ao mesmo tempo tecnicamente eficazes e economicamente viáveis. A escolha da técnica adequada pode reduzir os custos ao longo do ciclo de vida do pavimento, além de minimizar as interrupções ao tráfego e garantir a segurança dos usuários (RIBEIRO *et al.*, 2021).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é avaliar e comparar duas diferentes técnicas de restauração de pavimentos aplicadas na Rodovia Raposo Tavares (SP 270), visando identificar a solução mais eficiente em termos de viabilidade técnica, desempenho estrutural e custo-benefício. As técnicas em análise são: (i) Fresagem e Recomposição com Cimento Asfáltico de Alto Módulo e (ii) Reciclagem de Base com aplicação de revestimento asfáltico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico deste trabalho é analisar o desempenho estrutural de duas técnicas de restauração de pavimentos, considerando resistência, durabilidade e capacidade de suportar o volume de tráfego da rodovia. Também busca comparar os custos de implantação e manutenção das soluções, levando em conta os materiais utilizados, os equipamentos necessários e o tempo de execução. Outra finalidade é avaliar os métodos construtivos de cada técnica, destacando as principais dificuldades e desafios operacionais enfrentados durante a implementação. Por fim, fornecem-se recomendações baseadas nos resultados obtidos, visando subsidiar futuras decisões de gestão e manutenção de pavimentos na rodovia.

Por meio desta análise comparativa, espera-se contribuir para a otimização da gestão de infraestrutura rodoviária, promovendo práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis para a restauração de pavimentos em rodovias do país.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PAVIMENTAÇÃO

3.1.1 Pavimentos Flexíveis

A pavimentação é um componente fundamental da infraestrutura de transporte, essencial para a mobilidade e conectividade de regiões urbanas e rurais. Segundo Micaelo *et al.* (2019), a pavimentação adequada não apenas facilita o tráfego eficiente de veículos, mas também contribui para a segurança rodoviária, reduz o tempo de viagem e os custos operacionais dos veículos. A pavimentação pode ser classificada em pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos e pavimentos semirrígidos, cada um com características específicas e apropriados para diferentes condições de tráfego.

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma estrutura multicamada, onde cada nível contribui de forma integrada para a distribuição das cargas aplicadas. O revestimento asfáltico, a base granular e o subleito são projetados para trabalhar em conjunto, garantindo conforto ao usuário e resistência às solicitações de tráfego. Esse tipo de pavimento destaca-se por sua capacidade de acomodar deformações elásticas, o que o torna mais resistente a variações de carga e assentamentos diferenciais do terreno.

No entanto, os pavimentos flexíveis estão mais sujeitos a patologias como trilhas de roda, fissuras e desagregações, especialmente sob condições de tráfego intenso e falta de manutenção adequada. Conforme descrito por Bernucci *et al.* (2008), as suas flexibilidade e adaptabilidade os tornam amplamente utilizados em rodovias e vias urbanas, sendo particularmente vantajosos em situações em que a economia inicial e a rapidez de execução são prioritárias. Além disso, métodos de manutenção como fresagem e reciclagem têm mostrado grande eficiência para restaurar a sua funcionalidade de forma econômica.

3.1.2 Pavimentos Semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos representam uma solução intermediária entre os pavimentos flexíveis e rígidos, combinando características de ambos. Eles são

compostos por uma camada de base estabilizada com cimento ou outros agentes cimentantes, recoberta por revestimento asfáltico. Essa configuração proporciona maior rigidez estrutural em relação aos pavimentos flexíveis, melhorando a capacidade de suporte das cargas de tráfego e reduzindo deformações permanentes. Sendo assim, de acordo com o DNIT (2005), os pavimentos semirrígidos são amplamente utilizados em rodovias de tráfego pesado, onde o desempenho estrutural é um requisito essencial.

No entanto, por possuírem camadas cimentadas, os pavimentos semirrígidos apresentam sensibilidade maior a fissurações reflexivas, que ocorrem devido à rigidez da base estabilizada (SILVA; LIMA, 2021). Essas trincas podem se propagar até o revestimento, comprometendo o desempenho funcional e estético do pavimento (PEREIRA; CARVALHO, 2020). A manutenção desse tipo de pavimento frequentemente envolve técnicas específicas, como selagem de trincas ou reforço asfáltico, para mitigar os efeitos das fissuras e prolongar sua vida útil (ABNT, 2019).

3.2 ESTRUTURA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

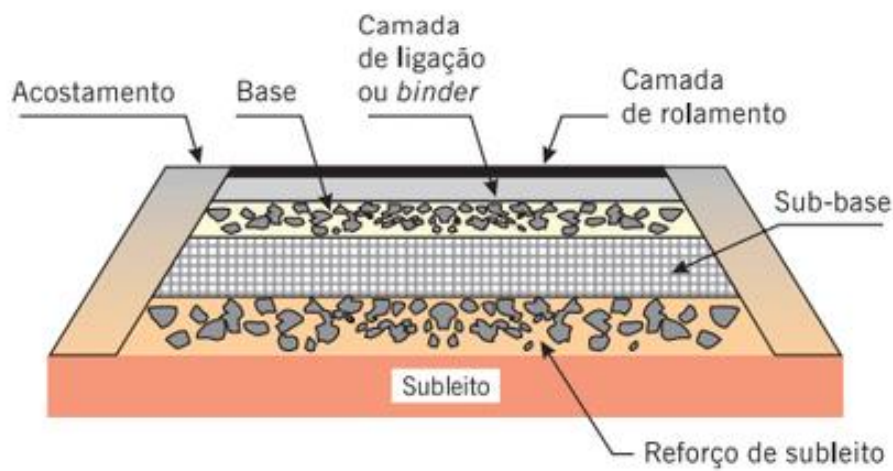
A estrutura de pavimento asfáltico é composta por diversas camadas que funcionam em conjunto para suportar o tráfego e proteger o subleito contra deformações permanentes e danos. De acordo com Pinto e Preussler (2012), as camadas principais incluem:

- camada de revestimento (ou superfície): é a camada visível, composta por misturas asfálticas de alta qualidade. A sua principal função é fornecer uma superfície de rodagem segura, durável e resistente ao desgaste. A escolha do tipo de mistura asfáltica e sua espessura depende das condições de tráfego e clima.
- camada de base: localizada diretamente abaixo do revestimento, a base serve para suportar as cargas provenientes do tráfego e distribuí-las uniformemente para as camadas inferiores. Pode ser composta por materiais granulados estabilizados ou por misturas asfálticas.
- camada de sub-base: camada adicional de suporte, feita de materiais granulados de menor qualidade, que proporciona suporte estrutural adicional e facilita a drenagem. A sua presença é mais comum em pavimentos sujeitos a tráfego pesado e condições adversas de solo.

- subleito: é a fundação do pavimento, composta pelo solo natural ou solo melhorado. A qualidade do subleito é crítica para o desempenho de longo prazo do pavimento, e pode ser necessário melhorar as suas propriedades por meio de técnicas de estabilização (ARAÚJO, 2015).

A Figura 1 ilustra a seção transversal da estrutura de pavimento.

Figura 1 - Estrutura do pavimento



Fonte: Bernucci *et al*, 2007.

3.3 PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS

As patologias em pavimentos consistem em defeitos que surgem na estrutura rodoviária devido a fatores como tráfego excessivo, intempéries, falhas de projeto ou execução e uso de materiais inadequados. Essas manifestações comprometem o desempenho funcional, estrutural e a segurança das vias, sendo fundamental identificá-las e corrigi-las para prolongar a vida útil do pavimento. Entre as principais patologias observadas em pavimentos flexíveis, destacam-se as trincas, deformações plásticas e defeitos relacionados à deterioração superficial. A Figura 2 resume os defeitos e as suas respectivas codificações e classificações conforme a Norma DNIT 005/2003 - TER: Procedimento - Pavimentos Flexíveis (2003).

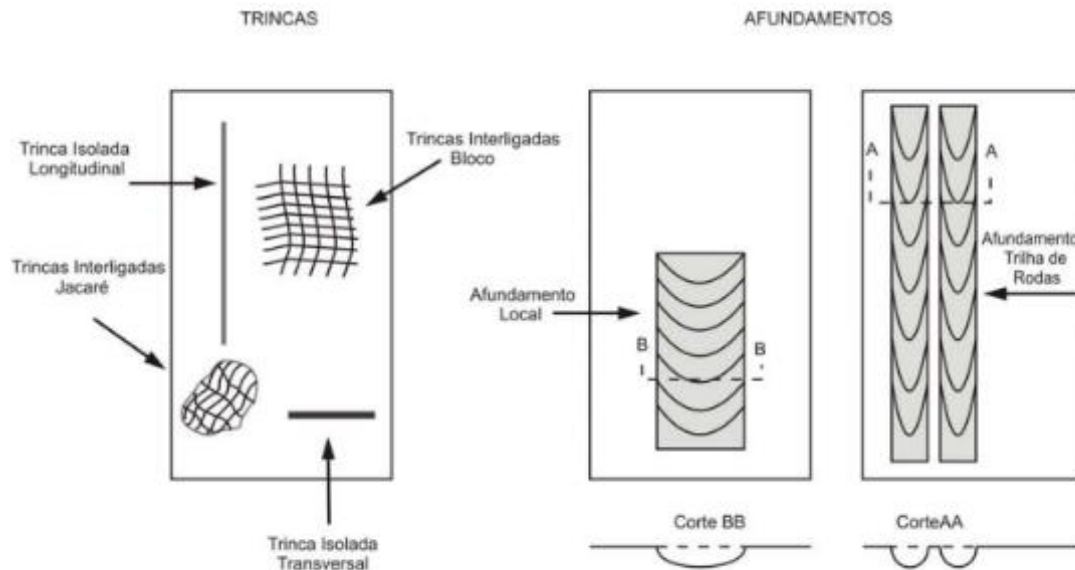
Figura 2 - Resumo dos defeitos - Codificação e Classificação

FENDAS				CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS			
Fissuras				FI	-	-	-	
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3	
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3	
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3	
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3	
	Trincas Interligadas	"Jacaré"		Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
				Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3	
	Trincas Interligadas	"Bloco"		Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
				Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3
OUTROS DEFEITOS				CODIFICAÇÃO				
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ALP				
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ATP				
	De Consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC				
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ATC				
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base				O				
Escorregamento (do revestimento betuminoso)				E				
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento				EX				
Desgaste acentuado na superfície do revestimento				D				
"Painéis" ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores				P				
Remendos			Remendo Superficial		RS			
			Remendo Profundo		RP			

Fonte: DNIT, 2003.

As trincas são fissuras que podem se apresentar em diversas formas, como trincas longitudinais e transversais em blocos (conforme Figura 3). Elas geralmente ocorrem devido à fadiga do pavimento, retração térmica ou movimentação do subleito. Esses defeitos permitem a infiltração de água, reduzindo a resistência das camadas inferiores e acelerando o processo de deterioração.

Figura 3 - Defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semirrígidos

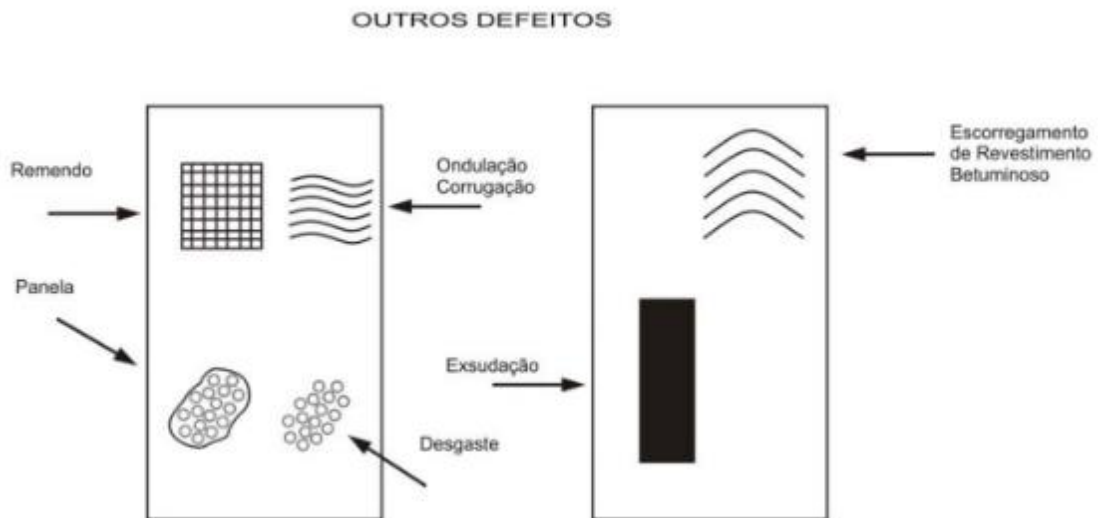


Fonte: DNIT, 2003.

As deformações plásticas incluem afundamentos, trilhas de roda e ondulações na superfície. Esses problemas são frequentemente causados por cargas de tráfego excessivas, insuficiência no dimensionamento estrutural ou materiais inadequados na camada de revestimento (SILVA; LIMA, 2020). Trilhas de roda, em particular, são comuns em vias com tráfego intenso de veículos pesados, resultando em sulcos que acumulam água, aumentando o risco de hidroplanagem (CNT, 2021).

Os defeitos superficiais, como exsudações, desagregação e polimento da superfície, também são patologias comuns (Figura 4). A exsudação ocorre quando o ligante asfáltico migra para a superfície, formando uma película escorregadia que reduz a aderência dos pneus (SILVA; SANTOS, 2019). A desagregação, por sua vez, é caracterizada pelo desprendimento de agregados da camada asfáltica, geralmente causada por intempéries ou falhas na adesão entre o ligante e os agregados (PEREIRA *et al.*, 2020). O polimento superficial, que reduz a macrotextura do pavimento, é provocado pelo tráfego contínuo, especialmente em condições de alta velocidade.

Figura 4 - Outros defeitos ocorrentes na superfície dos pavimentos flexíveis e semirrígidos



Fonte: DNIT, 2003.

3.4 **FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)**

O FWD é o equipamento (Figura 5) utilizado para avaliar as características estruturais do pavimento por meio da medição das deflexões que ele apresenta sob uma carga simulada. O equipamento aplica uma carga de impacto na superfície do pavimento, e sensores dispostos radialmente captam as deflexões resultantes em diferentes distâncias da aplicação desta carga. Os dados obtidos permitem a análise da capacidade de suporte das camadas do pavimento e a identificação de possíveis problemas estruturais, como fraqueza em camadas específicas ou insuficiência no subleito. O uso do FWD é essencial em estudos de restauração, como os que envolvem a reciclagem de base ou a aplicação de misturas asfálticas de alto módulo, permitindo uma avaliação técnica precisa da eficácia das soluções aplicadas.

Figura 5 - Deflectômetro de impacto rápido



Fonte: Dynatest, 2024.

3.5 **INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI)**

O IRI é uma medida amplamente utilizada para avaliar a irregularidade longitudinal das superfícies dos pavimentos. Esse índice é calculado dos perfis longitudinais da superfície da rodovia, utilizando equipamentos específicos (Figura 6) que simulam o comportamento de um veículo ao trafegar pela via. Tal indicador é expresso em metros por quilômetro (m/km) e está diretamente relacionado ao conforto do usuário e ao desempenho funcional do pavimento. Valores mais baixos de IRI indicam pavimentos mais regulares e confortáveis, enquanto valores mais altos refletem condições irregulares que podem comprometer a segurança e aumentar os custos de operação veicular. O IRI é fundamental para o monitoramento da qualidade do pavimento ao longo do tempo, permitindo o planejamento de intervenções de manutenção baseadas em critérios objetivos.

- IRI < 2,0 m/km: pavimento em excelente condição, com elevado conforto;
- IRI entre 2,0 e 4,0 m/km: condição aceitável, ainda confortável para os usuários;
- IRI > 4,0 m/km: pavimento irregular, reduzindo o conforto e podendo gerar desgaste nos veículos e custos adicionais de manutenção.

Figura 6 - Perfilômetro Inercial Laser



Fonte: Cibernétrica, 2024.

3.6 PAVIMENTO NO BRASIL

3.6.1 Condições Atuais dos Pavimentos

O Brasil possui uma das maiores redes rodoviárias do mundo, com mais de 1,7 milhão de quilômetros de estradas, dos quais aproximadamente 213 mil quilômetros são pavimentados (Confederação Nacional do Transporte, 2020). Sendo a infraestrutura rodoviária parte fundamental para o desenvolvimento econômico do país, pois cerca de 60% das cargas e 95% dos passageiros são transportados por rodovias (DNIT, 2005). A extensa malha rodoviária reflete a importância do transporte terrestre no contexto brasileiro, tanto para o escoamento da produção agrícola e industrial quanto para a mobilidade de pessoas entre os diversos estados e regiões.

Historicamente, o desenvolvimento das rodovias no Brasil ganhou impulso significativo na década de 1950, durante o governo de Juscelino Kubitschek, com a construção de rodovias como parte do plano de integração nacional. Desde então, a

expansão e a modernização da rede rodoviária têm sido prioridade, especialmente considerando a vasta extensão territorial e a diversidade geográfica do país. No entanto, o crescimento rápido nem sempre foi acompanhado de investimentos equivalentes em manutenção e modernização, o que levou a problemas de conservação e degradação da qualidade dos pavimentos (LIMA *et al.*, 2015).

As condições dos pavimentos rodoviários no Brasil variam amplamente de acordo com a região e tipo de rodovia. Estudos da Confederação Nacional do Transporte (CNT) mostram que um número significativo das rodovias brasileiras apresenta condições insatisfatórias, com problemas como buracos, trincas, deformações plásticas e má sinalização. Essas falhas são frequentemente associadas à falta de manutenção adequada, ao uso de materiais de baixa qualidade e à falha na fiscalização de obras e serviços. As condições precárias dos pavimentos resultam em custos mais altos para os usuários, incluindo maiores despesas com combustível e manutenção dos veículos, além de contribuírem para o aumento de acidentes e do tempo de viagem.

De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias 2024, que avaliou 111.853 quilômetros de rodovias pavimentadas, 7,5% foram classificadas como em estado "ótimo", 25,5% como "bom", 40,4% como "regular", 20,8% como "ruim" e 5,8% como "péssimo". Esses dados indicam que mais de 26% das rodovias avaliadas estão em condições inadequadas, necessitando de intervenções urgentes para evitar a deterioração acelerada.

A pesquisa também destaca que rodovias concedidas à iniciativa privada apresentam melhores condições em comparação às administradas pelo poder público. Cerca de 63,1% das rodovias concedidas foram avaliadas como "ótimas" ou "boas", enquanto apenas 22,7% das rodovias sob gestão pública alcançaram essas classificações.

Além disso, a pesquisa identificou mais de 2.400 pontos críticos nas rodovias brasileiras, incluindo pavimento destruído, pontes caídas, erosão na pista e buracos, evidenciando a necessidade de investimentos contínuos para garantir a segurança e a eficiência do transporte no país. Esses dados reforçam a importância de investimentos contínuos na infraestrutura rodoviária para melhorar as condições dos pavimentos, reduzir custos para os usuários e aumentar a segurança nas estradas brasileiras.

- clima variável: o Brasil possui vasta gama de condições climáticas, desde climas tropicais úmidos até climas semiáridos e subtropicais, que afetam a durabilidade dos pavimentos. O excesso de chuvas em algumas regiões pode levar à infiltração de água e à deterioração acelerada do pavimento, enquanto temperaturas elevadas em outras áreas podem causar deformações plásticas.
- tráfego intenso: a crescente frota de veículos e o aumento do tráfego de carga pesada têm sobrecarregado a capacidade de suporte de muitos pavimentos, especialmente em corredores rodoviários estratégicos. As cargas pesadas podem causar danos significativos ao pavimento, incluindo a formação de trilhas de roda e trincas por fadiga.
- falta de investimento em manutenção: historicamente, os investimentos em infraestrutura no Brasil têm sido direcionados mais para a construção de novas rodovias do que para a manutenção das existentes. Essa abordagem resultou em acúmulo de obras de manutenção adiadas, aumentando a deterioração dos pavimentos e os custos de reparo a longo prazo (FREITAS *et al.*, 2014).
- uso de materiais inadequados: em muitos casos, a falta de controle de qualidade e o uso de materiais inadequados para as condições locais contribuíram para a baixa durabilidade dos pavimentos. A seleção de materiais que não atendem aos requisitos de desempenho pode resultar em falhas prematuras, aumentando a necessidade de reparos e reabilitações frequentes (PEREIRA *et al.*, 2018).

Apesar dos desafios, avanços significativos acontecem na área de pavimentação rodoviária no Brasil. Técnicas como o uso de misturas asfálticas modificadas, incluindo o CAP de Alto Módulo, são adotadas para aumentar a vida útil dos pavimentos e reduzir os custos de manutenção. A introdução de tecnologias de pavimentação, como a pavimentação reciclada e a utilização de aditivos que melhoram a resistência à fadiga e à deformação, tem mostrado resultados promissores em termos de durabilidade e sustentabilidade (SANTOS *et al.*, 2017).

3.6.2 Perspectivas Futuras

O futuro da pavimentação no Brasil dependerá de uma abordagem integrada que combine investimentos em manutenção preventiva, o uso de materiais de alta

qualidade e tecnologias inovadoras. A adoção de políticas públicas que priorizem a conservação e a modernização da infraestrutura existente será crucial para garantir a eficiência do sistema de transporte rodoviário. Além disso, o fortalecimento da fiscalização e da regulamentação pode assegurar que as obras de pavimentação sejam realizadas de acordo com os padrões de qualidade necessários para enfrentar as demandas de tráfego e clima do país (ARAÚJO, 2015).

3.7 CONCESSÃO DE RODOVIAS

A concessão de rodovias é uma prática comum em diversos países para a gestão eficiente da infraestrutura rodoviária. No Brasil, o modelo de concessão permite que empresas privadas operem e mantenham rodovias em troca do direito de cobrar pedágios. Essa prática tem se mostrado eficaz em termos de melhorar a qualidade das rodovias, pois as concessionárias têm incentivos para investir em melhorias e manutenção contínua para garantir a segurança e a satisfação dos usuários (BNDES, 2010).

A concessão de rodovias envolve contratos de longo prazo, geralmente de 20 a 30 anos, e inclui cláusulas específicas sobre os padrões de qualidade, manutenção e melhorias a serem realizadas. As concessionárias são responsáveis por realizar investimentos significativos em infraestrutura, incluindo a instalação de sistemas de pedágio, construção de áreas de descanso, e implementação de tecnologias de monitoramento de tráfego (CUNHA, 2014).

3.8 ARTESP

A Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) desempenha papel fundamental na regulação e supervisão das concessões de rodovias no estado de São Paulo. A ARTESP foi criada para garantir que as concessionárias cumpram suas obrigações contratuais e que as rodovias sejam mantidas em boas condições de operação. A agência monitora a qualidade dos serviços prestados, aprova reajustes de tarifas de pedágio e assegura que as intervenções necessárias sejam realizadas para a segurança e conforto dos usuários (ARTESP, 2020).

A instituição utiliza indicadores de desempenho para avaliar a qualidade das rodovias concedidas, incluindo índices de qualidade do pavimento, segurança viária e

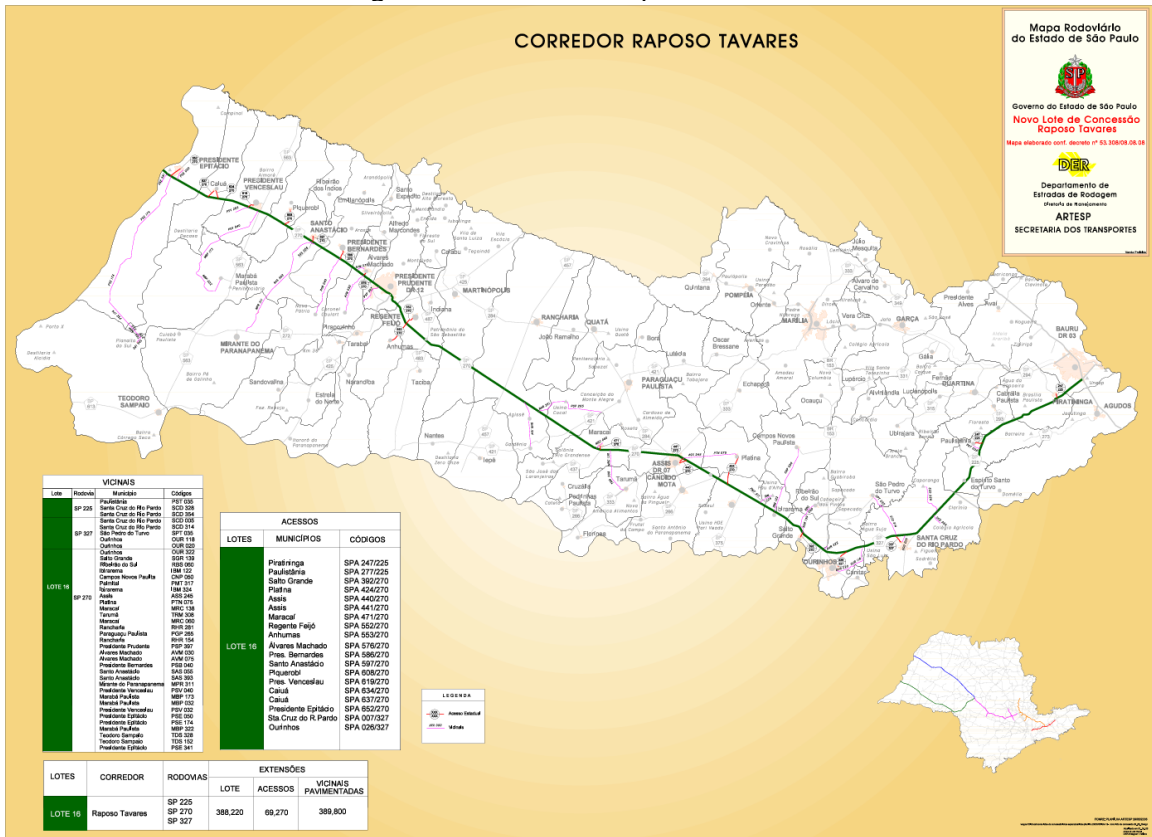
satisfação dos usuários. Em casos de descumprimento das obrigações, a agência tem o poder de aplicar penalidades e exigir melhorias imediatas, garantindo que os interesses dos usuários sejam protegidos (SOUSA, 2019).

3.9 RODOVIA RAPOSO TAVARES (SP-270)

A Rodovia Raposo Tavares (SP 270) é uma das principais vias de transporte do estado de São Paulo, desempenhando papel vital na interligação de diversas regiões e no escoamento de produtos agrícolas e industriais. Com extensão de aproximadamente 654 quilômetros, a rodovia conecta a capital paulista à divisa com o estado do Paraná, passando por importantes cidades como São Paulo, Cotia, Sorocaba, Assis, Ourinhos e Presidente Prudente. Essa infraestrutura é fundamental não apenas para o transporte de cargas, mas também para o deslocamento de pessoas, influenciando diretamente o desenvolvimento econômico e social das áreas que atravessa. A Figura 7 é um mapa que ilustra o caminamento da SP 270 no estado de São Paulo.

Ao longo dos anos, a Raposo Tavares experimentou aumento significativo no volume de tráfego, tanto de veículos leves quanto pesados. Esse crescimento demanda constante manutenção e aprimoramento de suas condições de tráfego para garantir a segurança e a eficiência da rodovia. A degradação do pavimento é uma preocupação constante, pois afeta não apenas a qualidade do tráfego e a segurança dos usuários, mas também pode resultar em maiores custos operacionais e impactos ambientais devido à necessidade de frequentes reparos e riscos de acidentes.

Figura 7 - Corredor Raposo Tavares



Fonte: ARTESP, 2008.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 TRECHOS ESTUDADOS

4.1.1 Descrição dos Trechos

No contexto deste trabalho, foram selecionados trechos específicos da Rodovia Raposo Tavares para servir como amostragem na avaliação das técnicas de restauração de pavimento.

Os trechos escolhidos são os lotes 2 e 3 que apresentam características representativas da rodovia e são fundamentais para o estudo comparativo das soluções propostas. Esses lotes foram selecionados com base em critérios de tráfego, condições do pavimento e localização estratégica, cobrindo uma diversidade de cenários que permitem uma análise abrangente.

- Lote 2. Este trecho está localizado entre os quilômetros 381+703 e 434+800 da rodovia, abrangendo uma extensão significativa que passa pela cidade de Assis. Este trecho foi escolhido devido ao volume de tráfego elevado e à importância regional, servindo como corredor vital para o transporte de mercadorias e o deslocamento de pessoas. A análise neste trecho permite avaliar a eficácia das técnicas de restauração em áreas com tráfego intenso e alto desgaste do pavimento.
- Lote 3. Situado entre os quilômetros 434+800 e 481+500, o lote 3 passa pela cidade de Ourinhos, outro ponto importante no trajeto da Rodovia Raposo Tavares. Este trecho complementa a amostragem por incluir uma área que experimenta uma combinação de tráfego urbano e interurbano, proporcionando dados valiosos sobre o desempenho das técnicas de pavimentação em diferentes condições de uso.

4.2 SOLUÇÕES ADOTADAS

4.2.1 Fresagem e recomposição com CAP de alto módulo

A fresagem é o processo pelo qual o revestimento asfáltico desgastado é removido, total ou parcialmente, utilizando equipamentos específicos, como fresadoras, que garantem precisão na remoção. Essa operação é essencial para eliminar imperfeições superficiais e preparar a superfície para a aplicação de novas camadas, promovendo uma base nivelada e adequada para a recomposição do pavimento (Bernucci *et al.*, 2008).

Após a conclusão da fresagem, realiza-se uma avaliação detalhada da base existente. Caso necessário, são feitas correções ou reforços estruturais, etapa indispensável para assegurar a durabilidade e o desempenho da nova camada asfáltica (DNIT, 2005).

O uso do ligante CAP 10/20 de alto módulo em misturas asfálticas proporciona significativa rigidez estrutural, melhorando a resistência do pavimento a deformações permanentes e esforços repetitivos. A sua aplicação é realizada com o auxílio de equipamentos especializados, seguidos de compactação rigorosa, garantindo que os requisitos de densidade e estabilidade estabelecidos no projeto sejam atendidos (MEHTA & MONISMITH, 2004).

4.2.2 Reciclagem de base + revestimento asfáltico

A reciclagem de base é uma técnica que consiste em reaproveitar o material da camada de base do pavimento existente, promovendo a sua homogeneização e, quando necessário, a adição de novos materiais estabilizantes, como cimento, cal ou emulsões asfálticas. Este processo é realizado com equipamentos específicos, como recicladoras ou estabilizadoras, que garantem uma mistura uniforme, restabelecendo as propriedades estruturais da camada de base (DNIT, 2005).

Após a reciclagem, é essencial avaliar a qualidade e a resistência da nova base reciclada. Caso necessário, podem ser realizados reforços adicionais para garantir que a camada suporte as solicitações de tráfego e condições ambientais. Em seguida, aplica-se o revestimento asfáltico, que atua como camada de rolamento, protegendo a base e proporcionando condições adequadas de funcionalidade, como conforto e segurança para os usuários (BERNUCCI *et al.*, 2008).

4.3 PARÂMETROS A SEREM ANALISADOS

Para avaliar a eficácia das soluções de restauração de pavimentos, consideram-se os seguintes parâmetros:

- desempenho estrutural: será avaliado por meio de ensaios de deflexão utilizando o Falling Weight Deflectometer (FWD). Este equipamento permite medir a capacidade do pavimento suportar cargas, fornecendo dados sobre a rigidez e a integridade estrutural do pavimento.
- custos de implantação: a análise incluirá uma comparação dos custos de cada técnica de restauração. Isso permitirá determinar a solução mais econômica.
- qualidade funcional da superfície do pavimento: serão avaliados os efeitos das técnicas de restauração na segurança dos usuários da rodovia, incluindo a aderência da superfície de rodagem. Além disso, o conforto e a segurança dos usuários serão considerados, com base na suavidade da superfície a partir dos dados de IRI.

4.4 SELEÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO

Para uma análise representativa foram selecionados trechos da Rodovia Raposo Tavares submetidos a diferentes tipos de intervenção de restauração (Quadro 1) e apresentam variações em condições de tráfego e ambientais. Os lotes escolhidos, que estão sob concessão, incluem:

- Lote 2: km 381+703 ao km 434+800 (região de Assis);
- Lote 3: km 434+800 ao km 481+500 (região de Ourinhos);

Esses lotes foram escolhidos pela diversidade nas características estruturais do pavimento e histórico de intervenções, permitindo uma análise mais abrangente do desempenho de cada método. O Quadro 1 apresenta as soluções aplicadas, sendo classificadas pelo número do lote, trechos (A, B, C e D) e suas respectivas localizações na rodovia.

Quadro 1 - Trechos analisados

Solução	Lote	Trecho	Rodovia	km inicial	km final	Faixa	Sentido
Reciclagem de base	2	A	SP-270	427,340	427,540	2	Oeste
Reciclagem de base	3	B	SP-270	438,853	439,013	2	Oeste
FRAM	2	C	SP-270	414,624	414,828	2	Oeste
FRAM	3	D	SP-270	442,181	442,396	2	Oeste

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As figuras 9, 10, 11 e 12 ilustram os trechos descritos no Quadro 1.

Figura 8 - Trecho A



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 9 - Trecho B



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 10 - Trecho C



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 11 - Trecho D



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.5 PROCEDIMENTOS DE INTERVENÇÃO E SOLUÇÕES DE RESTAURAÇÃO

4.5.1 Fresagem e Recomposição com CAP de Alto Módulo

4.5.1.1 Etapas de Execução

A técnica de fresagem e recomposição com CAP 10/20 de alto módulo é um método de restauração de pavimentos que combina a remoção controlada das camadas deterioradas com a aplicação de um novo revestimento asfáltico de alta rigidez. O processo inicia com a fresagem do pavimento até a profundidade definida no projeto, seguida pela conferência da espessura removida e avaliação da base existente. Caso necessário, são realizados ajustes ou reforços estruturais para garantir a estabilidade.

Uma pintura de ligação é aplicada para promover a adesão entre as camadas, e a recomposição ocorre em etapas com a aplicação de CBUQ modificado com CAP 10/20, que confere maior resistência a deformações e aumento da vida útil do pavimento. As camadas são aplicadas em sequência, sendo compactadas rigorosamente para atingir os parâmetros de densidade e estabilidade.

O CAP 10/20 é um ligante asfáltico de alta consistência e baixa penetração, amplamente utilizado em misturas asfálticas de alto módulo, como o *high modulus asphalt* (HMA). A sua classificação é definida de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 6576 (2007), que especifica o intervalo de penetração determinado por ensaios padronizados. Este material é conhecido por sua elevada rigidez, sendo indicado para pavimentos sujeitos a cargas pesadas e altas temperaturas. Tecnicamente, o CAP 10/20 apresenta maior resistência ao envelhecimento oxidativo, devido à sua menor suscetibilidade a mudanças químicas e físicas durante a sua vida útil, o que prolonga o desempenho do pavimento. Essa característica resulta em maior durabilidade, especialmente em condições de tráfego intenso e climas quentes. Além disso, a sua alta viscosidade reduz a deformação plástica do pavimento, minimizando a formação de trilhas de roda, uma patologia comum em pavimentos flexíveis.

O processo inicia pela fresagem da camada de revestimento (Figura 12), tendo remoção controlada da camada superior do pavimento, atingindo apenas o nível deteriorado.

Figura 12 - Fresagem do pavimento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após a fresagem, verificou-se a espessura removida com o auxílio de réguas de medição (Figura 13). A espessura foi comparada com as especificações do projeto, e ajustes foram realizados quando necessário.

Figura 13 - Conferência de espessura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O ensaio de deflexão foi realizado com a viga Benkelman (Figura 14) para avaliar a capacidade estrutural da base.

Figura 14 - Ensaio de viga benkelman



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Aplicou-se a pintura de ligação (Figura 15) com emulsão asfáltica sobre a superfície fresada e limpa. A emulsão foi distribuída uniformemente, garantindo a aderência entre as camadas.

Figura 15 - Pintura de ligação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foi verificada a quantidade e a uniformidade da emulsão aplicada, assegurando conformidade com as especificações do projeto. Esperou-se o tempo de cura necessário antes de continuar os serviços de reparos (Figura 16).

Figura 16 - Emulsão aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Antes da aplicação do CBUQ, verificou-se a temperatura da massa asfáltica no momento da sua chegada ao local da obra (Figura 17), garantindo que estivesse dentro do intervalo especificado (entre 140°C e 160°C).

Figura 17 - Temperatura da massa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A primeira camada de CBUQ foi aplicada sobre a superfície preparada, utilizando uma vibro acabadora (Figura 18). A aplicação foi feita de forma uniforme, com a espessura previamente definida no projeto.

Figura 18 - Aplicação da primeira camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Realizou-se a compactação inicial com rolos compactadores de pneus, seguida de compactação com rolos vibratórios (Figura 19) para alcançar a densidade especificada.

Figura 19 - Compactação da primeira camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após a compactação da primeira camada, uma nova pintura de ligação foi aplicada (Figura 20) para garantir a aderência com a segunda camada de CBUQ.

Figura 20 - Pintura de ligação da primeira camada aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A segunda camada de CBUQ foi aplicada com a vibro acabadora (Figura 21), mantendo uniformidade e espessura conforme o projeto.

Figura 21 - Aplicação da segunda camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A compactação final foi realizada com rolos pneus e vibratórios (Figura 22) assegurando a densidade e a qualidade superficial da camada.

Figura 22 - Compactação final da segunda camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.5.2 Reciclagem de Base + Revestimento Asfáltico

4.5.2.1 Etapas de Execução

A técnica de reciclagem de base, com aplicação de asfalto-espuma e estabilização da sub-base com cimento, consiste na recuperação estrutural do pavimento existente por meio da reutilização de materiais fresados, combinados com estabilizantes, como cimento, e espuma asfáltica. Inicialmente, são realizadas a fresagem do revestimento asfáltico e da camada de base, seguidas da conferência de espessura para garantir a conformidade com o projeto. A sub-base é estabilizada com 4% de cimento, compactada com rolos pé de carneiro e avaliada quanto à umidade e capacidade estrutural por meio do ensaio de viga Benkelman.

A camada de base é reconstruída em duas etapas, utilizando o asfalto-espuma para conferir maior resistência e durabilidade. Após cada aplicação, a compactação é realizada com equipamentos adequados para assegurar a densidade especificada. Em seguida, é aplicada uma pintura de ligação para promover a aderência entre a base reciclada e as camadas superiores de revestimento.

O revestimento final é composto por duas camadas de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), aplicadas e compactadas sequencialmente, garantindo acabamento superficial e desempenho estrutural.

Foi realizada a fresagem completa do revestimento asfáltico deteriorado, preparando a superfície para as etapas subsequentes, conforme ilustra a Figura 23. O material removido foi armazenado para possível reaproveitamento.

Figura 23 - Fresagem do revestimento asfáltico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A camada de base existente também foi fresada (Figura 23), utilizando recicladoras apropriadas, para permitir a sua recomposição com o processo de reciclagem. O material resultante foi homogeneizado para posterior tratamento.

Figura 24 - Fresagem da camada de base



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após a fresagem, mediu-se a espessura retirada (Figura 25) para garantir que estivesse de acordo com as especificações do projeto. Ajustes foram feitos onde necessário para manter a uniformidade da profundidade.

Figura 25 - Conferência de espessura de fresagem



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foi distribuído cimento sobre a camada de base fresada (Figura 26), na proporção adequada, garantindo uma mistura uniforme para estabilização.

Figura 26 - Aplicação de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O material da sub-base foi misturado com 4% de cimento usando a recicladora (Figura 27), restabelecendo as propriedades mecânicas da camada.

Figura 27 - Reciclando sub-base com teor de 4% de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após a mistura, a sub-base foi compactada com um rolo pé de carneiro (Figura 28), assegurando sua densidade e resistência.

Figura 28 - Compactação de sub-base com rolo pé de carneiro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Verificou-se a umidade da sub-base compactada (Figura 29), garantindo que estivesse dentro dos limites especificados para alcançar a máxima densidade.

Figura 29 - Determinação de umidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Realizou-se o ensaio de deflexão com a viga Benkelman (Figura 30), avaliando a capacidade estrutural da sub-base estabilizada.

Figura 30 - Ensaio de viga benkelman



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A primeira camada de base foi reciclada in situ com asfalto-espuma (Figura 31), utilizando recicladoras para misturar o material fresado com a espuma asfáltica.

Figura 31 - Aplicação da primeira camada de asfalto espuma na camada de base



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A primeira camada reciclada foi compactada com rolos vibratórios e de pneus (Figura 32), garantindo alcançar os requisitos de densidade.

Figura 32 - Compactação da primeira camada de base



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A segunda camada de base foi tratada com asfalto-espuma (Figura 33) seguindo o mesmo processo de mistura in situ.

Figura 33 - Aplicação da segunda camada de asfalto espuma na camada de base



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Compactou-se a segunda camada de base com rolos vibratórios e lisos (Figura 34), assegurando a densidade e a resistência projetadas.

Figura 34 - Compactação da segunda camada de base



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A pintura de ligação foi aplicada sobre a superfície da base reciclada (Figura 31), garantindo aderência entre a base e o revestimento asfáltico.

Figura 35 - Aplicação de pintura de ligação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A primeira camada de CBUQ foi espalhada com uma vibro acabadora, de forma uniforme, atendendo a espessura especificada no projeto (Figura 36).

Figura 36 - Aplicação da primeira camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A camada final de CBUQ foi aplicada com os mesmos critérios de uniformidade e qualidade (Figura 33).

Figura 37 - Compactação da primeira camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A segunda camada de CBUQ foi espalhada com uma vibro acabadora, de forma uniforme, atendendo a espessura especificada no projeto (Figura 38).

Figura 38 - Aplicação da segunda camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A segunda camada de CBUQ foi espalhada com uma vibro acabadora, de forma uniforme, atendendo a espessura especificada no projeto (Figura 39) e finalizada com atenção ao nivelamento e acabamento superficial.

Figura 39 - Compactação e acabamento da segunda camada de CBUQ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.6 COLETA DE DADOS E MONITORAMENTO

Para avaliar a eficácia estrutural e funcional das soluções aplicadas, foram utilizados dados das medições das deflexões do pavimento, empregando o Deflectômetro de Impacto (FWD) e o Perfilômetro a laser que ocorreram antes e depois do segundo ciclo de pavimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DAS DEFLEXÕES COM FWD

A avaliação das deflexões, com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), fornece visão detalhada da resposta estrutural do pavimento restaurado.

Os valores de deflexão e irregularidade para cada trecho foram coletados e organizados em função das técnicas aplicadas. São apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 as leituras de FWD e IRI, indicando diferenças na resistência estrutural a partir da deflexão em milímetros e o nível de irregularidade em metro por quilometro, antes e após as soluções aplicadas por trecho estudado.

Tabela 1 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho A

Rodovia	km inicial	km final	Antes		Depois	
			FWD (mm)	IRI (m/km)	FWD (mm)	IRI (m/km)
SP-270	427,320	427,360	29,6	4,01	44,0	4,03
SP-270	427,360	427,400	50,5	4,01	30,8	4,03
SP-270	427,400	427,440	70,9	3,04	27,7	2,53
SP-270	427,440	427,480	23,5	3,04	31,4	2,53
SP-270	427,480	427,520	51,6	3,04	29,7	2,53
SP-270	427,520	427,560	41,8	3,04	29,0	2,53
SP-270	427,560	427,600	67,7	3,04	28,9	2,53
SP-270	427,600	427,640	59,9	3,43	30,7	2,82
SP-270	427,640	427,680	63,8	3,43	34,6	2,82
SP-270	427,680	427,720	69,9	3,43	32,1	2,82
SP-270	427,720	427,760	49,0	3,43	32,7	2,82
Média			52,56	3,36	31,96	2,91

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela 2 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho B

Rodovia	km inicial	km final	Antes		Depois	
			FWD (mm)	IRI (m/km)	FWD (mm)	IRI (m/km)
SP-270	438,840	438,880	53,6	3,00	20,8	2,21
SP-270	438,880	438,920	53,9	3,00	27,5	2,21
SP-270	438,920	438,960	59,1	3,00	19,4	2,21
SP-270	438,960	439,000	24,6	3,00	19,0	2,21
SP-270	439,000	439,040	74,3	3,03	23,1	2,7
Média			53,10	3,01	21,96	2,31

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela 3 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho C

Rodovia	km inicial	km final	Antes		Depois	
			FWD (mm)	IRI (m/km)	FWD (mm)	IRI (m/km)
SP-270	414,600	414,640	40,9	4,83	64,9	3,19
SP-270	414,640	414,680	76,4	4,83	31,1	3,19
SP-270	414,680	414,720	84,5	4,83	16,7	3,19
SP-270	414,720	414,760	38,3	4,83	38,3	3,19
SP-270	414,760	414,800	41,2	4,83	21,3	3,19
SP-270	414,800	414,840	28,6	4,05	21,6	2,82
Média			51,65	4,70	32,32	3,13

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela 4 - Monitoramento antes e depois da execução da solução no trecho D

Rodovia	km inicial	km final	Antes		Depois	
			FWD (mm)	IRI (m/km)	FWD (mm)	IRI (m/km)
SP-270	442,160	442,200	33,5	2,39	37,5	2,78
SP-270	442,200	442,240	49,8	2,40	41,6	1,83
SP-270	442,240	442,280	21,4	2,40	40,6	1,83
SP-270	442,280	442,320	27,4	2,40	42,8	1,83
SP-270	442,320	442,360	24,0	2,40	27,5	1,83
SP-270	442,360	442,400	22,5	2,40	32,4	1,83
Média			29,77	2,40	37,07	1,99

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com base nos valores obtidos, podemos avaliar a capacidade estrutural dos pavimentos. Valores de deflexão mais baixos indicam pavimento mais rígido e resistente, enquanto deflexões altas podem sinalizar áreas onde o pavimento é mais suscetível a deformações. Com base na Tabela 5, fica evidente que a solução de reciclagem de base do trecho B apresentou melhor desempenho devido sua variação positiva do FWD.

Tabela 5 - Variação do FWD

Solução	Trecho	km inicial	km final	Faixa	Sentido	FWD Antes (média)	FWD Depois (média)	Variação
Reciclagem de base	A	427,340	427,540	2	Oeste	52,60	32,00	39,2%
Reciclagem de base	B	438,853	439,013	2	Oeste	53,1	22,00	58,6%
FRAM	C	414,624	414,828	2	Oeste	51,60	32,30	37,4%
FRAM	D	442,181	442,396	2	Oeste	37,10	29,80	19,7%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5.2 ANÁLISE DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE INTERNACIONAL (IRI)

O Índice de irregularidade internacional (IRI) é uma métrica fundamental para avaliar o conforto de rolamento e a qualidade funcional do pavimento. Valores baixos de IRI indicam superfície mais regular e confortável para o tráfego, enquanto valores elevados refletem irregularidades que podem comprometer o desempenho e o conforto dos usuários.

Os valores de IRI obtidos para cada trecho e solução estão detalhados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, com as suas variações subsequentes apresentadas na Tabela 6. Esses dados permitem uma análise comparativa da uniformidade superficial e da eficiência funcional de cada técnica de restauração empregada, fornecendo uma base sólida para a avaliação de desempenho.

Tabela 6 - Variação do IRI

Solução	Trecho	km inicial	km final	Faixa	Sentido	IRI Antes	IRI Depois	Variação
Reciclagem de base	A	427,340	427,540	2	Oeste	3,36	2,91	13,4%
Reciclagem de base	B	438,853	439,013	2	Oeste	3,01	2,31	23,3%
FRAM	C	414,624	414,828	2	Oeste	4,70	3,13	33,4%

FRAM D 442,181 442,396 2 Oeste 2,40 1,99 17,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos na análise do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) indicam que a solução de fresagem e recomposição com CAP 10/20 de alto módulo apresentou melhor desempenho funcional em comparação à Reciclagem de Base com espuma de asfalto + revestimento asfáltico, resultando em superfície mais regular e confortável para os usuários. Essa superioridade se deve à maior rigidez e estabilidade conferidas pelo CAP 10/20, que reduz as deformações acumuladas e mantém a qualidade da superfície por períodos mais longos.

5.3 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DAS SOLUÇÕES

A análise de custo-benefício considera o custo de implantação e o desempenho estrutural. Esse estudo fornece uma concepção da viabilidade econômica das soluções e auxilia na escolha da técnica mais vantajosa. Os custos de implantação para cada solução foram organizados nas Tabelas 7, 8, 9 e 10, incluindo os custos de materiais juntamente com a mão de obra.

Tabela 7 - Custos totais trecho A

Serviço	Unid.	Valor Unitário	Comprimento Executado (m)	Largura Executada (m)	Altura Executada (m)	Área Executada (m²)	Volume Executado (m³)	Valor Total
Fresagem do Pavimento	m³	R\$ 153,77	384	3,85	0,390	1478,4	162,624	R\$ 25.006,69
Estabilização Sub-base com 4% cimento	m³	R\$ 255,66	384	3,85	0,150	1478,4	221,760	R\$ 56.695,16
Base reciclada com espuma de asfalto	m³	R\$ 865,04	384	3,85	0,305	1478,4	450,912	R\$ 390.056,92
Imprimação EAI	m²	R\$ 6,01	384	3,85	-	1478,4	-	R\$ 8.885,18
Pintura de Ligação	m²	R\$ 5,47	384	3,85	-	1478,4	-	R\$ 8.086,85
CBUQ	m³	R\$ 1.421,21	384	3,85	0,085	1478,4	44,352	R\$ 63.033,51
SUBTOTAL								R\$ 551.764,31

Tabela 8 - Custos totais trecho B

Serviço	Unid.	Valor Unitário	Comprimento Executado (m)	Largura Executada (m)	Altura Executada (m)	Área Executada (m²)	Volume Executado (m³)	Valor Total
Fresagem do Pavimento	m³	R\$ 153,77	160	3,85	0,320	616	30,80	R\$ 2.261,03
Estabilização Sub-base com 4% cimento	m³	R\$ 255,66	160	3,85	0,150	616	92,40	R\$ 28.015,68
Base reciclada com espuma de asfalto	m³	R\$ 865,04	160	3,85	0,270	616	166,32	R\$ 12.691,88
Imprimação EAI	m²	R\$ 6,01	160	3,85	-	616	-	R\$ 6.307,84
Pintura de Ligação	m²	R\$ 5,47	160	3,85	-	616	-	R\$ 2.180,64
CBUQ	m³	R\$ 1.421,21	160	3,85	0,050	616	30,80	R\$ 47.758,79
SUBTOTAL								R\$ 111.425,41

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Custos totais trecho C

Serviço	Unid.	Valor Unitário	Comprimento Executado (m)	Largura Executada (m)	Altura Executada (m)	Área Executada (m²)	Volume Executado (m³)	Valor Total
Fresagem e recomposição CBUQ de alto módulo	m³	R\$ 270,75	203	3,7	0,145	751,1	108,9095	R\$ 29.487,25
imprimadura betuminosa ligante	m²	R\$ 9,69	203	3,7	-	751,1	-	R\$ 7.278,16
CBUQ alto módulo com cap 10/20	m³	R\$ 1.417,06	203	3,7	0,073	751,1	54,8303	R\$ 77.697,82
CBUQ alto módulo com cap 10/20	m³	R\$ 1.417,06	203	3,7	0,073	751,1	54,8303	R\$ 77.697,82
SUBTOTAL								R\$ 192.161,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Custos totais trecho D

Serviço	Unid.	Valor Unitário	Comprimento Executado (m)	Largura Executada (m)	Altura Executada (m)	Área Executada (m²)	Volume Executado (m³)	Valor Total
Fresagem e recomposição CBUQ de alto módulo	m³	R\$ 270,75	215	3,7	0,014	795,5	11,137	R\$ 3.015,34
imprimadura betuminosa ligante	m²	R\$ 9,69	215	3,7	-	795,5	-	R\$ 7.708,40
CBUQ alto módulo com cap 10/20	m³	R\$ 1.417,06	215	3,7	0,070	795,5	55,685	R\$ 78.908,99
CBUQ alto módulo com cap 10/20	m³	R\$ 1.417,06	215	3,7	0,070	795,5	55,685	R\$ 78.908,99
SUBTOTAL								R\$ 168.541,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Comparação de custos entre trechos e soluções

Solução	Trecho	Rodovia	km inicial	km final	Faixa	Sentido	Valor por m ²	Valor médio por solução
Reciclagem de base	a	SP-270	427,340	427,540	2	Oeste	R\$ 373,22	R\$ 367,68
Reciclagem de base	b	SP-270	438,853	439,020	2	Oeste	R\$ 362,14	
FRAM	c	SP-270	414,624	414,828	2	Oeste	R\$ 255,84	R\$ 233,85
FRAM	d	SP-270	442,181	442,396	2	Oeste	R\$ 211,87	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na análise de custo-benefício, conclui-se que a solução de fresagem e recomposição com CAP 10/20 de alto módulo apresentou maior viabilidade econômica em comparação à reciclagem de base com espuma de asfalto + revestimento asfáltico.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo investigou a eficácia de duas soluções de restauração de pavimentos aplicadas em trechos da Rodovia Raposo Tavares (SP 270), especificamente a fresagem e recomposição com CAP de alto módulo e a reciclagem de base + revestimento asfáltico. As análises foram realizadas com foco no desempenho estrutural, funcional e econômico das técnicas, buscando determinar a solução mais adequada para a rodovia.

Os resultados obtidos nas medições de deflexão com o FWD indicaram que a solução de reciclagem de base apresentou capacidade de suporte estrutural mais robusta, com deflexões médias inferiores. Esta solução, portanto, demonstrou ser mais resistente às cargas de tráfego, resultando em maior durabilidade ao serviço de intervenção. Em contraste, a técnica de alto módulo mostrou valores de deflexão superiores em alguns pontos, indicando possíveis variações na rigidez estrutural ao longo dos trechos, o que pode implicar na necessidade de manutenções mais frequentes.

Quanto à qualidade funcional do pavimento, os valores do índice de irregularidade internacional (IRI) mostraram que a técnica de alto módulo proporcionou maior conforto ao rolamento, com uma superfície mais regular e alinhada aos padrões de segurança e conforto para os usuários. Este desempenho reflete uma aplicação de alta qualidade e superfície adequada para suportar o tráfego intenso da SP 270, aumentando a segurança viária. A técnica reciclagem de base, por outro lado, apresentou valores de IRI levemente mais altos em algumas seções, o que sugere a necessidade de ajustes para atender aos níveis de conforto desejáveis.

No que diz respeito à análise de custo-benefício, a solução de alto módulo mostrou-se mais viável economicamente, equilibrando os custos iniciais de implantação com um desempenho estrutural e funcional que justifica o investimento ao longo de sua vida útil. Embora a solução da reciclagem de base tenha custo competitivo. Com isso, recomenda-se que a solução de reciclagem de Base seja priorizada em projetos futuros que busquem a maximização da durabilidade estrutural.

Este estudo conclui que a técnica do alto módulo é a mais indicada para aplicação nos trechos analisados da SP 270, devido ao seu desempenho e custo-benefício. Para otimizar a aplicação das técnicas de restauração e promover infraestrutura rodoviária mais eficiente e duradoura, recomenda-se um monitoramento

contínuo dos parâmetros de deflexão e IRI ao longo do tempo, o que permitirá ajustes preventivos conforme a necessidade.

Em resumo, ambas as soluções atendem aos objetivos de desempenho estrutural, proporcionando uma base sólida para a manutenção da rodovia e promovendo segurança e conforto aos usuários. Estes resultados podem orientar futuras intervenções em rodovias de características similares, contribuindo para a melhoria da infraestrutura rodoviária e para a sustentabilidade econômica e funcional das soluções aplicadas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6576:** Materiais asfálticos — Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15016:** Pavimentos Asfálticos – Requisitos e Ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15590:** Manutenção de pavimentos flexíveis e semirrígidos. São Paulo: ABNT, 2019.
- ARAÚJO, J. **Soluções Sustentáveis para Pavimentação Asfáltica.** São Paulo: Editora Engenharia Verde, 2020.
- BERNUCCI, L. L. B.; *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.
- BNDES. **Concessões rodoviárias: avaliação e perspectivas.** Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010.
- CANDIDO, J. **Infraestrutura Rodoviária: Aspectos Econômicos e Sociais.** Recife: Editora Universitária, 2019.
- CARVALHO, A. **Tecnologias de Pavimentação e Sustentabilidade.** São Paulo: Editora Técnica, 2019.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias.** Relatórios anuais disponíveis em: <https://www.cnt.org.br>. Acesso em: 30 nov. 2024.
- COSTA, M. **Fundamentos da Engenharia de Pavimentos.** Belo Horizonte: Editora Engenharia, 2016.
- CUNHA, R. S. **Concessões Rodoviárias no Brasil: Aspectos Contratuais e Operacionais.** São Paulo: Editora Infraestrutura e Mobilidade, 2014.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma **DNIT 005/2003 - TER:** Procedimento - Pavimentos Flexíveis - Especificação de Serviço. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2003.
- FERNANDES, R.; *et al.* **Impacto Econômico das Infraestruturas de Transporte.** Revista Brasileira de Engenharia, v. 25, n. 3, p. 45-58, 2020.
- FREITAS, M. A.; SOUZA, R. T.; ALMEIDA, C. L. **Infraestrutura Rodoviária no Brasil: Desafios na Gestão e Manutenção de Pavimentos.** Brasília: Editora Transporte e Mobilidade, 2014.
- LIMA, P.; MENDES, A. **Manutenção e Reabilitação de Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora Pavimento, 2020.
- MARTINS, C. **Desenvolvimento de Infraestrutura Rodoviária no Brasil.** Curitiba: Editora Técnica, 2017.

MARTINS, J. P.; ALMEIDA, R. F. **Estruturas de Pavimentos: Conceitos e Dimensionamento**. São Paulo: Editora Engenharia de Infraestrutura, 2015.

MEHTA, Y.; MONISMITH, C. L. **Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with High Modulus Binders**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 16, n. 1, p. 45–54, 2004.

NUNES, B. **Gestão de Pavimentos e Sustentabilidade**. Recife: Editora Universitária, 2018.

PEREIRA, L. C.; ALMEIDA, J. P.; OLIVEIRA, F. G. **Adesão e comportamento de ligantes asfálticos em pavimentos rodoviários**. São Paulo: Editora Rodovia, 2020.

PEREIRA, L. C.; OLIVEIRA, F. G.; ALMEIDA, J. P. **Gestão de Materiais para Pavimentação: Qualidade e Desempenho em Infraestruturas Rodoviárias**. São Paulo: Editora Rodovia, 2018.

PINTO, J. A.; PREUSSLER, E. **Tecnologia de Pavimentos Rodoviários: Materiais, Dimensionamento e Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Infraestrutura, 2012.

RIBEIRO, J.; *et al.* **Análise de Custos e Benefícios na Manutenção de Pavimentos**. *Revista Brasileira de Engenharia de Transportes*, v. 7, n. 2, p. 89-104, 2021.

SANTOS, F.; *et al.* **Técnicas Avançadas em Pavimentação Asfáltica**. São Paulo: Editora Técnica, 2023.

SILVA, D. **Segurança Viária e Pavimentação**. Porto Alegre: Editora Engenharia, 2018.

SILVA, J. A.; SANTOS, R. M. **Patologias em pavimentos: identificação e soluções técnicas**. Rio de Janeiro: Editora Engenharia Civil, 2019.

SOUSA, A. L. **Regulação e Fiscalização de Concessões Rodoviárias no Brasil: Uma Abordagem Jurídico-Administrativa**. Brasília: Editora Direito Público, 2019.

SOUZA, L.; *et al.* **Problemas e Soluções em Pavimentos Asfálticos**. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 18, n. 4, p. 112-126, 2022.

WIRTGEN GROUP. **Cold Recycling Technology Manual**. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012.