

GIOVANNI TEODORO DE CASTRO

**PAVIMENTOS URBANOS DE CONCRETO
REFORÇADO: ANÁLISE DE PARÂMETROS
FUNCIONAIS**

CAMPINAS

2026

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C355	Castro, Giovanni Teodoro PAVIMENTOS URBANO DE CONCRETO REFORÇADO : ANÁLISE DE PARÂMETROS FUNCIONAIS / Giovanni Teodoro Castro. - Campinas: PUC-Campinas, 2026. 141 f.il. Orientador: Dr. Nádia Cazarim da Silva Forti. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2026. Inclui bibliografia. 1. Pavimento de Concreto Reforçado. 2. Monitoramento. 3. FWD. I. Forti, Dr. Nádia Cazarim da Silva . II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. III. Título.
------	---

GIOVANNI TEODORO DE CASTRO

**PAVIMENTOS URBANOS DE CONCRETO
REFORÇADO: ANÁLISE DE PARÂMETROS
FUNCIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti

Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2026 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. João Batista Lamari
Pesquisador da Luleå University of Technology

GIOVANNI TEODORO DE CASTRO**PAVIMENTOS URBANO DE CONCRETO REFORÇADO:
ANÁLISE DE PARÂMETROS FUNCIONAIS**

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para o exame de defesa.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Nádia Cazarim da Silva Forti.

CAMPINAS**2026**

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço a Professora Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti pela orientação, apoio e incentivo durante todo período de desenvolvimento do estudo.

Agradeço a Victória Mayumi Torigoe por todo apoio, incentivo e pelo acompanhamento de campo.

Agradeço a minha família pelo apoio emocional e incentivo.

Agradeço a Dynatest, em nome do Adriano, pelo fornecimento dos dados que foram analisados.

Agradeço ao Alexandre Tadeu Viela de Camargo da Sondotecnica Engenharia de Solos S/A, pelo suporte técnico e fornecimento dos dados topográficos aos quais foram analisados neste trabalho.

Agradeço a Roadrunner por todo apoio e suporte com a coleta dos dados de FWD.

Agradeço a Evolução Engenharia por fornecer todos os desenhos esquemáticos, detalhamentos técnicos e apoio ao projeto.

Agradeço ao corpo docente da PUC pelo apoio teórico e técnico para desenvolver o entendimento do conteúdo.

Agradeço a PUC e aos laboratoristas por fornecer e a instruir quanto ao empréstimo e orientação de uso dos equipamentos de medição.

RESUMO

O desempenho dos pavimentos urbanos constitui tema central na engenharia de infraestrutura, especialmente diante da elevada degradação da malha viária brasileira e da limitada aplicação de soluções em concreto de cimento Portland em meios urbanos. Apesar das reconhecidas vantagens estruturais e de durabilidade desse tipo de pavimento, ainda existem lacunas quanto à influência de diferentes estratégias de reforço e à avaliação integrada de desempenho funcional e estrutural por meio de métodos não destrutivos. Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento de pavimentos urbanos de concreto reforçados, considerando parâmetros executivos, estruturais e funcionais, com ênfase na eficiência das fibras como mecanismo de reforço e transferência de carga. A metodologia baseia-se na implantação de doze seções experimentais de pavimento de concreto em substituição a um pavimento flexível existente, variando dimensões de placas, condições de juntas e tipos de reforços. O monitoramento inclui inspeção visual sistemática, avaliação topográfica para determinar os degraus entre juntas, determinação do Índice de Condição do Pavimento (ICP) e ensaios com *Falling Weight Deflectometer* (FWD), permitindo a análise conjunta de defeitos, capacidade estrutural e eficiência de transferência de carga. Os resultados possibilitam identificar a contribuição dos reforços para a redução de manifestações patológicas, melhoria do desempenho mecânico e manutenção da funcionalidade ao longo do tempo. Conclui-se que a mudança entre os pavimentos foi extremamente positiva para o meio urbano em que foi implementada. Apesar de apresentar defeitos de severidade baixa e movimentações constantes o pavimento permaneceu íntegro durante o período observado. As fibras apresentaram boa performance de transferência de carga nas seções com menores dimensionamentos de placas, apresentando um *load transfer efficiency* LTE superior à 70%. Para as placas com dimensionamento maior, apenas o reforçado das fibras não garantiu a eficiência de transferência de carga. Além disso, a integração entre reforço fibroso, controle executivo e monitoramento por FWD e ICP representa estratégia eficaz para ampliar a durabilidade e a confiabilidade dos pavimentos urbanos de concreto, contribuindo para o avanço técnico-científico na área de pavimentação rígida em meios urbanos.

Palavras-chave: pavimento rígido, pavimento de concreto de cimento Portland, monitoramento, FWD, impacto no meio urbano, pavimento de concreto reforçado com fibra.

ABSTRACT

The performance of urban pavements is a central topic in infrastructure engineering, particularly in view of the significant deterioration of the Brazilian road network and the limited application of Portland cement concrete solutions in urban environments. Despite the well-known structural and durability advantages of this type of pavement, gaps still remain regarding the influence of different reinforcement strategies and the integrated evaluation of functional and structural performance through non-destructive testing methods. In this context, this research aims to evaluate the behavior of reinforced urban concrete pavements, considering construction-related, structural, and functional parameters, with emphasis on the efficiency of fibers as a reinforcement and load-transfer mechanism. The methodology is based on the implementation of twelve experimental concrete pavement sections replacing an existing flexible pavement, varying slab dimensions, joint conditions, and types of reinforcement. The monitoring program includes systematic visual inspection, topographic evaluation to determine joint faulting, determination of the Pavement Condition Index (PCI), and testing using a Falling Weight Deflectometer (FWD), allowing a combined analysis of distresses, structural capacity, and load-transfer efficiency. The results make it possible to identify the contribution of reinforcement to the reduction of pathological manifestations, improvement of mechanical performance, and maintenance of functionality over time. It is concluded that the replacement of the flexible pavement with concrete pavement was extremely positive for the urban environment in which it was implemented. Although low-severity distresses and continuous movements were observed, the pavement remained structurally sound throughout the monitoring period. The fibers showed good load-transfer performance in the sections with smaller slab dimensions, presenting a load transfer efficiency (LTE) higher than 70%. For slabs with larger dimensions, fiber reinforcement alone was not sufficient to ensure load-transfer efficiency. Furthermore, the integration between fiber reinforcement, construction quality control, and monitoring through FWD and PCI represents an effective strategy to increase the durability and reliability of urban concrete pavements, contributing to technical and scientific advancements in the field of rigid pavement in urban environments.

Keywords: rigid pavement, Portland cement concrete pavement, monitoring, FWD, urban impact, fiber-reinforced concrete pavement.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.2. Objetivo	3
1.2.1. Objetivo geral	3
1.2.2. Objetivo específico	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. História dos pavimentos	4
2.2. Pavimentos	4
2.3. Pavimento de concreto de cimento Portland	7
2.4. Variáveis de desempenho do pavimento	9
2.4.1. Reforço de Fibras em Pavimento de Concreto	9
2.4.2. Dimensionamento de pavimentos urbanos de concreto	11
2.4.3. Controle Tecnológico	14
2.4.4. Barras de transferência	15
2.5. Defeitos do pavimento de concreto	18
2.5.1. Movimentação de Placas	18
2.5.2. Fissuras	22
2.5.3. Esborcinamento	29
2.5.4. Outros defeitos	31
2.6. Métodos de avaliação da condição e qualidade do pavimento (indicadores de desempenho)	31
2.6.1. Índice de Condição do Pavimento (ICP)	32
2.6.2. <i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD)	36
3. METODOLOGIA	42
3.1. Acompanhamento Preliminar Pavimento Flexível	43
3.1.1. Registro	43
3.1.2. Sondagem	47
3.1.3. Preparação Das Bases	49
3.2. Fase Executiva e Ensaios de Resistência Mecânica	50
3.2.1. Separação das Seções	51
3.2.2. Definição Técnica	54
3.2.3. Concretagem	55
3.3. Monitoramento	63
3.3.1. Visual	63
3.3.2. Luminoso	64
3.3.3. Índice de Condição do Pavimento (ICP)	67

3.3.4.	Topográfico	68
3.3.5.	<i>Falling White Deflectometer (FWD)</i>	70
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1.	Parâmetros Funcionais	73
4.1.1.	Térmico	73
4.1.2.	Luminoso.....	81
4.2.	Propriedades Mecânicas e de Trabalhabilidade do Concreto	83
4.2.1.	Controle tecnológico.....	83
4.2.2.	Resistências residuais.....	84
4.3.	Monitoramento.....	85
4.3.1.	Defeito	85
4.3.2.	Avaliação Topográfica.....	100
4.3.3.	<i>Falling White Deflectometer (FWD)</i>	104
5.	CONCLUSÃO	108
	BIBLIOGRAFIA	110
	APÊNDICE A	119
	APÊNDICE B	125
	APÊNDICE C	126
	ANEXO D.....	129

1. INTRODUÇÃO

De acordo com IBGE (2022), a população brasileira aumentou 12% entre 2007 e 2022. No mesmo período houve o aumento de 132% na frota de veículos, (SENATRAN, 2022).

Segundo Klamt *et al.* (2017), os pavimentos brasileiros sofrem com sobrecarga devido ao crescimento da frota de veículos. Essa sobrecarga contribui para a redução da durabilidade e da qualidade do pavimento, resultando em degradações prematuras. Portanto, é necessário adotar tecnologias capazes de suprir essa demanda, a fim de atender a nova projeção de carga de tráfego.

A má conservação das vias pavimentadas pode gerar impactos significativos no meio ambiente e na economia do país, além de aumentar a emissão de CO₂ pelos veículos e representar riscos à segurança dos condutores (CNT, 2023). Segundo o SEEG (2022), as emissões de dióxido de carbono provenientes do setor de transportes totalizaram aproximadamente milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e).

O Brasil possui 1,72 milhões de quilômetros de rodovias, dos quais 12,4% pavimentadas, 78,5% não pavimentadas e 9,1% são rodovias planejadas. A densidade da malha rodoviária totaliza em 25,1 km/mil km² (CNT, 2023).

Entre os 213,5 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, a Confederação Nacional de Trânsito (CNT) realizou um estudo amostral abrangendo 111,5 mil quilômetros (52%) em um período de 30 dias, a fim de avaliar as condições das vias nos estados brasileiros por meio de uma estimativa analítica. O levantamento constatou que 56,7% dessas rodovias apresentam baixa condição de conservação.

Estima-se que para restaurar as vias avariadas, por meio de reconstrução ou restauração, será necessário um investimento de aproximadamente R\$ 94 bilhões. Ainda, cerca de R\$ 7,49 bilhões serão gastos com transportes devido ao consumo desnecessário de 1,1 bilhão de litros de diesel desperdiçado, proveniente das vias irregulares (CNT, 2023).

A necessidade de uma gestão eficaz dos ativos de transporte nunca foi tão grande. Em uma era de infraestrutura envelhecida, demandas de tráfego cada vez maiores e orçamentos reduzidos, as agências de transporte são continuamente solicitadas a

"fazer mais com menos" na manutenção das condições de suas instalações. Os pavimentos representam uma grande parte dessa infraestrutura de transporte, e a necessidade de sua gestão eficaz é igualmente premente. Pavimentos que se deterioram sem tratamentos oportunos de preservação ou manutenção provavelmente exigirão grandes reabilitações e reconstruções muito mais cedo, e essas são atividades dispendiosas e disruptivas.

O cenário das vias urbanas não é diferente. Diante do elevado nível de degradação das vias, torna-se essencial a implementação de tecnologias capazes de aprimorar a durabilidade da infraestrutura urbana. A adoção de diferentes materiais e técnicas de pavimentação pode contribuir significativamente para a redução dos custos de manutenção e para a melhoria da qualidade das vias, garantindo maior segurança e eficiência no transporte. Uma alternativa é a pavimentação de vias em concreto de cimento Portland reforçado.

De acordo com a ABCP (2012), os pavimentos de concreto possuem alta durabilidade por apresentarem uma vida útil de pelo menos 20 anos, baixa condutividade térmica (albedo elevado, reduz em até 5°C os efeitos das ilhas de calor), altamente reflexível devido a sua coloração (até 30% de refletância), promove segurança (40% de frenagem e não possuem o efeito de aquaplanagem) e conforto de rolamento.

Por fim, proporcionam vantagens econômicas devido ao seu baixo nível de manutenção (52% de economia), redução de custos com iluminação pública (redução de 30% a 60%), menor consumo de água e energia em sua produção (utilização de 20% menos recursos naturais em comparação ao asfalto), menor consumo de pneus e combustível (11% de economia de combustível) (ABCP, 2023).

Para que os pavimentos de concreto apresentem bom desempenho, diversas variáveis devem ser consideradas: espessura e largura da placa, apoio lateral, resistência do concreto, transferência de carga, ligação entre placas e a presença ou não de reforço interno. Além disso, influenciam também o tipo e a magnitude da carga aplicada, a localização da carga na placa, a distância entre o ponto de aplicação e a borda e a frequência de carregamento.

A qualidade do desempenho do pavimento pode ser medida por diferentes indicadores, como: Índice de Irregularidade Internacional (IRI), defeitos, *Falling Weight Deflectometer* (FWD), diferença na altura de juntas etc.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de um pavimento teste de concreto de cimento Portland em uma região urbana de tráfego leve com diferentes reforços.

1.2.2. Objetivo específico

- **Acompanhamento de campo:** identificar ações que possam justificar possíveis defeitos na fase de execução.
- **Monitoramento:** aplicar diferentes tipos de monitoramento para acompanhar as principais mudanças dos pavimentos.
- **Desempenho do reforço:** avaliar e comparar, por meio de ensaios laboratoriais e monitoramentos em campo, os resultados obtidos e os principais defeitos identificados.
- **Eficiência das fibras:** verificar por meio de ensaios não destrutivos se as fibras poliméricas e metálicas podem substituir as barras de transferências.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. História dos pavimentos

As estradas possuíram diversas funções ao longo dos anos. De acordo com Balbo (2007), há indícios de que as primeiras estradas foram criadas na China com o intuito de reduzir a distância, melhorar o acesso aos recursos naturais, facilitar o deslocamento entre as instalações e fazendas, expandir território etc. Contudo, as primeiras vias estruturadas com sistemas de drenagem, compactação e pavimentação foram criadas pelos egípcios em 3.000 a.C. Essas vias também se destinavam a desfiles militares, para demonstrar status da realeza e apoio religioso em forma de celebrações ou festivais.

Segundo o Balbo (2009), ao decorrer da história, a técnica construtiva foi aprimorada pelos romanos, contemplando sistemas de construção mais próximos com o que é executado atualmente, com o intuito de torná-las duráveis e conduzir o desenvolvimento das cidades. Porém o principal objetivo era o deslocamento militar, facilitando as viagens entre o império conquistado e vencendo desníveis de terrenos muito íngremes de forma estratégica.

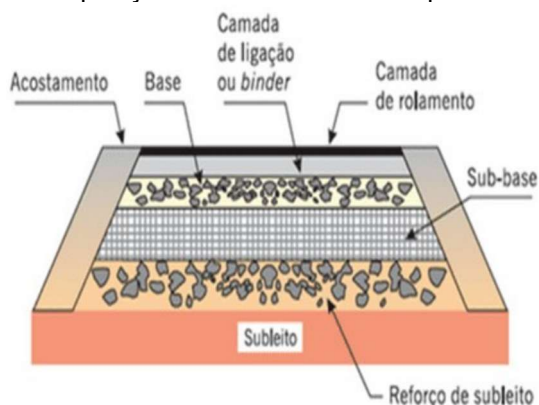
Em meados do século XIX, foi criada a primeira estrada brasileira ligando Rio de Janeiro e Minas Gerais. Inicialmente, a construção dos pavimentos era composta pela sobreposição de pedras com granulometrias distintas. Porém, com o aumento de carga das vias e do fluxo de veículos, proporcionados pela industrialização do Brasil, imigração europeia e forte investimento na indústria automobilística no início do século XX, se fez necessário a adoção de pavimentos asfálticos (Andrew, 2006).

2.2. Pavimentos

Segundo o DNIT IPR 720 (2006), define-se pavimento como uma superestrutura composta por camadas de diferentes materiais que possuem características de resistência e deformabilidades distintas, projetadas para suportar as solicitações impostas pelo tráfego e pelas condições ambientais. Os pavimentos podem ser classificados como rígidos ou flexíveis.

Define-se como pavimento flexível aquele em que todas as camadas sofrem deformação plástica ao serem expostas à esforços físicos, e a carga se distribui praticamente uniforme em todas as camadas, Figura 1 (DNIT IPR 720, 2006).

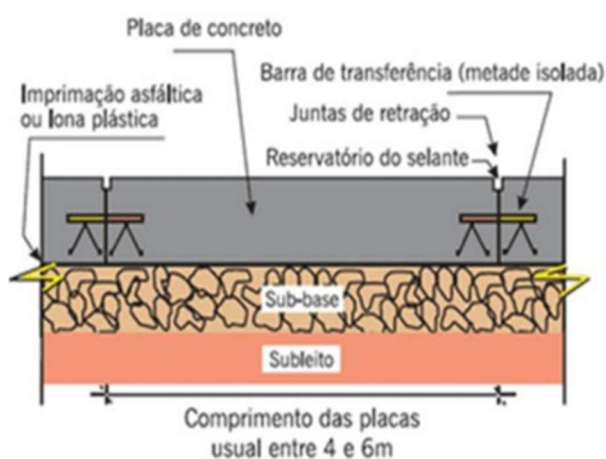
Figura 1: Composição das camadas de um pavimento flexível



Fonte: Autoria própria, 2025

Já o pavimento rígido é caracterizado por possuir uma camada de revestimento com rigidez e resistência significativamente superiores às das demais camadas, sendo essa responsável por absorver praticamente todas as tensões aplicadas sobre a superfície, Figura 2 (DNIT IPR 720, 2006).

Figura 2: Distribuição das camadas de um pavimento de concreto



Fonte: Autoria própria, 2025

Conforme publicação IPR-714 (DNIT, 2005), existem diversos métodos de execução de pavimentos rígidos, os quais são determinados a partir da necessidade, exigências e limitações do projeto. Os métodos se diferenciam pela sua aplicação e tecnologias utilizadas, como: pavimento de concreto simples, concreto rolado, *whitetopping*, pavimento estruturalmente armado, e peças pré-moldadas de concreto.

Os métodos serão descritos brevemente a seguir:

- **Pavimentos de Concreto Simples:** são estruturas em que a resistência às tensões é garantida exclusivamente pelo próprio concreto. Nesse tipo de pavimento, não há contribuição de armaduras, sistemas de ligação ou

mecanismos de transferência de cargas entre placas por meio das juntas, o que implica que todo o desempenho estrutural depende da capacidade do concreto em suportar os esforços aplicados.

- **Concreto Rolado:** concreto de consistência seca e rija que possibilita a compactação por meio de rolos compressores (vibradores ou não). Nesse caso, não há exigências quanto à granulometria ou nível de qualidade dos agregados graúdos para aplicação, favorecendo o uso de materiais alternativos, de reuso ou proveniente de demolição.

- **Whitetopping:** trata-se do aproveitamento da infraestrutura de pavimentos flexível já existentes com intuito de aprimorar a durabilidade da via, promovendo o aumento da vida útil, resistência às cargas impostas pelos veículos e redução de esforços nas camadas inferiores. A denominação decorre devido à coloração cinza claro do concreto em comparação com a cor escura do asfalto (ABCP, 2012).

O *whitetopping* é dividido em três classificações: tradicional (espessura da camada de concreto superior a 20 cm), delgado (entre 10 cm e 20 cm) e ultra delgado (inferior a 10 cm) (Souza, 2021).

- **Pavimento Estruturalmente Armado:** são estruturas de concreto onde há adição de armadura para melhor distribuição das cargas aplicadas sob o pavimento. Para garantir o desempenho estrutural adequado, torna-se necessária a utilização de juntas de dilatação e de barras de transferência, que auxiliam na acomodação dos movimentos e na transmissão das cargas entre as placas.

- **Peças Pré-Moldadas de Concreto:** consiste na aplicação de placas de concreto, de modo que as peças sejam encaixadas durante a fase de assentamento. Para garantir a uniformidade, torna-se necessária a utilização de juntas que assegurem o espaçamento adequado entre elas. Essa técnica destaca-se pela rapidez de execução e pela imediata liberação da via ao tráfego. Contudo, exige um preparo prévio rigoroso da base e da sub-base, a fim de assegurar o assentamento correto das peças e a conformidade com os procedimentos estabelecidos no Manual DNIT-IPR-714/2005.

Dentre os métodos apresentados, é comum o uso de fibras (macro e micro) na composição do concreto, com o objetivo de controlar a fissuração decorrente da

retração por secagem, aumentar a resistência à tração residual e reduzir os efeitos da fadiga provocados por ações patológicas decorrentes de fissuras ou fragmentações. Dessa forma, contribui-se para a redução da espessura do pavimento, bem como para o aprimoramento da durabilidade e da longevidade da estrutura.

O concreto reforçado com fibras (CRF) pode ser composto por diversos tipos de fibras como as metálicas, poliméricas ou de vidro, porém se diferem pelo seu custo, disponibilidade no mercado e desempenho (Kunz, 2020).

2.3. Pavimento de concreto de cimento Portland

Devido às vantagens da ampla variedade de matérias-primas, facilidade de conformação e forte adaptabilidade, o concreto de cimento Portland tornou-se o principal material de construção da era contemporânea, e tem sido amplamente utilizado na pavimentação de estradas e vias urbanas (Lin *et al.*, 2019).

Os pavimentos de concreto possuem alta durabilidade, uma vida útil de no mínimo 20 anos, além de apresentarem vantagens significativas a longo prazo, tais como baixa condutividade térmica, redução de ilhas de calor por possuir uma taxa de albedo elevada, promove segurança e conforto de rolamento. Por consequência, proporcionam eficiência econômica devido seu baixo nível de manutenção, redução de custos com iluminação pública, consumo de água e energia no processo de produção, menor consumo de pneus e combustível (ABCP, 2022).

Um estudo realizado por Teles *et al.* (2024) comparou o desempenho do pavimento de concreto asfáltico e do pavimento de concreto de cimento Portland, avaliando o consumo de energia e as emissões de CO₂. A análise considerou apenas o concreto, sem a adição de telas de aço, abrangendo as etapas de produção, transporte e execução. Os resultados indicaram que, por quilômetro ao ano, o pavimento asfáltico apresentou um consumo energético 4,8 vezes superior ao do pavimento de concreto. Além disso, no que se refere às emissões de CO₂, a solução de concreto demonstrou uma redução de 51% em comparação à alternativa asfáltica.

A qualidade do pavimento de concreto está diretamente relacionada à consideração de diversos parâmetros técnicos, tais como (DNIT 460/2025 – ES):

- Método de dimensionamento;
- Apoio lateral;

- Espessura da placa de concreto;
- Espessura das camadas de base;
- Sistemas de transferência de carga e de ligação entre placas;
- Reforço estrutural;
- Qualidade da produção do concreto;
- Resistência à tração e à compressão;
- Tipo e direção do acabamento superficial;
- Critérios adotados para a proteção e cura do concreto;
- Tipologia das juntas;
- Modulação das placas;
- Sequência de cortes;
- Sistema de selagem das juntas;
- Tolerâncias nos elementos acabados, entre outros.

No entanto, a implementação de pavimentos de concreto ainda é amplamente debatida, especialmente em razão dos impactos econômicos associados à necessidade de adaptação de outros elementos construtivos, como guias, sarjetas, ciclovias e sistemas de drenagem. Além disso, esse tipo de pavimento pode apresentar níveis de ruído relativamente elevados e requer um tempo maior para liberação das vias após sua execução.

Para que seus benefícios sejam plenamente alcançados e sua aplicação seja viável, é fundamental que o pavimento de concreto com cimento Portland seja executado com rigor técnico, respeitando os padrões de tráfego e as condições específicas da via. Também é essencial a adoção de sistemas eficazes de monitoramento e manutenção, o uso de mão de obra qualificada, investimentos em normatização e estratégias sustentáveis. Isso pode ser alcançado por meio do aumento da utilização de materiais pozolânicos, escórias de alto-forno e outros ligantes minerais, ou ainda pela adoção de concretos de baixo teor de cimento, contribuindo para a diminuição da emissão de CO₂ (Balbo, 2020).

Assim, é importante que o pavimento seja monitorado por meio de diferentes sistemas. Esses sistemas podem ser estáticos ou dinâmicos (equipamento fixo ou portátil), capazes de medir vibração, danos, degradações, aderência, deformação

desenvolvida na junta, variação superficial e desgaste do pavimento (Shatayat *et al.*, 2020).

2.4. Variáveis de desempenho do pavimento

2.4.1. Reforço de Fibras em Pavimento de Concreto

A durabilidade do pavimento de concreto de cimento Portland está diretamente relacionada ao desempenho do material. No entanto, o concreto apresenta baixa resistência à tração, baixa tenacidade e alto potencial para o desenvolvimento de fissuras, o que pode comprometer sua capacidade portante (Fang *et al.*, 2023).

Conforme Fang *et al.* (2023), fatores como porosidade, qualidade da zona de transição interfacial (ITZ) e presença de microfissuras influenciam a capacidade do material de resistir à fissuração e de dissipar energia sob carregamentos. Assim, diferentes estratégias podem ser empregadas para melhorar esse comportamento, incluindo ajustes na granulometria dos agregados, modificações na microestrutura e incorporação de aditivos capazes de alterar a resposta pós-fissuração.

Dentre essas estratégias, a adição de fibras pode apresentar um aumento da tenacidade. As fibras atuam diretamente no processo de abertura e propagação de fissuras, proporcionando maior capacidade de absorção de energia após a formação da primeira trinca e transformando o comportamento do concreto de frágil para pseudo-dúctil.

Outra estratégia é a adição de resíduos como borracha no concreto que promove, sobretudo, uma redução do módulo de elasticidade e na resistência a compressão, porém promove um aumento da deformabilidade, podendo melhorar a resposta sob impacto ou cargas dinâmicas. No entanto, seu efeito sobre a tenacidade à flexão e à fratura não é tão previsível quanto o observado com fibras, variando conforme teor utilizado, tamanho das partículas e qualidade da interface borracha/pasta (Fang *et al.*, 2023).

Shakir *et al.* (2021) argumentam que o uso híbrido de fibras (uma fibra rígida e outra mais dúctil) é essencial para garantir o desempenho do pavimento de concreto, garantindo melhores resultados em comparação às monofibras. A combinação de microfibras para combater microfissuras provenientes da retração por secagem do

pavimento com macrofibras como forma de costura transversal de fissuras é uma excelente solução. Fibras poliméricas são mais econômicas e apresentam resistência a corrosão, porém possuem comportamentos mecânicos inferiores comparados às fibras metálicas.

Pesquisa realizada por Maafi *et al.* (2023) indicam que fibras de polipropileno incorporados no concreto podem proporcionar uma boa resistência mecânica e boa ductilidade. Nas proporções de 0,5, 1 e 1,5 kg/m³ há uma redução na porosidade do concreto, porém uma alta densidade de fibras pode proporcionar porosidades adicionais.

Complementar a isso, a adição de fibras poliméricas, pode proporcionar uma boa resistência mecânica, redução de 15% da retração contínua do concreto, redução de 35% na abertura de fissuras, aumento da idade do concreto na primeira fissura e, juntamente com a adição aditivos redutores de retração, permite um aumento de 20% do comprimento das placas. Contudo, a adição de fibras poliméricas pode reduzir a trabalhabilidade (Gholami, 2024).

A utilização de fibras no concreto permite a adoção de menores espessuras dos pavimentos. Quanto menor a espessura do pavimento, maior é a sensibilidade sob efeitos de tração e às tensões nas bordas. Dessa forma, as fibras permitem que parte da capacidade de tração após a fissuração seja mantida.

Contudo, mesmo apresentando diversas vantagens, a utilização de fibras possui algumas limitações como a redução na trabalhabilidade do concreto com o aumento do volume de fibras, necessidade de ajuste no processo de mistura, segregação se mal dosado, perda de desempenho se mal distribuído (Kunz, 2020).

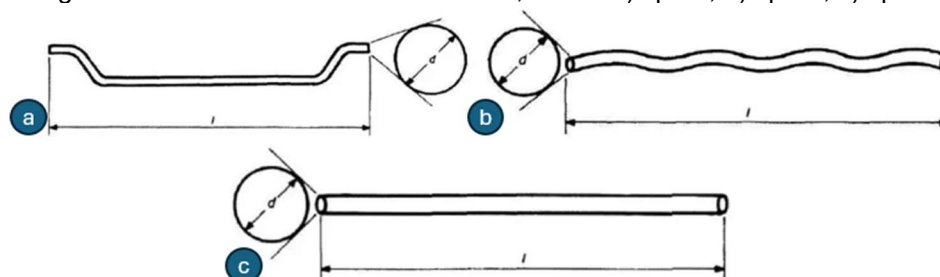
De acordo com Berman *et al.* (2024), além da capacidade de reforço estrutural, a adição de fibras em pavimentos pode contribuir com a transferência de carga entre juntas em pavimentos delgados.

Para a dosagem de fibras, deve-se seguir a ABNT NBR 15530:2007 para fibras de aço e a ABNT NBR 16942:2021 para fibras poliméricas. Ambas as normas estabelecem parâmetros de classificação, especificações requisitas de ensaios.

As fibras de aço são classificadas conforme sua geometria, sendo tipo A: fibras compostas por ancoragem nas extremidades; tipo B: fibras corrugadas; e tipo R: fibras

retas (sem ancoragem nas extremidades), conforme Figura 3. Além disso, são classificadas com base em sua fabricação, como classe I: fibras oriundas de arame trefilado a frio; classe II: fibras oriundas de chapas laminada contada a frio; e classe III: fibras oriundas de arame trefilado e escarificado (ABNT NBR 15530, 2007).

Figura 3: Geometrias de fibras metálicas, sendo a) tipo A; b) tipo B; c) tipo R



Fonte: ABNT NBR 15530 (2007)

As fibras poliméricas são classificadas como Classe I caracterizado por microfibras (diâmetro inferior a 0,3 mm) e Classe II caracterizado por macrofibras (diâmetro superior ou igual a 0,3 mm). O teor de fibras, é expressado pela relação massa por volume de concreto (kg/m^3), o que pode afetar a consistência e a resistência residual do concreto (ABNT NBR 16942, 2021).

2.4.2. Dimensionamento de pavimentos urbanos de concreto

Atualmente, a principal recomendação para o dimensionamento de pavimentos de concreto é a Prática Recomendada PR 1011/2021 - Projeto de pavimento urbano de concreto, que estabelece diretrizes gerais para o projeto de pavimentos de concreto simples e reforçados (com malhas, barras ou fibras).

O documento considera aspectos fundamentais como tráfego, tensões térmicas e resistência à fadiga do concreto. Entre as decisões estruturais para o dimensionamento destacam-se: a espessura da placa de concreto (H) e a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), os diferentes tipos de reforço empregados (telas, armaduras ou fibras).

Inicialmente, deve-se estimar a vida útil do pavimento (20 a 40 anos). Posteriormente, considerar as condições de projeto resumidamente como:

- Quantidade de eixo passante sobre a faixa mais carregada e sua respectiva distribuição de carga (eixos simples de rodas duplas – ESRD; eixo simples de rodas simples – ESRs; tandem duplo – ETD; tandem triplo – ETT);

- Determinar a tensão causada por cada eixo. A PR 1011/2021 determina referências de carga para cada eixo, representado pela Tabela 1:

Tabela 1: Referência de carga de eixos

Eixo	Referência de Carga - Q_{eixo} (kN)
ESRD	80
ESRS	80
ETD	135
ETT	215

Fonte: Adaptado PR 1011 (2021)

Para qualquer outra carga (Q_j), deve-se utilizar a Equação 1 de tensão equivalente ao eixo padrão:

$$\sigma_{tf,j(Eixo)} = \sigma_{tf,80kN} * \frac{Q_j}{Q_{eixo}} \quad (1)$$

- Considerar as cargas ambientais, deduzido pelo gradiente térmico (ΔT) entre topo e fundo da placa, gerando uma tensão térmica (σ_T). A PR recomenda que o diferencial térmico Pavimentos de Concreto Simples (PCS) em países tropicais deve ser nulo em horários em que a temperatura de fundo supere a temperatura do topo, considerar apenas os diferenciais positivos, pois as fibras de mais solicitadas a tração estão localizadas nas bases das placas. O diferencial térmico varia com a região e com a estação. Recomenda-se interpolar os valores de hora em hora entre o início do efeito da manhã, horário de pico e horário de cessação do efeito.

- Determinar o módulo de reação do sistema de apoio (k) ao qual varia conforme CBR do subleito, presença de sub-base ou base granular, tipo e espessura de cimentada ou asfáltica. Para determinar o k , se faz necessário o apoio de tabelas e diagramas fornecidos pela norma. Contudo, para placas apoiadas diretamente no solo do subleito, considera-se a Equação 2:

$$k_{apoio} = 20,67 * \ln(CBR) + 1,26 \quad (2)$$

- Determinar o tipo de base por meio do material utilizado, resistência característica do concreto, módulo de elasticidade, emprego do material (base ou sub-base) entre outros parâmetros tabelados na PR 1011.

- As tensões são calculadas por meio de regressões polinomiais de elementos finitos considerando todos os parâmetros mencionados. A PR fornece modelos analíticos prontos, derivados de elementos finitos. Há

equações específicas para PCS sobre base cimentada não aderida e sobre base granular. Essas fórmulas calculam a tensão de tração na borda inferior da placa, que é onde geralmente ocorre a fadiga.

Após o cálculo da tensão, é realizado a verificação de fadiga, o qual pode ser calculado pela Equação 3:

$$\log_{10} N_{k,l,m} = 25,858 - 25,142 * \left(\frac{\sigma_{k,l,m}}{f_{ct,f}} \right) \quad (3)$$

Sendo:

$N_{k,l,m}$: número de repetições admissíveis para o eixo tipo k, com peso l e para a condição de diferencial térmico m;

$\sigma_{k,l,m}$: tensão para o eixo tipo k, com peso l e para a condição de diferencial térmico m;

$f_{ct,f}$: resistência à tração na flexão do concreto.

Dessa forma, é determinado o consumo de resistência à fadiga total (CRF_t). O qual é determinado pela somatória de cada CRF imposta a cada nível de tensão por determinado eixo, carga, diferencial térmico no momento da passagem com base na espessura e resistência a tração na flexão estabelecidos. Por fim igualadas a 100% e caso o CRF_t ultrapasse 1,0, deve-se aumentar H ou aumentar $f_{ct,f}$ (resistência à tração na flexão). Em outras palavras, caso o PCS não atenda a verificação de fadiga, a PR 1011 (2021) recomenda-se aumentar 1,0 a 2,0 cm de espessura, utilizar um concreto mais resistente ou adotar fibras ou armaduras. A verificação é realizada a partir da Equação 4:

$$CRF_t = \sum_{i=1}^n CRF_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_{i,projeto}}{N_{i,admissivel}} \leq 1,0 \quad (4)$$

Para a classificação do concreto reforçado com fibra, deve-se considerar os ensaios de tração na flexão por meio dos limites de proporcionalidade (LOP) e resistências residuais (f_{R1m} , f_{R2m} , f_{R3m} , f_{R4m} – correspondente a medida de abertura do entalhe de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm, respectivamente) por meio da ABNT NBR 16940:2021; e ensaios de resistência a compressão pela ABNT NBR 5739:2018.

A aceitação ou rejeição dos lotes deve ser seguida conforme especificações da ABNT NBR 12655:2015. A resistência de dosagem é calculada a partir da Equação 5 e 6:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 * s_d \quad (5)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (f_i - f_m)^2} \quad (6)$$

Sendo:

f_{cmj} : resistência média do concreto à compressão para uma idade de j dias [MPa];

f_{ckj} : resistência característica do concreto à compressão para uma idade de j dias [MPa];

s_d : desvio padrão da dosagem [MPa];

f_i : valor de resistência de cada exemplar [MPa].

2.4.3. Controle Tecnológico

2.4.3.1. Processo de cura

Durante o processo de hidratação, desenvolve-se um gradiente térmico no concreto, onde o pavimento apresenta uma variação de temperatura entre a superfície e o interior de placa. Esse fenômeno ocorre porque o concreto é um material de baixa condutividade térmica e, ao mesmo tempo, sofre rápida perda de umidade na superfície, resultando em temperaturas distintas entre a face exposta e a região interna. Assim, quando o processo de cura é inadequadamente conduzido, podem surgir fissuras precoces que comprometem o desempenho estrutural (Schindler, 2002).

O teor de cimento exerce influência direta no processo de hidratação do concreto, quanto maior sua proporção, maior será a liberação de calor de hidratação. Esse aumento intensifica o gradiente térmico da placa gerando tensões internas adicionais e favorecendo os efeitos de retração por secagem (Johnston, 2008). Embora tais aspectos sejam frequentemente discutidos em relação aos pavimentos de concreto continuamente armado (PCCA), também se aplicam aos pavimentos de concreto simples (PCS) e pavimento de concreto reforçado (PCR). Nesses casos, uma cura

inadequada pode resultar na formação de fissuras fora das juntas previstas, comprometendo significativamente o desempenho estrutural e a durabilidade do pavimento.

O estudo conduzido por Gholami *et al.* (2024) identificou que a utilização de aditivos redutores de contração (ARC) pode reduzir em 20% a retração do concreto, além de diminuir a abertura de fissuras em mais de 40%. Esses aditivos não afetam as propriedades do concreto no estado fresco, mas reduzem a resistência elétrica e as características mecânicas da estrutura devido ao retardo na hidratação do cimento.

2.4.3.2. Textura

A texturização do pavimento é uma etapa importante na construção de pavimento de concreto de cimento Portland. Esse processo está diretamente associado com o conforto de rolamento, à redução do ruído, à eficiência da drenagem superficial e à segurança viária (Tan, 2023).

2.4.4. Barras de transferência

As barras de transferência são elementos estruturais empregados para promover a transferência de cargas entre placas de pavimentos de concreto, reduzindo a deflexão diferencial e minimizando falhas decorrentes do uso. Geralmente, são constituídas por barras cilíndricas de aço carbono, revestidas com epóxi e ancoradas em treliças metálicas pré-fabricadas, conforme descrito por Snyder (2011).

De acordo com Snyder *et al.* (2011), o diâmetro das barras de transferência é convencionalmente definido como um oitavo do comprimento da placa. Essas barras são posicionadas nas juntas de pavimentos de concreto.

Para pavimentos urbanos, a PR 1011 (2021) recomenda valores específicos para o diâmetro das barras de transferência conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Diâmetro das barras de transferência conforme espessura do pavimento conforme PR 1011

Espessura da placa (cm)	Diâmetro da barra (mm)	Observações Gerais
15 a 20	20	- Espaçamento lateral entre centros: 305 mm - Comprimento: 460 mm - Desvio máximo da extremidade da barra, vertical ou lateral: 6 mm - Deslocamento horizontal da extremidade da barra: 25 mm
21 a 23	25	
24 a 25	32	
26 a 28	35	
29 a 33	38	
34 a 36	41	
> 36	45	

Fonte: Adaptado PR 1011 (2021).

A ocorrência de defeitos nas juntas pode expor as barras de transferência à umidade, à ação da drenagem e aos sais descongelantes, criando condições favoráveis ao desenvolvimento de processos corrosivos. Como essas barras devem permanecer livres para se deslocar no interior da junta, garantindo a adequada transferência de cargas entre as placas, a formação de produtos de corrosão tende a restringir ou até impedir esse movimento. Com a perda dessa funcionalidade estrutural, as cargas passam a ser transmitidas diretamente às bordas das placas, resultando em aumento das tensões, fissuração e deterioração progressiva do concreto na região da junta. Dessa forma, o controle e a mitigação da corrosão das barras de transferência são fundamentais para ampliar a vida útil do pavimento e minimizar os custos associados à manutenção e à reabilitação (Neuhart, 2007).

Estudo recente, como o de Berman *et al.* (2024) indica que para pavimentos delgados (10 a 16,5 cm de espessura) não há necessidade de utilizar barras de transferência de carga, conforme detalhado na Tabela 3. Os autores complementam que, para espessuras inferiores a 16,5 cm, as barras não são recomendadas, uma vez que o espaço disponível acima e abaixo da barra torna-se insuficiente, aumentando o risco de fissuras, corrosão e perda de aderência das barras. Nessas condições, a transferência de carga deve ocorrer pela distribuição de agregados e pelas fibras com funções estruturais.

Tabela 3: Barra de transferência para pavimento de concreto simples

Espessura		
Pavimento de Concreto	Reforço das juntas	Diâmetro da Barra de Transferência
Simples (cm)		
$\geq 26,7$	Barra de transferência com 91,4 cm de comprimento	Barra Ø 15 mm
20,3 – 25,4	Barra de transferência com 76,2 cm de comprimento	Barra Ø 12,5 mm
17,8 – 19,1	Barra de transferência com 76,2 cm de comprimento	Barra Ø 10 mm
15,2 – 16,5	Barra de transferência com 76,2 cm de comprimento	Desnecessário
10,2 – 14,0	Desnecessário	Desnecessário

Fonte: Adaptação Berman *et al.* (2024).

Em Berman *et al.* (2024), foram comparados os resultados de transferência de carga entre dois pavimentos que não possuíam barras de transferência, mesma espessura, mesma geometria de juntas, mesmo tráfego e mesma base, sendo que um deles era pavimento de concreto simples (PCS) e outro era reforçado com fibra (PCRF). O concreto sem adição de fibras apresentou um *Load Transfer Efficiency* (LTE) de 45% a 50%, enquanto o reforçado com fibra alcançou 70% a 80%. Para reforçar a hipótese que as fibras estavam sendo responsáveis por este ganho de transferência de carga, o estudo foi triplamente validado (ensaio de campo com FWD real, modelagem com elementos finitos e ensaios laboratoriais).

De acordo com o cenário avaliado por Berman *et al.* (2024), os pavimentos de concreto reforçado com fibras (CRF) apresentam bom desempenho na transferência de carga nas juntas, especialmente em placas com espessura inferior a 16,5 cm. Outros mecanismos também contribuem para essa transferência: a base granular (30% a 40%), o intertravamento dos agregados (15% a 20%) e as próprias fibras estruturais (30% a 40%). A combinação desses fatores possibilita uma eficiência de

transferência de carga entre placas na ordem de 70% a 80%. Além de prolongar a vida útil dos pavimentos, o uso de fibras reduz o efeito de degrau e aumenta a durabilidade das juntas.

2.5. Defeitos do pavimento de concreto

Os defeitos em um pavimento de concreto de cimento Portland podem manifestar-se por diversas causas e com diferentes graus de severidade.

Em um estudo realizado por Chodounsky (2010) para avaliação de pisos industriais, constatou-se que os defeitos ocorrem principalmente devido falha de projeto, especificações inadequadas, baixa qualidade de execução, falta de controle tecnológico e mau uso.

De acordo com o DNIT 714/2005, são denominados defeitos críticos aqueles que provocam riscos à segurança do tráfego, sendo os principais citados como alçamento de placa, desnível entre placas e acostamento ou juntas transversais e buracos de grande porte.

2.5.1. Movimentação de Placas

A movimentação de placas está relacionada ao assentamento, aderência e reações entre o pavimento e as bases. Maiores movimentações podem ocorrer devido falhas de execução, erros de cálculo ou de projeto, reações entre o solo e pavimento, carga de tráfego maior que a definida pelo cálculo, percolação ou infiltração de água devido falha na selagem e variação térmica muito acentuada.

De acordo com Subedi *et al.* (2025), o coeficiente de expansão térmica (CTE) desempenha papel fundamental no controle da movimentação térmica das placas de concreto, influenciando diretamente o empenamento, o surgimento de tensões internas, a abertura das juntas e o potencial de fissuração. Esse parâmetro é afetado por fatores como o volume de água disponível nos poros, a distribuição dos poros (capilares ou microcapilares) e o tipo de agregado empregado na mistura. Na Tabela 4 é apresentado o CTE composições de concreto.

Tabela 4: Valores de CTE de diferentes tipos de agregados e concreto por tipo de agregado

Tipo de Agregado	Coeficiente de expansão térmica (CTE) [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	
	Agregado	Concreto
Granito	7-9	8,50
Basalto	6-8	7,80
Calcário	6	7,80
Dolomita	7-10	8,92
Arenito	11-12	9,58
Quartzo	11-13	9,34
Mármore	4-7	-
Calcário Silicioso	7-9	-
Cascalho de Rio Silicioso	11-13	-

Fonte: Adaptado Subedi, 2025.

Este coeficiente é correlacionado à deformação térmica dos materiais, expresso pela Equação 7 (ASTM C531, 2023):

$$\varepsilon = CTE * \Delta T \quad (7)$$

Sendo:

ε : deformação térmica do material;

CTE: Coeficiente de expansão térmica;

ΔT : variação térmica.

De acordo com Subedi *et al.* (2025), o coeficiente de expansão térmica (CTE) do concreto apresenta comportamento não linear em função da temperatura. Na faixa entre 20 °C e 30 °C, observa-se influência significativa da variação de umidade sobre o CTE. Já em temperaturas superficiais mais elevadas, entre 40 °C e 50 °C, ocorre um aumento do CTE associado ao processo de secagem do concreto, resultando em uma tendência de curvatura convexa conforme a temperatura se eleva.

Solos saturados também apresentam valores elevados de CTE, uma vez que o maior volume de água nos poros intensifica a sensibilidade térmica, com valores variando entre $10,5 \times 10^{-6}$ e $12,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. A expansão térmica da água contida nos poros contribui para uma dilatação adicional, com CTE entre $8,0 \times 10^{-6}$ e $9,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Em contrapartida, durante a secagem, quando a umidade interna se encontra em

torno de 30 % a 50 %, a menor quantidade de água reduz sua contribuição para o acréscimo do CTE (Subedi *et al.*, 2025).

Assim, o aquecimento da água nos poros promove micro-retrações devido à evaporação, enquanto o resfriamento favorece micro-expansões, evidenciando a complexa interação entre temperatura, umidade e comportamento térmico do concreto (Subedi, 2025).

Estudos recentes indicam que a adoção de um único valor de coeficiente de expansão térmica (CTE) pode ser inadequada, especialmente em climas quentes e úmidos. Nessas condições, típicas de regiões tropicais, o CTE tende a ser mais elevado ao longo do ano, intensificando o empenamento das placas, as tensões térmicas, a abertura das juntas e o risco de fissuração e falhas estruturais. Pavimentos recém-curados e aqueles executados com agregados de maior CTE são ainda mais suscetíveis a esses efeitos, os quais se agravam em ambientes de temperaturas elevadas e alta umidade. Evidências experimentais em climas extremos mostram que valores de CTE acima dos usuais podem gerar expansão excessiva das placas, aumento do empenamento e danos severos nas juntas, reforçando a necessidade de critérios de projeto que considerem a variabilidade climática e dos materiais (Subedi *et al.*, 2025; Shakhmov *et al.*, 2025).

O empenamento das placas também pode ser ocasionado por fatores estruturais, como entupimento ou obstrução de juntas, juntas muito rasas (inferior ou igual a 3,0 cm) e ausência de juntas de dilatação. Esses aspectos evidenciam que as juntas têm papel crucial no controle da movimentação das placas proporcionados pela ação térmica. O projeto inadequado das juntas é o principal fator que transforma a dilatação e contração das placas em danos estruturais (Shakhmov *et al.* 2025).

Abraham e Ransinchung (2020) destacam que mudanças abruptas de temperatura amplificam significativamente as tensões na superfície e na base dos pavimentos de concreto, podendo, em determinadas condições, superar as tensões induzidas por cargas de tráfego. Em situações extremas, caracterizadas por grande amplitude térmica diária, o gradiente térmico torna-se o principal mecanismo de fissuração. A espessura da placa exerce influência direta sobre a distribuição desse gradiente: placas mais espessas apresentam menor curvatura devido à maior rigidez,

mas estão sujeitas a tensões internas mais elevadas; já placas mais delgadas sofrem maior empenamento, embora reduzam parte das tensões internas.

Complementando essa análise, Mahfuda *et al.* (2023) também afirmam que as variações de temperatura podem gerar tensões equivalentes às provocadas pelo tráfego, especialmente em regiões de clima tropical. Nessas condições, o elevado empenamento das placas, associado às tensões de topo e borda, combinado com as cargas de tráfego, pode resultar em esforços que atingem até 83% da resistência à tração do concreto. Esse cenário acelera o processo de fadiga e reduz a vida útil da estrutura. Os autores reforçam, portanto, a necessidade de considerar de forma criteriosa os efeitos térmicos no dimensionamento e na operação de pavimentos rígidos em ambientes quentes.

O CTE é de extrema importância para definir os impactos da temperatura no pavimento e crucial para compreender o comportamento da placa de concreto. Quanto maior o CTE, maior é a curvatura do empenamento, maior é o risco de fissuras longitudinais precoces, trincas de canto e falhas nas juntas. As tensões máximas ocorrem no centro (região crítica para tração), bordas (segunda região mais crítica) e interior (menor tensão térmica), assim como pelo método analítico de Bradbury. As juntas auxiliam a controlar e a manter o espaçamento entre as placas, profundidade, transferência de carga e a largura de abertura (Abraham e Ransinchung, 2020).

Abraham e Ransinchung (2020) concluem que as tensões térmicas são inevitáveis e podem ser predominantes em pavimentos de concreto, porém elas dependem diretamente do gradiente de temperatura, não apenas da temperatura absoluta.

De acordo com o DNIT 61/2004, existem diferentes tipos de defeitos relacionados a movimentação de placas, tais como desnível de juntas, alçamento de placas, placa bailarina, passagem de nível e assentamento.

O desnível entre juntas ou escalonamento refere-se ao desnível permanente entre placas localizado na região das juntas (DNIT 61, 2004). No DNIT 60/2004, é estabelecido que o grau de severidade é baixo para desnível entre 3 e 10 mm, médio entre 10 e 20 mm e alto superior a 20 mm.

Segundo a FHWA (2014), o desnível entre juntas aceitável deve ser inferior ou igual a 18 mm.

Esses parâmetros devem ser considerados apenas entre desníveis de placas. Para desnível entre sarjetas e acostamentos, deve-se considerar como severidade baixa o desnível com valor entre 25 e 50 mm, médio entre 50 e 100 mm e alto superior a 100 mm. Ressalta-se que, para desníveis de grau médio, há risco significativo à segurança de rolamento, sendo necessário o reparo imediato para restabelecer as condições adequadas de tráfego e desempenho do pavimento DNIT 60 (2004).

As placas bailarinas são definidas pelo DNIT 61/2004 como uma movimentação vertical perceptível pelo tráfego comumente localizada na região das juntas. O grau de severidade é definido por meio do desnível, sendo determinado como baixo entre 3 e 10 mm, média entre 10 e 20 mm e alto superior a 20 mm (DNIT 060, 2004).

Os graus de severidade do alçamento de placas (desnível entre juntas, fissuras transversais ou nas proximidades das sarjetas), passagem de nível (diferença de nível nos trilhos de roda), assentamento (afundamentos superficiais ondulares de grande extensão sem comprometer a integridade do pavimento) estão relacionados à segurança e conforto de rolamento do pavimento de acordo com o DNIT 060 (2004).

2.5.2. Fissuras

À medida que o pavimento envelhece, é comum o surgimento de fissuras de diferentes tipos e graus de severidade, o que pode comprometer suas funcionalidades e reduzir sua vida útil.

O impacto das fissuras na estrutura varia de acordo com o grau de severidade. Fissuras mais profundas podem reduzir a capacidade de carga, acelerar o processo de corrosão com perda de aderência das armaduras, comprometer a durabilidade e afetam a estética do pavimento. Conforme Golewski (2023), essas fissuras podem ser classificadas em:

- Microfissuras, com abertura inferior a 0,1 mm.
- Macrofissuras, que apresentam variação de espessura e fragmentações.

Segundo Golewski (2023), as fissuras podem ser causadas por definições equivocadas de projeto e composição dos materiais, como:

- Tensão térmica inicial.
- Retração do concreto.
- Heterogeneidade do material.
- Problemas no projeto da armadura e na distribuição do concreto.

Além disso, fatores relacionados à execução e uso do pavimento também podem contribuir para a formação de fissuras, incluindo:

- Sobrecargas.
- Problemas na fundação.
- Deficiências na compactação, vibração, cura e selagem.
- Exposição a condições ambientais agressivas.

Asvitha e Ravi (2023) complementam que as fissuras podem ocorrer tanto no estado endurecido quanto no fresco, sendo que no estado fresco são consideradas as mais críticas por apresentarem perda de durabilidade precoce. Para as fissuras no estado fresco, existem dois mecanismos principais da fissura de retração: retração plástica (redução volumétrica tridimensional devido a perda de água e formação de pressão capilar) e segregação plástica (redução de volume vertical devido à sedimentação das partículas sólidas).

As fissuras por penetração de ar e pressão capilar são provocadas quando o ar entra no sistema de poros e a pressão capilar atinge pressão de irrupção, forçando redistribuição da água nos capilares, marcando o início das fissuras por retração plástica). Para reduzir a ocorrência e a severidade das fissuras iniciais pode-se adicionar fibras, fazer ajustes no traço (redução de água, uso de aditivos plásticos e controle de granulometria) e a utilização de cura intermediária.

Complementado pelos autores citados anteriormente, no estado endurecido, os mecanismos de fissuras podem ser classificados como:

- a) Fissuras de retração por secagem: provocada pela perda gradual de água durante a cura e variação térmica, ocasionando em fissuras finas entre 0,2 mm e 0,3 mm;
- b) Fissuras térmicas: provocadas pelo gradiente térmico entre o centro e a superfície do pavimento que provocam dilatações diferenciais. Durante o processo de resfriamento, pode provocar tensões de tração e microfissuras superficiais que podem comprometer a durabilidade;
- c) Fissuras associadas a corrosão: onde a ação eletroquímica proveniente da corrosão do aço devido ao efeito dos cloretos (corroem a camada passiva da armadura) e carbonatação (reduz o pH, tornando o aço suscetível). O efeito provoca expansão volumétrica dos produtos de corrosão, levando à fissuração do cobrimento e perda de aderência.

Para controlar as fissuras no estado endurecido, recomenda-se o uso de reforços localizados com uso de materiais expansivos ou, conforme a tendências de estudos modernos, o uso de agentes autorregeneradores, bactérias e nanomateriais (Asvitha e Ravi, 2023).

A variação térmica impacta a laje do pavimento de maneira não uniforme. Conforme Sen *et al.* (2022), quando submetido a grandes variações térmicas, principalmente durante o dia e às tensões causadas pelo tráfego, o pavimento de concreto pode sofrer fissuras por fadiga, reduzindo sua vida útil.

Este fato é reforçado por Cargnin e Balbo (2016) que abordam sobre o efeito do empenamento térmico do concreto advinda da variação térmica do ar, sendo que nos países tropicais apresentam um alto aquecimento no período diurno e um alto resfriamento no período noturno. Os efeitos da temperatura afetam o concreto tanto no estado fresco, provocando interferências no processo de cura e por sua vez gerando fissuras de retração, quanto após o seu endurecimento, que juntamente com as cargas de tráfego podem elevar as tensões de tração na flexão e provocar fadiga que, por sua vez, geram fissuras na placa sujeita a esses esforços.

De acordo com Fan *et. al* (2020), as fissuras de canto, fissura de divisão de placa, fissuras longitudinais, transversais e diagonais estão relacionadas com carga de tráfego, fissuração por durabilidade (fissuras em D) e fissuras por retração são

causadas por efeitos climáticos. As fissuras em D são causadas pelo ciclo contínuo de congelamento e descongelamento que afetam os agregados graúdos do pavimento de concreto.

As fissuras permitem a infiltração de água, reduzindo a compactação das camadas inferiores (base), diminuindo a capacidade de carga e, assim, reduzindo a vida útil do pavimento, tornando a superfície irregular e comprometendo a segurança dos condutores. Dessa forma, é de suma importância que as fissuras sejam identificadas e monitoradas seja por inspeção visual ou instrumental. Com o avanço da tecnologia, o uso de inteligência artificial tem auxiliado no mapeamento desses defeitos (Fan, 2020).

Para a inspeção visual, o DNIT 61/2004 denomina as fissuras em pavimentos de concreto de cimento Portland e o DNIT 60/2004 determina o grau de severidade de cada tipo de fissura, dividindo entre graus de severidade de Baixo (B), Médio (M) e Alto (A). A classificação é feita da seguinte forma:

a) Fissura de canto

Intercepta as juntas até metade do comprimento das bordas e pode atravessar toda a espessura da placa, Figura 4. O grau de severidade é determinado a partir da quantidade de outras fissuras identificadas entre a fissura de canto e as juntas da seguinte forma:

- Baixo (B): quando não possui fissuras.
- Médio (M): quando é apresentado no máximo duas.
- Alto (A): quando é apresentado duas ou mais fissuras.

O DNIT recomenda que quando apresentado duas ou mais fissuras de canto de graus de severidade distintos, deve-se registrar apenas a que possui grau mais elevado.

Figura 4: Fissura de canto de placa



Fonte: DNIT 061/2004 - TER, 2004

b) Placa dividida:

Fissuras que segmentam a placa em quatro ou mais partes, Figura 5. O grau de severidade é determinado conforme a Tabela 5. O DNIT determina que em caso de grau de severidade médio ou alto, nenhum outro defeito precisa ser reportado.

Tabela 5: Grau de severidade de placa dividida

Severidade da maioria das fissuras	Número de pedaços em que a placa está dividida		
	4 a 5	6 a 8	Mais de 8
B	B	B	M
M	M	M	A
A	M	A	A

Fonte: Adaptada DNIT-061/2004-TER, 2004.

Figura 5: Placa dividida



Fonte: DNIT 61/2004 - TER, 2004

c) Fissuras lineares:

Atravessam toda a espessura da placa e podem ser:

- Transversais: Perpendiculares ao eixo da via, Figura 6-a.

- Longitudinais: Paralelas ao eixo da via, Figura 6-b.
- Diagonais: Inclínadas, interceptando juntas em mais da metade do seu comprimento, Figura 6-c.

Figura 6: Fissuras lineares em diferentes graus de severidade - a) Fissura Linear Transversal; b) Fissura Linear Transversal; c) Fissura Linear Diagonal



Fonte: DNIT 61/2004 - TER, 2004

O grau de severidade é determinado de diferentes formas para cada grau:

- Baixo (B): quando não existe degrau e a fissura não possui tratamento (selagem) com abertura inferior a 12 mm de espessura ou qualquer abertura com tratamento em boas condições.
- Médio (M): para fissuras sem tratamento e abertura entre 12 e 50 mm; sem tratamento, abertura de até 50 mm e degrau com menos de 10 mm; ou fissuras com tratamento, apresenta qualquer valor de abertura e possui degrau inferior a 10 mm, todas medidas a partir da parte superior da placa de concreto.
- Alto (A): fissuras sem tratamento com abertura superior a 50 mm ou degrau superior a 10 mm (com ou sem tratamento).

De acordo com o DNIT 60/2004, as placas que apresentarem fissuras de grau de severidade médio e alto são normalmente consideradas como defeitos estruturais.

d) Fissuras superficiais (rendilhado) e escamação:

Ocorrem pelo descolamento da camada superficial fissurada, formando um padrão característico. Fissuras capilares podem atingir profundidades entre 6 e 13 mm e tendem a se cruzar em ângulos de 120° , Figura 7. De acordo com o DNIT, o grau de severidade é dividido em:

- Baixo (B): é identificado fissuras superficiais em grande parte da placa, contudo a superfície apresenta boas condições com poucas escamações.
- Médio (M): são apresentadas escamações em até 15% da área da placa.
- Alto (A): as escamações compõem mais de 15% da área da placa.

Apenas é reportando em casos de severidade média e alta, contudo as severidades baixas que apresentarem risco de escamação iminente também devem ser reportados.

Figura 7: Fissura Superficial e Escamação



Fonte: DNIT 61/2004 - TER, 2004

e) Fissuras de retração plástica: Distribuem-se aleatoriamente, formando ângulos de 45° a 60° com o eixo da placa. São pouco profundas, com abertura inferior a 0,5 mm e comprimento limitado. Ou seja, fissuras capilares e curtas (não abrangem a todo comprimento da placa), Figura 8. Neste caso, o DNIT não determina um grau de severidade, contudo determina que esse defeito deve ser reportado a partir da quantidade de placas que apresentam este defeito.

Figura 8: Fissuras de retração plástica



Fonte: DNIT 61/2004 - TER, 2004

Estudos recentes como os de Fan *et al.* (2020) e Xing *et al.* (2024) demonstram que a tendência do estudo relacionado a fissuras está relacionada ao desenvolvimento de ferramentas ou métodos tecnológicos de detecção de fissuras. Em ambos os estudos foram desenvolvidos métodos automáticos de detecção de fissuras com o aprimoramento de inteligência artificial e redes neurais complexas para manutenção e gestão de pavimentos.

O estudo de Fan *et al.* (2020) tem como foco o aperfeiçoamento do processamento de imagem (U-Net) dentro do espectro visível. Já o estudo de Xing *et al.* (2024) aborda sobre a evolução deste conceito, agregando os espectros visível (RGB), infravermelho e mecanismos adaptativos para lidar com as condições reais de campo (iluminação variável, umidade etc.). Em outras palavras, o trabalho de 2020 foca em melhorar a arquitetura de rede para detectar fissuras em imagens 2D, enquanto o de 2024 amplia esse conceito ao integrar novas fontes de dados (infravermelho) e adaptação às condições ambientais, tornando a tecnologia mais próxima do uso em inspeções reais e contínuas.

2.5.3. Esborcinamento

Trata-se de um defeito de quebra lateral de uma superfície, geralmente localizado em juntas ou em aberturas de fissuras. Em pavimentos de concreto simples (PCS) este efeito pode ocorrer principalmente nas bordas das placas delimitadas pelas juntas ou em fissuras, ocasionadas tanto no estado fresco quanto no endurecido. Este fenômeno pode permitir a entrada de água nas camadas inferiores do pavimento que, por sua vez, podem proporcionar outros defeitos como bombeamento de finos e descalçamento da placa (Balbo, 2009).

Podem ocorrer principalmente pela falha na execução das juntas, carência de barras de transferência de carga, perda de suporte das bases ou em casos de delimação na fase de hidratação do concreto, mas principalmente pela ação da infiltração de água e do tráfego repetitivo que enfraquece as bordas (Kosmatka, 2011 & ACI, 2007).

Além disso, a AASHTO (1993) relaciona o esborcinamento em PCS com falhas na transferência de carga e bombeamento nas juntas, que aceleram o destacamento de concreto nas bordas.

Para garantir que a água não infiltre nas juntas e provoque defeitos nas placas, deve-se utilizar selantes ou enchimentos. Enchimentos são materiais compostos por uma composição mais rígida que os selantes e geram suporte às bordas das juntas. Geralmente recomenda-se o uso de selantes elastoméricos em locais com tráfego leve, sendo este um material mais resiliente. Porém, para tráfegos intensos é necessário um suporte nas juntas com enchimentos epóxi ou outros materiais semirrígidos (Kosmatka, 2011).

De acordo com o DNIT 060 (2004), o esborcinamento é classificado em graus de severidade de Baixo (B), Médio (M) e Alto (A), conforme Tabela 6.

Tabela 6: Grau de severidade de esborcinamento de juntas

Partes Esborcinadas	Largura do Esborcinamento (mm)	Comprimento do Esborcinamento (m)	
		< 0,6	> 0,6
Firmes – não pode ser removidas facilmente (podem ter alguns pedaços faltando)	< 100	B	B
	> 100	B	B
Soltas – poder ser removidas e faltam alguns pedaços; a maior parte ou todos os pedaços estão faltando e o esborcinamento é raso (< 25 mm)	< 100	B	M
	> 100	B	M
Ausente – grande parte ou todos os pedaços foram removidos	< 100	B	M
	> 100	M	A

Fonte: Adaptada DNIT-060/2004-PRO, 2004.

2.5.4. Outros defeitos

Defeitos como desgaste superficial (desgaste superficial da argamassa com afloração dos agregados), Figura 9a, bombeamento (expulsão de finos provenientes do solo nas juntas, bordas ou trincas durante a passagem da carga) e buracos (área aprofundada com perda de concreto provocadas por outros defeitos), Figura 9b, não possuem grau de severidade definido pelo DNIT 60 (2004), mas tais defeitos e as placas correspondentes devem ser reportadas.

Figura 9: Defeitos diversos sem grau de severidade determinado - a) desgaste superficial; b) buraco



Fonte: DNIT 61/2004 – TER, 2004

Além disso, pode ocorrer falha na selagem das juntas, definido como avaria relacionada ao material selante que permita a passagem de finos ou infiltração de água. De acordo com o DNIT 061 (2004), as principais falhas estão relacionadas ao rompimento devido a tração ou compressão, extrusão do material selante, crescimento de vegetação, endurecimento do material, perda de aderência com as placas de concreto e quantidade deficiente de selante das juntas.

O grau de severidade é avaliado pela quantidade de defeitos relacionados a selagem, sendo que se existir um ou mais defeitos de grau de severidade elevado, então se torna necessário a substituição da selagem (DNIT 060, 2004).

2.6. Métodos de avaliação da condição e qualidade do pavimento (indicadores de desempenho)

O pavimento de concreto de cimento Portland utilizado em meios urbanos é uma tecnologia funcional que garante diversos benefícios para os usuários. Sua implementação garante sustentabilidade, economia de custos, recursos e diversos outros benefícios já citados anteriormente.

A idade e o uso dos pavimentos podem reduzir algumas de suas funcionalidades. Para garantir que a superfície atinja a vida útil estimada para o projeto, são definidos

alguns indicadores de desempenho. Sendo que eles são obtidos por meio do monitoramento do local em que foi aplicado.

Golewski (2023) por meio de um estudo empírico com dados coletados de rodovias da Carolina do Sul constatou que o volume de tráfego, velocidade do fluxo livre e precipitação média anual são fatores cruciais que influenciam diretamente no desempenho do pavimento.

De acordo com o cenário estudado por Rahman (2017), a precipitação tem maior influência no pavimento de concreto se comparado a influência da temperatura. A umidade altera as propriedades mecânicas do pavimento, degradando a superfície, reduzindo a aderência entre as camadas e amolecendo o subleito. Além disso, a água acelera a deterioração (danos superficiais), aumenta a rugosidade, a ocorrência de fissuras e deformações.

Além disso, o tipo de solo é de extrema importância para o desempenho do pavimento. Solos do tipo A (argilosos e silte-argilosos) geralmente apresentam alta plasticidade e baixa capacidade de drenagem, sendo menos adequado estruturalmente. Solos tipo B (arenosos) possuem melhor drenagem por ser mais granular e serem menos suscetíveis aos efeitos de umidade. Ou seja, solos tipo B apresentam um melhor desempenho geral do pavimento (melhor drenagem evita saturação das bases e deformação das bases, reduzindo trincas e recalques) e apresentam melhores condições de conforto (melhor distribuição de tensões e minimizam movimentações diferenciais nas juntas) (Rahman, 2017).

Para a avaliação da integridade e eficiência do pavimento de concreto, existem diversos métodos, tais como IRI (Índice de Irregularidade Internacional), MPD (Profundidade Média do Perfil), MTD (Profundidade Média de Textura), ATR (Afundamento de Trilha de Roda), FWD (*Falling Weight Deflectometer*), ICP (Índice de Condição do Pavimento etc. Porém, para este estudo, foi abordado e aprofundado os índices ICP e FWD.

2.6.1. Índice de Condição do Pavimento (ICP)

É um número que representa o estado ou condição do pavimento. Para ICP superior ou igual a 70 não são necessários programas de recuperação, porém para

ICP inferiores a 40 são considerados como alto nível de inconformidade, deficiente ou praticamente destruído (DNIT 714, 2005).

Em estudo realizado por Saadulla *et al.* (2019), em um pavimento de concreto em Sulaimani (Iraque) constatou-se que o ICP é uma ferramenta eficiente para avaliar pavimentos rígidos, permitindo localizar defeitos (como esborcinamento e trincas em juntas), quantificar sua severidade e planejar manutenções. Nos pavimentos de concreto estudados, a pesquisa destacou a necessidade de manutenção periódica das juntas para evitar queda significativa no desempenho estrutural e funcional, visto que o ICP foi de 41 (considerado como razoável).

Estudos mais recente elaborado por Yilmaz *et al.* (2024), que objetivou relacionar o ICP com a condição do subleito do pavimento de concreto compactado com rolo (PCCR) por meio do CBR (California Bearing Ratio). Para o cenário avaliado e as condições estabelecidas no estudo, constatou-se que o CBR teve uma correlação significativa, porém limitada com o ICP. Além disso, reforça que a maior parte dos defeitos apresentados não estão relacionadas ao tráfego, mas sim por falhas construtivas e de projeto.

Cerca de 73% dos defeitos observados estavam relacionados à deficiência do subleito, sobretudo em função da carência ou inadequação da drenagem. Nesse sentido, os autores reforçam a necessidade de desenvolver modelos de avaliação que considerem simultaneamente os defeitos do pavimento e sua interação com o clima, drenagem e condições geotécnicas (Yilmaz *et al.*, 2024).

Defeitos construtivos como juntas frias (ocasionadas pela descontinuidade de lançamento do concreto), e compactação deficiente foram as principais causas do desenvolvimento de trincas longitudinais. As juntas frias, principalmente em divisas de faixas, podem provocar uma zona fraca no centro da pista e essa área com baixa coesão se torna um ponto de concentração de tensões, o que proporciona o desenvolvimento de trincas longitudinais ao longo do eixo da via. Para evitar este fenômeno, recomenda-se o corte da borda da primeira seção aplicada, limpeza da interface e remoção de nata de cimento ou aplicação de material ligante antes da segunda seção (Yilmaz *et al.*, 2024).

A compactação em regiões próximas às bordas das faixas é naturalmente mais difícil de se executar. Isso agrava a fragilidade da junta central, especialmente em RCC, que tem baixo teor de água e mistura mais seca, o que exige compactação homogênea para garantir resistência adequada (Yilmaz *et al.*, 2024).

Para garantir que o pavimento tenha um melhor desempenho, um maior tempo de vida útil e haja uma otimização do custo público, Yilmaz *et al.* (2024) concluem que é necessário a aplicação de manutenções preventivas, tratamento adequado de juntas e continuidade de execução para evitar juntas frias, dimensionamento adequado do pavimento, instalação de sistema de drenagem mais eficazes para evitar infiltrações para o subleito e o uso sistemático do ICP para o acompanhamento dos defeitos e auxílio nas estratégias de manutenção.

De acordo com o DNIT 62/2004, o Índice de Condição do Pavimento (ICP) de cada amostra é determinado por meio do preenchimento de uma ficha de inspeção, na qual são registrados os dados do trecho, o tipo de defeito e o grau de severidade. O cálculo do ICP parte do valor 100 (quando não há defeitos visíveis na amostra) e é reduzido pela somatória dos valores dedutíveis corrigidos (VDC). O VDC, por sua vez, é obtido a partir do número de valores dedutíveis (CVD) e da sua respectiva influência na condição estrutural do pavimento. Tanto os valores de CVD quanto os diagramas de correção necessários para o cálculo do VDC são fornecidos pelo DNIT 62/2004.

Dessa forma, o ICP pode ser determinado pelas Equações 8 e 9. Quando realizado o cálculo do ICP de todo trecho, recomenda-se realizar a média aritmética dos valores de ICP.

$$ICP = 100 - VDC \quad (8)$$

Sendo:

ICP: Índice de Condição do Pavimento;

VDC: Valores Deduzíveis Corrigido de terminado através do diagrama do anexo do DNIT 62/2004 ou através da Equação 9.

$$VDC = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} CVD(T_i, S_j, D_{ij}) F_{(t,q)} \quad (9)$$

Sendo:

CVD: valor deduzível, determinado a partir do defeito (T_i), grau de severidade (S_j) e densidade do defeito (D_{ij}) ao qual é definido através de tabelas e diagramas nos anexos do DNIT 62/2004;

i: contador para tipos de defeitos;

j: contador para graus de severidade;

p: número total de placas defeituosas;

m_i : número de grau de severidade para o tipo de defeito

$F_{(t,q)}$: uma função de ajustamento para defeitos múltiplos que varia o valor deduzível somado (t) e o número de dedução (q).

Definido o ICP, o DNIT 62/2004 estabelece o conceito ou *status* do pavimento, em intervalos percentuais, sendo representado conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Escala de avaliação do ICP

Conceito	Escala de ICP
Excelente	$85 < ICP \leq 100$
Muito Bom	$70 < ICP \leq 85$
Bom	$55 < ICP \leq 70$
Razoável	$40 < ICP \leq 55$
Ruim	$25 < ICP \leq 40$
Muito Ruim	$10 < ICP \leq 25$
Destruído	$0 \leq ICP \leq 10$

Fonte: Adaptado DNIT 62/2004 - PRO (2004)

2.6.2. *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

O FWD (Falling Weight Deflectometer) é um equipamento utilizado para avaliar a condição estrutural dos pavimentos. Ele funciona simulando o efeito de uma carga móvel (como a de um veículo em movimento) sobre o pavimento, aplicando uma carga dinâmica através da queda de um peso.

Para a coleta, são posicionados geofones ou sismômetros em diferentes distâncias que captam a deformação vertical (deflexão) aplicada pela carga, aos quais são transmitidas para um computador onde a coleta é armazenada. O ensaio é realizado conforme as diretrizes do DNER-PRO 273/96 (1996).

A carga é distribuída radialmente, sendo que o defletômetro central (D_0) representa a deflexão sob a carga e o D_n representa a deflexão radial provocada pela propagação da carga em distâncias de 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120 e 150 cm.

As leituras obtidas com o FWD permitem avaliar a rigidez das camadas do pavimento, a resposta do subleito e a eficiência da transferência de carga em juntas e fissuras, fornecendo subsídios essenciais para o diagnóstico e o planejamento de intervenções (Balbo, 2007).

Nos pavimentos rígidos de concreto, a transferência de carga entre placas ocorre por meio do intertravamento dos agregados, da presença de barras de ligação e do suporte oferecido pela base e pelo subleito. A eficiência desse processo, conhecida como *Load Transfer Efficiency* (LTE), é um fator determinante para o desempenho do pavimento, pois valores reduzidos podem ocasionar fissuras longitudinais e ressaltos na superfície. A LTE é influenciada pela rigidez das juntas, pelas condições de suporte e pelas variações térmicas ao longo do dia (Khazanovich & Gotlif, 2003).

Ao qual é determinada a transferência de carga (LTE) pode ser determinada pela Equação 10:

$$LTE = \frac{\text{deflexão da placa não carregada } (D_n)}{\text{deflexão da placa carregada } (D_0)} * 100 \quad (10)$$

De acordo com o FHWA (2014), o LTE é interpretado conforme a Tabela 8:

Tabela 8: Escala de avaliação da transferência de carga

LTE (%)	Conceito
$90 \leq \text{LTE} \leq 100$	Excelente
$75 \leq \text{LTE} < 90$	Bom
$50 \leq \text{LTE} < 75$	Razoável
$25 \leq \text{LTE} < 50$	Ruim
$0 \leq \text{LTE} < 25$	Péssimo

Fonte: Adaptado FHWA, 2014.

Segundo a AASHTO (1993), valores acima de 70% apresentam uma excelente transferência de carga (juntas bem travadas ou barras eficientes), entre 50% e 70% é aceitável e abaixo de 50% é considerado muito baixo e recomenda-se manutenção ou reconstrução por apresentar risco de degradação estrutural.

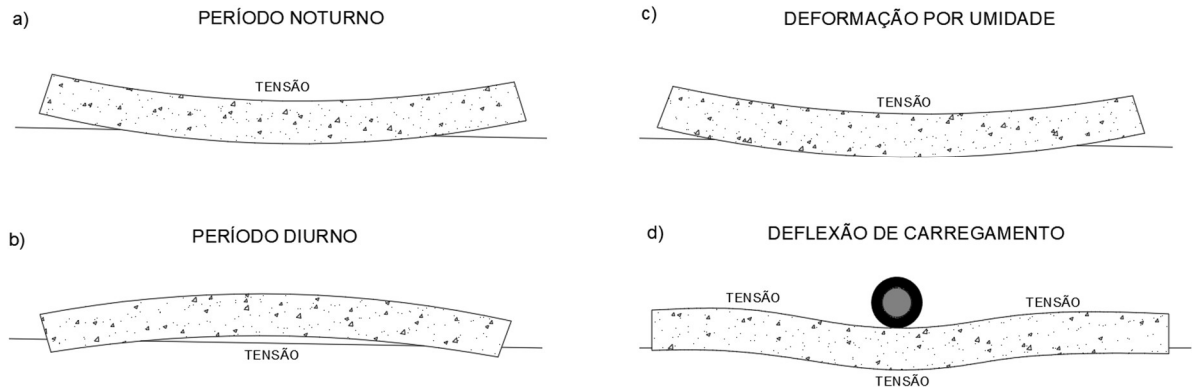
Muslim *et al.* (2021), por meio de uma análise de um banco de dados do FWD LTPP/SMP (*Long Term Pavement Performance – Seasonal Monitoring Program*), constataram que as medições realizadas com o FWD podem sofrer distorções quando executadas em condições inadequadas de temperatura e horário. Os autores recomendam que, em regiões sujeitas a congelamento, os ensaios sejam realizados em temperaturas entre 12 °C e 21 °C; já em regiões sem congelamento, a faixa ideal é de 16 °C a 24 °C. Além disso, sugerem que a coleta ocorra preferencialmente nas estações de primavera e outono, por apresentarem temperaturas mais estáveis e próximas das condições recomendadas. Quanto ao horário, o período da manhã (08h às 12h) é considerado o mais adequado, pois o gradiente térmico é menos acentuado, as placas permanecem mais planas, as juntas não estão travadas.

O gradiente térmico pode afetar a deflexão do pavimento rígido, dessa forma distorcendo a eficiência da transferência de carga (LTE). Um gradiente térmico positivo (topo mais quente) gera um encurvamento para baixo, descolamento as bordas, Figura 10a. Por outro lado, gradientes térmicos negativos (topo mais frio) gera um encurvamento para cima, onde o centro da placa perde suporte da base, Figura 10b (Choubane & Tia, 1995). Além do efeito da ação da temperatura, o pavimento sofre

deflexão tanto por variação de umidade quanto pela ação da carga de tráfego, Figura 10c e Figura 10d (Mohamed e Hansen, 1997).

Figura 10: Deflexão do pavimento de concreto por: a) efeitos de retração térmica noturna; b) efeitos de retração térmica diurna; c) deformação por umidade; d) efeitos de carregamento

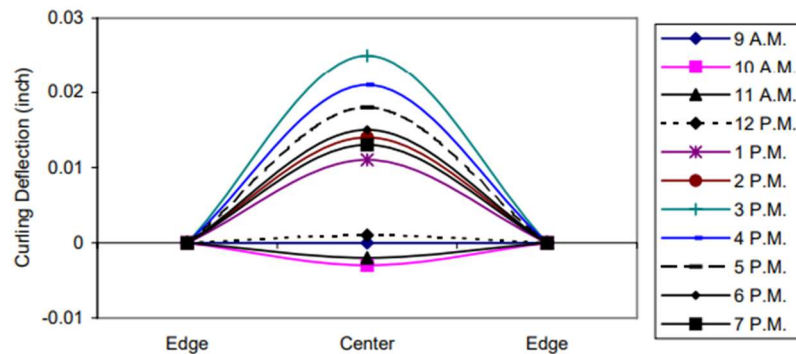
RETRAÇÃO TÉRMICA



Fonte: Adaptado Mohamed e Hansen, 1997.

Siddique *et al.* (2005) complementam que a amplitude do encurvamento devido ao gradiente térmico pode passar de 2 mm a 6 mm, consequentemente afetando a coleta do FWD. Os encurvamentos para cima ocorrem durante a tarde, e encurvamentos para baixo ocorrem no início da manhã, conforme representado pelo Gráfico 1.

Gráfico 1: Encurvamento de centro de placa provocado pelo gradiente térmico



Fonte: Siddique *et al.* (2005)

Dessa forma, o LTE (*Load Transfer Efficiency*) é diretamente proporcional com a variação térmica, ou seja, LTE aumenta com o aumento da temperatura (juntas travadas) e diminui com sua respectiva redução (juntas se abrem). Visto isso, coletas realizadas no período da tarde podem trazer resultados superestimados (Shoukry, 2005).

Contudo, a deflexão varia conforme o módulo de reação do subleito, representado pela equação 11 (Huang, 2004, AASHTO, 1993 e DNIT 055, 2004):

$$\omega_0 = \frac{q}{k} \quad (11)$$

Sendo:

ω_0 (mm): deflexão vertical, ou seja, afundamento do subleito sob a pressão exercida;

q (kPa): pressão no subleito, ou seja, pressão vertical aplicada pela placa no solo;

k (kPa/mm): módulo de reação do subleito, ou seja, representa a rigidez do apoio ou quanto o solo resiste a deflexão vertical (k alto representa um subleito rígido e um k baixo representa um subleito flexível).

Um estudo mais recente elaborado por Zhang *et al.* (2018) avalia a interação da variação sazonal com o módulo de reação do subleito, constatando que o módulo de reação do subleito (k) apresenta sua maior variação durante os ciclos de congelamento e degelo devido às mudanças de rigidez do solo provocadas pela formação e fusão do gelo. Entretanto, os autores destacam que, mesmo na ausência de congelamento, o k continua variando ao longo do ano, principalmente em função das alterações de umidade (em estado líquido) no subleito e nas camadas granulares. Em períodos de calor, a tendência é de estabilização ou aumento do k por secagem superficial, enquanto a saturação reduz seu valor independentemente da temperatura.

De acordo com Asbahan e Vandenbossche (2011), gradientes de umidade, que se desenvolvem progressivamente ao longo do tempo, induzem um encurvamento permanente das placas de concreto. A superfície da laje perde umidade mais rapidamente que as regiões inferiores, produzindo maior retração na zona superior e menor retração na inferior. Como essa deformação é parcialmente irreversível, estabelece-se um momento interno que mantém a placa curvada para cima mesmo na ausência de gradientes térmicos instantâneos. Assim, o pavimento não retorna ao estado plano quando a temperatura se uniformiza, pois a curvatura construída pela retração por umidade somente seria anulada caso o gradiente térmico transitório coincidissem perfeitamente com o gradiente “construído”, condição raramente observada em campo.

Esse encurvamento permanente altera significativamente a interação laje-subleito, reduzindo o contato efetivo no centro da placa e concentrando o apoio nas bordas. Sob carregamento veicular, essa condição geométrica faz com que a placa já esteja previamente tracionada na fibra superior, de modo que as tensões *top-down* aumentem pela superposição do momento imposto pelo tráfego ao momento inicial gerado pelo empenamento. Como consequência, o pavimento torna-se mais suscetível à fadiga superficial e à fissuração iniciada no topo da laje. Além disso, o estado de curvatura influencia as deflexões medidas pelo FWD, podendo produzir interpretações equivocadas de k , LTE e rigidez do suporte caso não se considere que parte da resposta observada decorre da condição pré-curvada da placa, e não exclusivamente das características do subleito (Asbahan e Vandebossche, 2011).

Muslim *et al.* (2021), ao avaliar o módulo de elasticidade da placa de concreto (E_{pcc}), que representa a rigidez do concreto deduzida a partir dos dados das bacias de deflexão do FWD usando modelos de elasticidade, observou que quando o E_{pcc} está alto, a placa de concreto está apoiada (gradiente negativo) e possui menor deflexão no centro. Por outro lado, quando o E_{pcc} se encontra baixo, a placa não possui apoio no centro (gradiente positivo), maior deflexão. Dessa forma, afirmando que o E_{pcc} é diretamente afetado pelo encurvamento térmico. Em outras palavras, o E_{pcc} diminui ao longo do dia conforme o gradiente térmico muda de negativo para positivo.

Visto isso, as informações derivadas do FWD podem sofrer distorções dependendo da condição térmica da coleta (seja pela temperatura ou pelo horário coletado). Durante o verão de tarde o LTE produz resultados artificialmente altos (juntas travadas), E_{pcc} e k artificialmente baixos (placas encurvadas). Porém, durante o inverno o LTE apresenta resultados muito baixos (juntas baixas) e E_{pcc} e k altos (em locais com tendências de congelamento) (Muslim, 2021).

O estudo realizado por Vandebossche (2007) constata que a ação da temperatura tem ação diferente para a transferência de carga em pavimentos que possuem barras de transferência e os que não possuem. Pavimentos que possuem barras de transferência não apresentam grandes variações no LTE com a variação térmica. Por outro lado, pavimentos que não possuem barras de transferência sofrem divergência

na coleta dos dados de deflexão devido ao encurvamento térmico (variação de temperatura entre topo e base), afetando a distribuição de tensão e a rigidez a parente.

Dessa forma, recomenda-se que, para pavimentos sem barras de transferência, deve-se aplicar correções ou reavaliações dos dados coletados antes de classificar o LTE, sempre coletar a temperatura superficial (ou, preferencialmente, topo, meio e base) do pavimento, correlacionar com as condições climáticas, registrar o horário da coleta, comparar com outros métodos (como o teste de ondas de rádio - GPR – *Ground Penetrating Radar*), considerar o LTE como parcialmente inválido se o gradiente térmico for muito elevado e realizar a campanha em um horário com temperaturas mais amenas para avaliar as principais diferenças.

3. METODOLOGIA

Este método caracteriza-se como uma pesquisa explicativa aplicada, fundamentada no acompanhamento de campo da execução de um trecho subdividido em 12 seções de pavimentos de concreto de cimento Portland com aproximadamente 120 m de extensão e 6,33 m de largura. As seções foram reforçadas com diferentes materiais (macrofibra polimérica e metálica, microfibra polimérica, armadura simples e dupla) e distintas composições (variação nos tamanhos de placas) de modo a avaliar diferentes cenários de aplicação dessa tecnologia em meio urbano, localizado na área externa da PUC-Campinas. O estudo envolve o monitoramento contínuo e a aplicação de métodos de análise para avaliar o desempenho funcional dos pavimentos.

A seção estudada corresponde a um trecho de pista localizada na área externa da PUC-Campinas, portão 3, Av. Dr. Caio Pinto Guimarães, Figura 11. A execução ocorreu durante o evento 1º Simpósio de Pavimento de Concreto Reforçado (SIMPAVCON), com a concretagem da pista com início às 9 h e término às 22 h no dia 05 de junho de 2024.

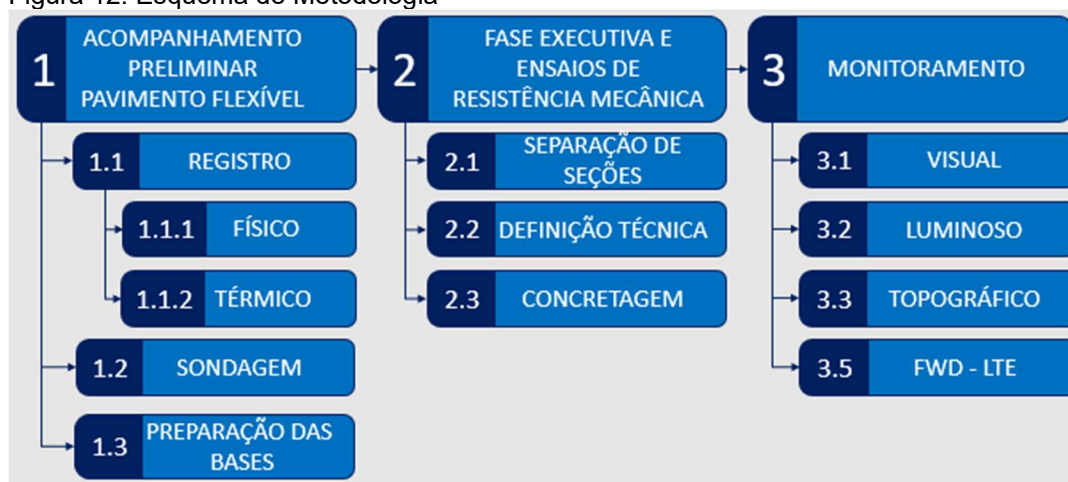
Figura 11: Trecho de pista PUC-Campinas



Fonte: Google Earth - 22°50'10"S; 47°02'48"W, 2024

O desenvolvimento do trabalho seguiu o esquema metodológico ilustrado na Figura 12, que sintetiza as etapas de execução, monitoramento e análise do estudo:

Figura 12: Esquema de Metodologia



Fonte: Autoria própria, 2025

3.1. Acompanhamento Preliminar Pavimento Flexível

3.1.1. Registro

A seção, inicialmente revestida por uma camada de asfalto, encontrava-se em péssimo estado de conservação apresentando diversos defeitos com graus de severidade variados. O local é composto por uma área com vegetação lateral e sem construções circundantes.

O trecho possui baixa iluminação durante a noite, com alguns postes obstruídos pela vegetação. Possui grande área sombreada e poucos pontos com incidência direta e constante de iluminação solar.

Para avaliar as mudanças provenientes da substituição do pavimento, foram realizados os registros visuais e térmicos.

3.1.1.1. Visuais do estado físico

Para identificação dos defeitos presentes no trecho de asfalto foi utilizado uma câmera de smartphone para registro e nomeado conforme DNIT-TER 005/2003 para identificação das irregularidades.

De acordo com o DNIT-TER 005/2003, o trecho é caracterizado com defeitos diversos, tais como: buracos, remendos superficiais localizados, fissuras longitudinais, fissuras interligadas tipo couro de jacaré, remendos profundos (costuras/remendos retangulares) e desgastes em quase toda extensão do trecho.

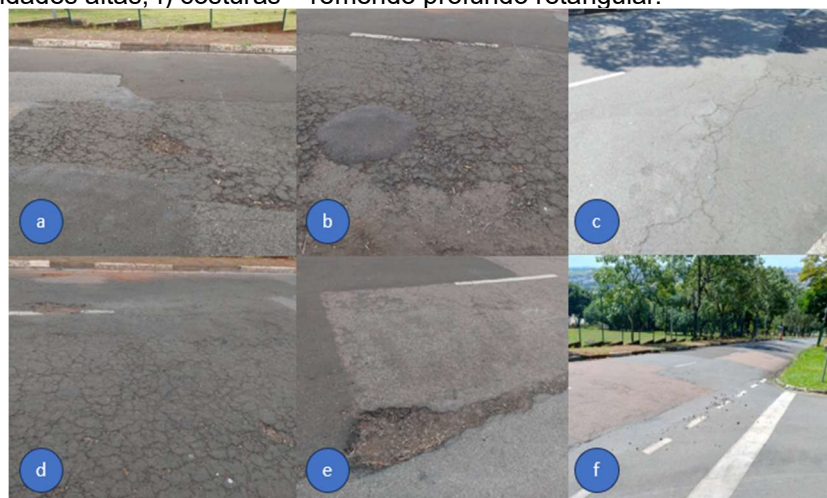
Devido ao curto prazo de observação até a remoção do pavimento, não foi realizado o Índice de Gravidade Global (IGG) – DNIT-PRO 006/2003 - ou Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) – DNIT-IPR 720/2006. Portanto, não foi possível mensurar analiticamente o estado do pavimento. Contudo, os defeitos estavam presentes em toda sua extensão, composto principalmente por remendos retangulares, fissuras longitudinais e fissuras tipo couro de jacaré.

De acordo com o DNIT-IPR 720/2006 – Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, quando há “defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão”, o pavimento é classificado em “péssimo estado de conservação”. Nessa condição, torna-se necessária a execução de intervenções de restauração, que podem envolver tanto a superfície quanto as demais camadas estruturais, a fim de recuperar a funcionalidade e prolongar a vida útil da via.

A severidade dos defeitos variava entre baixa, média e alta (determinada pelas normas do DNIT), conforme Figura 13. As mais graves e profundas estavam localizadas próximo a sarjeta, enquanto as superficiais e grande parte dos remendos, se concentravam no centro da pista.

Não foram identificados deformações plásticas, afundamentos, escorregamentos, ondulações e trincas isoladas na extensão do trecho estudado.

Figura 13: Defeitos do trecho de pavimento asfáltico: a) buraco de severidade leve; b) remendo superficial localizado; c) fissuras longitudinais; d) fissuras interligadas tipos couros de jacaré; e) buracos de severidades altas; f) costuras – remendo profundo retangular.



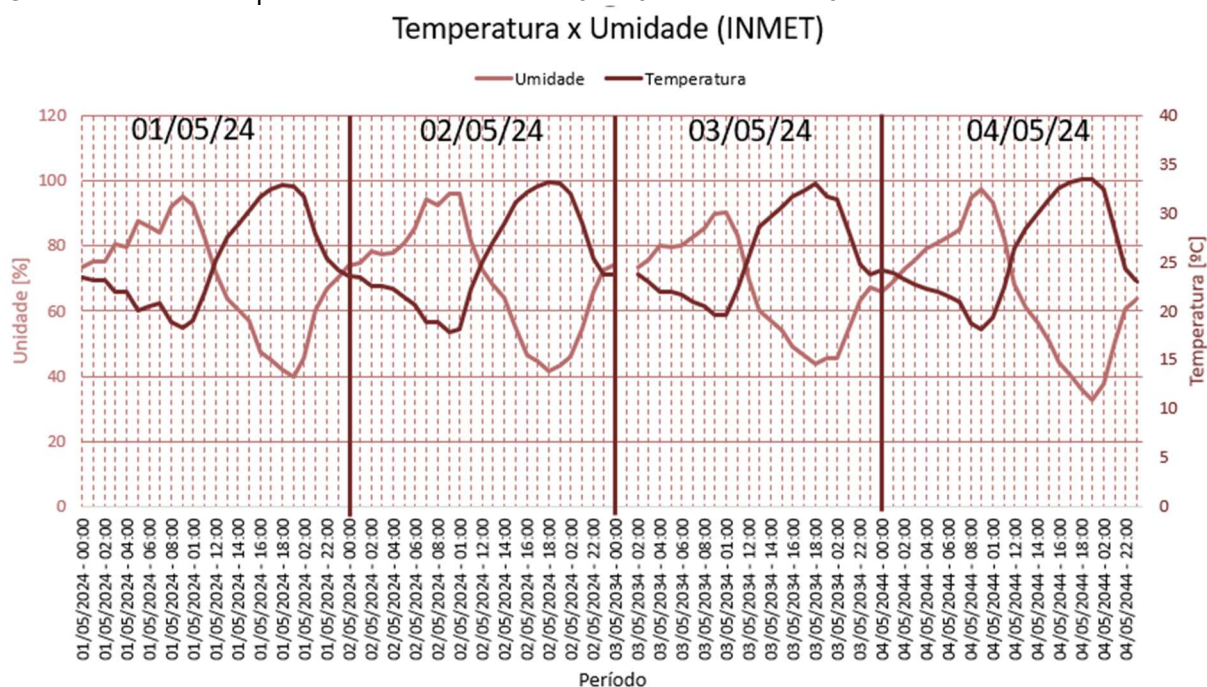
Fonte: Autoria própria, 2024

3.1.1.2. Conforto térmico

Trata-se de uma metodologia adaptada de Avila (2018), a qual, dentre os 120 m de extensão do pavimento asfáltico existente foram subdivididos em trechos de 6 m de extensão (Figura 14).

Foram coletados os valores de temperatura e umidade por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para avaliar a variação térmica da região no período da coleta. Não houve precipitação nos três dias que antecederam a coleta, padrão necessário para que haja uma estabilidade dos dados. Nos quatro dias analisados, a máxima foi de 33 °C e a mínima foi de 18 °C, conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2: Dados temperatura e umidade do dia 01 a 04 de maio de 2024



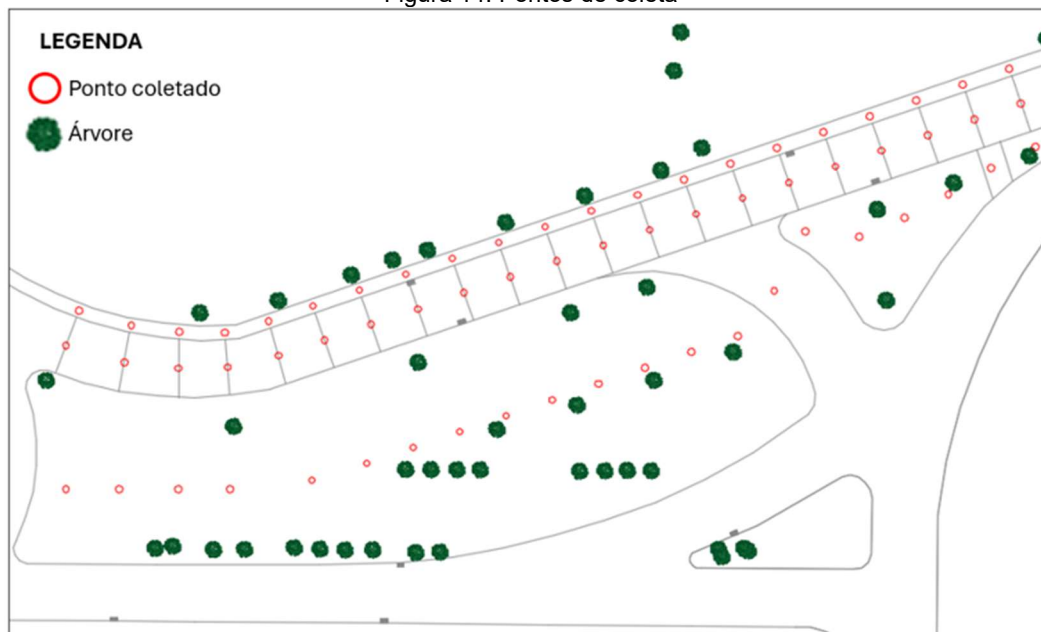
Fonte: INMET, 2025

A coleta de temperatura foi realizada no centro da calçada, na pista e no canteiro central (Figura 14). Foi utilizado uma câmera térmica (Fluke Ti110). A câmera foi posicionada a uma altura de 90 cm da superfície. Para evitar grandes variações, foi considerado um intervalo máximo de 30 minutos para a coleta de dados nos 126 pontos.

A coleta dos dados referente ao pavimento asfáltico foi realizada no dia 4 de maio de 2024 (outono), nos horários de 5 h, 9 h, 15 h, 18 h e 21 h com objetivo de obter

dados referente a menor temperatura superficial, início do aquecimento, ápice de aquecimento, início do resfriamento e resfriamento total, respectivamente.

Figura 14: Pontos de coleta



Fonte: Autoria própria, 2024

Durante o período de coleta, também foram feitas observações referentes às condições climáticas locais, à quantidade de veículos que transitaram pelo trecho e ao tempo de duração de cada coleta, Tabela 9.

Tabela 9: Observações de dados da coleta de temperatura da primeira campanha

Período	Temperatura Ambiente [°C]	Quantidade de Veículos	Início da coleta	Fim da coleta	Tempo de coleta
05:00	20	-	05:11	05:26	00:15
09:00	26	7	09:02	09:20	00:18
15:00	33	15	15:00	15:17	00:17
18:00	32	1	18:00	18:18	00:18
21:00	29	9	20:58	21:16	00:18

Fonte: Autoria própria, 2024

A primeira coleta, realizada às 5 h, foi utilizada como referência para identificar as variações de temperatura superficial ao longo do dia. Este horário marca o início do aquecimento do pavimento, com a incidência dos primeiros raios solares.

A segunda coleta realizada às 9 h, teve como objetivo avaliar a primeira variação térmica sofrida pelas superfícies com um período de aquecimento de quatro horas com um baixo nível de irradiação solar. O horário das 15 h representa o pico de

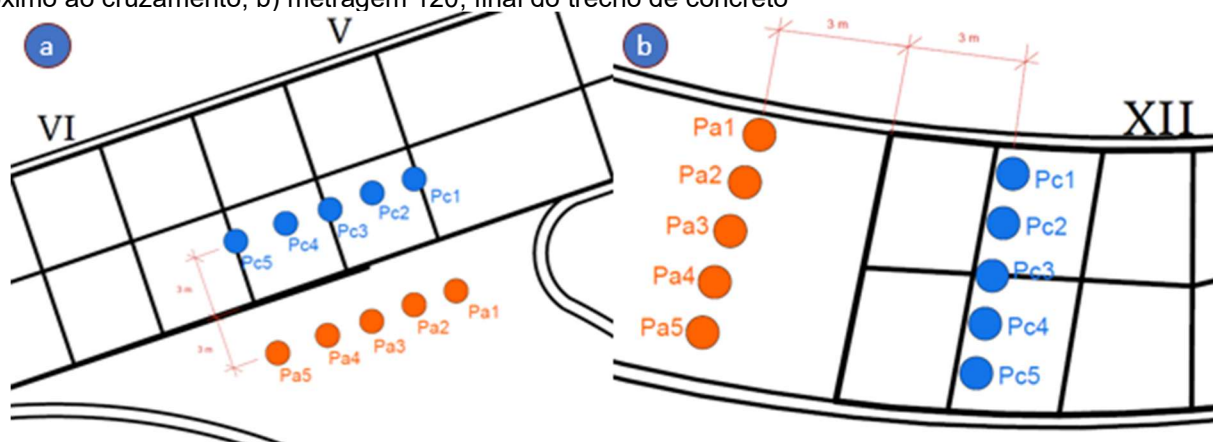
aquecimento superficial do pavimento. Às 18 h refere-se ao início do resfriamento e às 21 h, o resfriamento total.

Após coleta, os dados obtidos foram inseridos em uma planilha Excel e sintetizados em um *dashboard* interativo em Power BI para análise.

No dia 07 de fevereiro de 2026, foi realizada uma nova campanha (conjunto de coletas realizadas em um determinado período) para comparar a temperatura superficial do pavimento de concreto com o pavimento asfáltico nos pontos determinados com radiação solar direta (seção V e seção XII).

Foram coletadas temperaturas em uma região equidistante a 3 m, 6 pontos, entre os limites entre os pavimentos de concreto e asfalto às 15 h (período de temperatura superficial máxima), conforme Figura 15. Dessa forma, por meio da média, desvio padrão e razão das médias, obteve-se a taxa de variação térmica em porcentagem entre as superfícies.

Figura 15: Pontos de coletas de refletância entre o concreto e o asfalto, sendo: a) metragem 46, próximo ao cruzamento; b) metragem 120, final do trecho de concreto



Fonte: Autoria própria, 2026

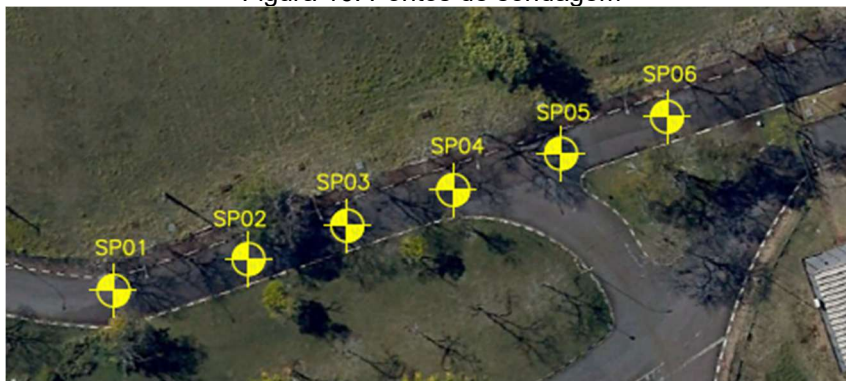
Foi realizado a coleta em um período chuvoso, com temperatura mínima média de 18 °C e máxima média de 27 °C entre os dias 05 de fevereiro a 07 de fevereiro de 2026, com precipitação média durante este período na região de Campinas de aproximadamente 40 mm (IAC, 2026).

3.1.2. Sondagem

A sondagem teve como objetivo determinar a espessura e composição das camadas, tipo de solo e nível do lençol freático. Os relatórios de sondagem estão apresentados no Anexo A.

A sondagem foi realizada no dia 06 de maio de 2024, com a coleta de seis perfurações posicionadas a uma distância média de 20,70 m entre si, (Figura 16). Para a execução, foi utilizado um peso padrão de 65 kg, em queda livre de 75 cm e perfuração até 45 cm de profundidade.

Figura 16: Pontos de sondagem



Fonte: Autoria própria, 2024

Foram utilizados tubos de revestimento de 6,35 cm de diâmetro interno e amostrador-padrão (NBR 6484:2020) de 5,08 cm de diâmetro externo e 3,49 cm de diâmetro interno.

Além disso, se fez necessário o uso de tripé, barrilete, sonda rotativa (haste de perfuração), bomba de água, barriletes amostradores, coroas, luvas alargadoras (calibradores) e tubo de revestimento (Figura 17), conforme DNER-PRO-102/97. Na mesma figura (c e d), observa-se o perfil do solo resultante da sondagem.

Figura 17: Sondagem – sendo, a e b) coleta do SPT e equipamentos utilizados; c e d) camadas observadas após a coleta da amostra



Fonte: Autoria própria, 2024

No relatório final de sondagem são apresentados os valores indicados nas seções do subsolo. Após a coleta de dados, observou-se que, nas regiões mais danificadas, o revestimento asfalto apresentava uma espessura de 1,8 cm, (Figura 18).

Figura 18: Espessura camada de asfalto



Fonte: Autoria própria, 2024

Não foi encontrado nível d'água nos pontos coletados. As camadas foram determinadas como asfalto, sub-base de brita e rachão. O primeiro e segundo ponto foram determinados como solos silte argilo-arenoso e os demais foram classificados como um solo argila silte arenosa, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19: Resultado das sondagens, sendo a) SP01; b) SP02; c) SP03; d) SP04; e) SP05; f) SP06



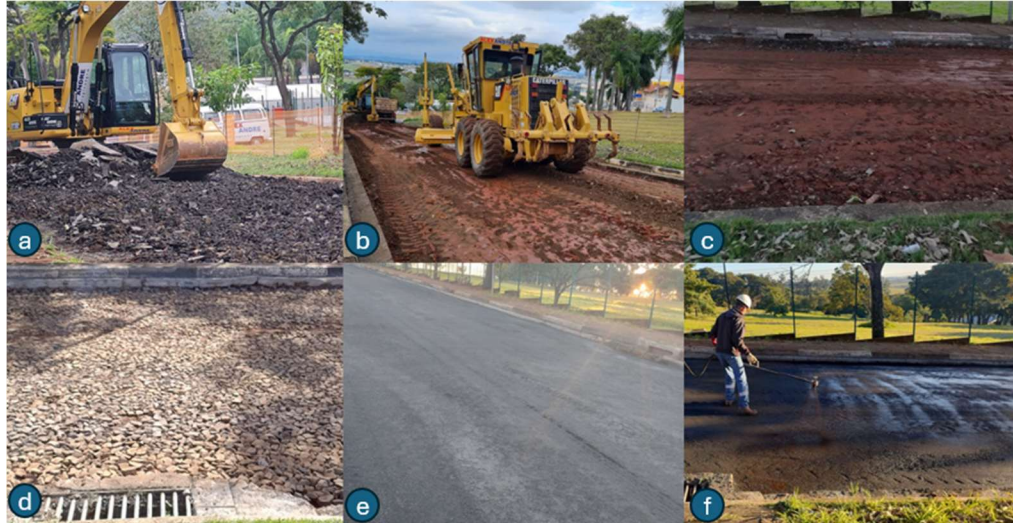
Fonte: Autoria própria, 2024

3.1.3. Preparação Das Bases

A preparação das bases foi realizada no dia 28 dia maio de 2024 e finalizada dia 01 de julho de 2024. Grande parte das estruturas do pavimento asfáltico foi reaproveitada. Contudo, a adequação envolveu a remoção do pavimento flexível existe com o uso de uma retroescavadeira, nivelamento da base com trator com pá niveladora, aplicação e espalhamento de agregado graúdo para primeira camada e miúdo para segunda, aplicação de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) e, por fim, compactação com uso de um pé de carneiro, Figura 20.

Nas duas primeiras seções, a camada de CBUQ foi executada com 2 cm adicionais de espessura, de modo a permitir que a camada de concreto tivesse 10 cm de espessura.

Figura 20: Adequação da base, sendo: a) remoção da superfície asfáltica; b) nivelamento; c) compactação; d) agregado graúdo; e) agregado miúdo compactado; f) pintura das seções I e II para identificação.



Fonte: Autoria própria, 2024

Foram mantidos as sarjetas e o sistema de drenagem por boca de lobo. Para isso, foi utilizado um cortador de disco TS 800 para realizar o corte em toda extensão dos lados direito e esquerdo da pista, Figura 21.

Figura 21: Cortador e sarjeta



Fonte: Autoria própria, 2024

3.2. Fase Executiva e Ensaio de Resistência Mecânica

A preparação das bases foi realizada dois dias antes da execução. Toda a pista teste foi executada em um único dia. A liberação da via ocorreu após um período de sete dias, necessário para que o concreto atingisse aproximadamente 80% da resistência final.

Por se tratar de um trecho experimental, não foram aplicadas barras de transferência em todas as juntas das placas. O intuito é avaliar a capacidade de transferência de carga com a adição de macrofibras poliméricas e metálicas no concreto, em trechos de vias urbanas de tráfego leve, dispensando o uso das barras de transferência para esses cenários.

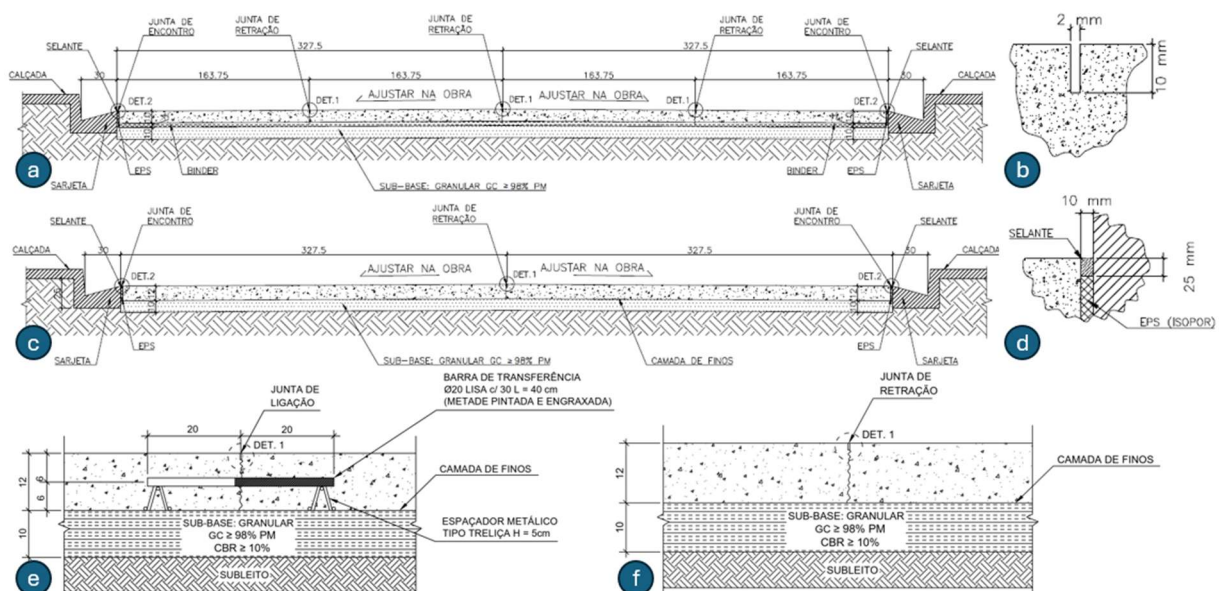
Além disso, todas as placas possuem microfibras polimérica para atuar contra a formação de fissuras de retração por secagem no período de cura do concreto.

3.2.1. Separação das Seções

As seções e as placas não possuem as mesmas dimensões. São compostas por trechos de concreto armado simples ou duplo, concreto reforçado com fibra metálica ou polimérica, conforme Figura 23 e Tabela 10.

Nas duas primeiras seções, a estrutura é composta por uma camada de 2 cm de CBUQ e 10 cm de concreto. Nas demais seções, a espessura total do concreto foi de 12 cm de espessura. O corte transversal das seções é ilustrado pela Figura 22.

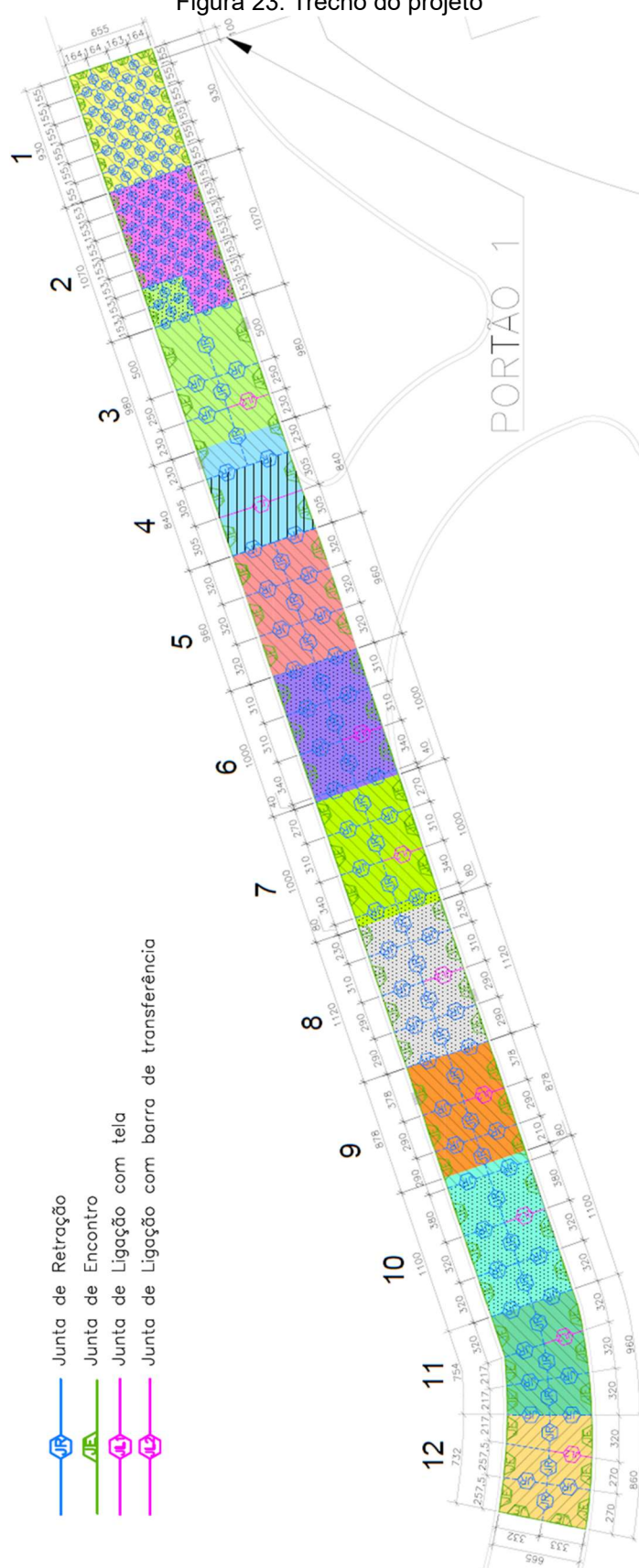
Figura 22: Detalhamento das seções, sendo: a) corte das seções I e II; b) detalhamento das juntas de retração; c) vista em corte das demais seções; d) detalhamento das juntas de encontro; e) detalhamento em corte das barras de transferência; f) detalhamento em corte das juntas de retração.



Fonte: Evolução Engenharia, 2024.

SISTEMA DE INFRAESTRUTURA URBANA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

Figura 23: Trecho do projeto



Fonte: Evolução Engenharia, 2024

Tabela 10: Detalhamento de seções

Seção	Comprimento (m)	Volume (m³)	Composição	Juntas
I	9,30	6,09	Camada de concreto com 10 cm e asfalto com 2 cm de espessura; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de polipropileno ancorada (5,0 kg/m³) e microfibra de poliamida (1,0 kg/m³)	- Retração - Encontro
II	10,70	6,00	Camada de concreto com 10 cm e asfalto com 2 cm de espessura; Concreto armado com tela de aço superior (Q138) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro
III	9,80	8,91	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto armado com tela de aço superior (Q138) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na segunda junta
IV	8,40	6,60	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto armado com tela de aço superior (Q138), inferior (Q196) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Ligação com tela no centro das duas placas
V	9,60	7,55	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de aço ancorada (20 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro
VI	10,00	7,86	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de polipropileno ancorada (4,0 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na segunda junta
VII	10,00	7,86	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de polipropileno ancorada (4,0 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na segunda junta
VIII	11,2	8,80	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de aço ancorada (20 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na segunda junta

IX	8,78	6,90	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de polipropileno ancorada (4,0 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na primeira junta
X	11,00	8,65	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de polipropileno ancorada (4,0 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na primeira junta
XI	9,60	6,42	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra - macrofibra de polipropileno ancorada (4,0 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na primeira junta
XII	8,60	6,22	Superfície de concreto com espessura de 12 cm; Concreto reforçado com fibra – macrofibra de polipropileno ancorada (4,0 kg/m³) e microfibra de polipropileno (0,6 kg/m³)	- Retração - Encontro - Barra de transferência na primeira junta

Fonte: Evolução Engenharia, 2024

As barras de transferência e telas de aço estão especificadas na Tabela 11:

Tabela 11: Especificação de telas e barras metálicas	
Reforços	Especificação
Barra de transferência de aço	CA25 – lisa Ø20mm – 40cm
	Espaçador metálico – H 5cm
	CA60 – Q138
Telas de aço	CA60 – Q196
	Espaçador metálico – H 6cm
	Espaçador metálico – H 9cm
	Espaçador metálico W – H 3cm

Fonte: Evolução Engenharia, 2024

3.2.2. Definição Técnica

As especificações do projeto para concretagem adotadas neste estudo estão apresentadas no Quadro 1, que reúne os materiais empregados e seus parâmetros técnicos e de desempenho.

Quadro 1: Especificação de materiais

Concreto	fck ≥ 35 MPa	
	fctm,k ≥ 4,5 MPa	
	Eci: entre 25 GPa e 28 GPa	
	Cimento CPV RS: consumo entre 350 e 380 kg/m³	
	Abatimento: Classe de consistência S100**	
	Teor de argamassa seca: entre 48% e 53%	
	Relação a/c: 0,50	
Fibras	Reforço Principal: macrofibra sintética ou metálica	
	Reforço Secundário: microfibra sintética	
Aço	Telas	CA60: Q138 e Q196
Selantes	Silicone, polímeros, mastique asfáltico ou híbrido de asfalto e polímero	
(*) Quantidade a ser validada com base nas Resistências Residuais, conforme ABNT NBR 16938.		
(**) Slump já com adição de fibras		

Fonte: Autoria própria, 2024.

Foi utilizado para o dimensionamento da espessura do concreto a prática recomendada ABNT PR 1011. Para o cálculo, foram considerados: placas 3,2 m por 3,2 m, espessura de 12 cm, sub-base granular com 10 cm de espessura, k_{sistema} de 0,05 N/mm², veículos categoria IV e V, eixo tipo duplo (170 kN/eixo) – ABNT NBR 6120:2019; f_{ck} de 35 MPa, $f_{ctm,k}$ (resistência a característica à tração na flexão do concreto) de 4,5 MPa, f_{R1} de 1,8 MPa, f_{R4} de 1,8 MPa.

3.2.3. Concretagem

Nas duas primeiras seções (seção I e II) foi aplicado uma nata de cimento sobre a superfície betuminosa para garantir a aderência entre a superfície e o concreto. Para a execução da segunda seção composta por armadura simples, foram posicionadas treliças no sentido longitudinal à pista de forma equidistantes para o apoio das telas. As armaduras foram posicionadas sobre as treliças e a camada de concreto foi distribuída uniformemente. A Figura 24 ilustra toda fase de execução da camada dessas seções.

Figura 24: Etapa concretagem seção I e II, sendo: a) destaque para execução da seção I e II; b) aplicação de nata de cimento; c) bombeamento do concreto da seção I; d) nivelamento da seção I; e) posicionamento das armaduras da seção II; f) bombeamento do concreto seção II; g) nivelamento seção II; h) trecho seção I e II finalizado.



Fonte: Autoria Própria

Foi realizado o ensaio do concreto em seu estado fresco (slump) para determinar a trabalhabilidade do concreto, considerando as especificações do DNER-ME 404/2000 e ABNT NBR 8953:2015 (Figura 25). Ao ser aprovado no ensaio, o caminhão se deslocava até o local da concretagem. O resultado foi avaliado conforme NBR 8953:2015, Tabela 12.

Figura 25: Ensaios de ar incorporado e grau de abatimento, sendo: a) início do ensaio de slump, b) aferição do ensaio de slump.



Fonte: Autoria própria

Tabela 12: Adensamento do concreto

Classe	Abatimento	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrífugo
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e elementos de fundação
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos com alta densidade de armadura

Fonte: Adaptada NBR 8953, 2015.

O preenchimento dos corpos de prova foi realizado utilizando o procedimento prescrito na ABNT PR 5738:2016, Figura 26, Tabela 13 ocorreu a céu aberto e permaneceram no local por um período de cinco dias. A quantidade de corpos de prova, os ensaios e respectivas normas, estão apresentadas na e Tabela 13.

Figura 26: Corpos de prova in loco, sendo: a) CP 15x15x55 e 10x10x40, b) CP Ø10x20



Fonte: Autoria própria

Tabela 13: Detalhamento de corpos de prova

CP	Quantidade	Descrição	Norma
Ø10x20	36	Cilindro convencional para ensaio resistência à compressão axial	NBR-5739
15x15x55	27	Prisma para o ensaio de resistência à tração na flexão - limite de proporcionalidade e resistências residuais	NBR-16940
10x10x40	36	Prisma para ensaio de resistência à tração na flexão	NBR-12142

Fonte: Autoria própria

No concreto da seção V ocorreu o fenômeno de formação de ouriço (aglomerado de fibras provenientes do processo de mistura e lançamento do concreto pelo caminhão betoneira). Os ouriços visíveis foram descartados e a execução da

concretagem prosseguiu. Na Figura 27 são ilustradas macro, microfibras e ouriços formados na mistura do concreto reforçado com fibra.

Figura 27: Fibras, sendo: a) microfibra polimérica, b e c) macrofibras poliméricas, d) macrofibras metálicas, e) composição macrofibra polimérica e concreto, f) composição macrofibra metálica e concreto, g) formação de ouriço, h) fibras metálicas desmanchadas do ouriço.



Fonte: Autoria própria, 2024

Para o concreto armado na seção III, com armadura simples, primeiramente foram posicionadas treliças no sentido longitudinal da via para evitar o contato das telas metálicas com o solo, Figura 28. Após o posicionamento, foram alocadas as telas de CA-Q138 e, por fim, deu-se início ao processo de concretagem com concreto reforçado com microfibra polimérica.

Na seção IV, composto por concreto reforçado com armadura dupla, iniciou-se com o posicionamento de espaçadores metálicos W com altura de 3 cm para evitar o contato da tela com o solo. Colocou-se a primeira tela de CA-Q196 e sobre ela posicionou-se treliças espaçadoras, alocou-se a segunda tela de CA-Q138 e, por fim, foi aplicado o concreto, Figura 28.

Figura 28: Concreto armado: posicionamento de armaduras (simples e dupla)



Fonte: Autoria própria, 2024

Foram posicionadas as barras de transferência nas seções conforme especificado anteriormente na Figura 23. As barras são compostas por duas treliças de sustentação interligadas por barras de transferências com revestimento epóxi lubrificante em apenas uma das metades das barras e foi posicionada no sentido transversal da via, conforme Figura 29.

Figura 29: Barras de transferência, sendo: a) barras de transferência, b) posicionamento das barras, c) barra posicionada



Fonte: Autoria própria, 2024

O processo de concretagem para todos os traços consiste no isolamento das sarjetas com barras de isopor de 1 cm de espessura, espalhamento manual do concreto com uso de enxadas e utilização de um vibrador manual a diesel para assentamento. Para o nivelamento inicial foi utilizado colherim (colher de pedreiro), régua desempenadeira e desempenadeira vibratória, com aplicação de cura intermediária e espalhamento com rodo nivelador, Figura 30.

Figura 30: Processo de concretagem, sendo: a) bombeamento do concreto, b) posicionamento dos isopores, c) vibração da mistura, d) nivelamento, e) aplicação de cura intermediária, f) segundo nivelamento



Fonte: Autoria própria

Após a aplicação da cura intermediária, foi realizado o nivelamento da superfície com duas alisadoras de concreto, uma de 122 cm e outra de 91 cm de diâmetro. Em seguida, foram utilizadas vassouras tipo gari piaçava para aplicar a textura, Figura 31.

Figura 31: Acabamento, sendo: a) nivelamento inicial com alisadora circular seção I, b) nivelamento inicial com alisadora circular seção II, c) segundo nivelamento com alisadora circular, d) aplicação de textura com vassourões, e) texturização, f) texturização finalizada seção I e II.



Fonte: Autoria própria

Os agentes de cura utilizados foram: para cura intermediária o Encoril Compact Pro e para cura final o Encoril Traffic, Figura 32. O concreto recém-lançado perde água

rapidamente por evaporação, especialmente em pavimentos expostos ao sol e vento. A cura intermediária tem esse importante papel, de impermeabilizar o pavimento.

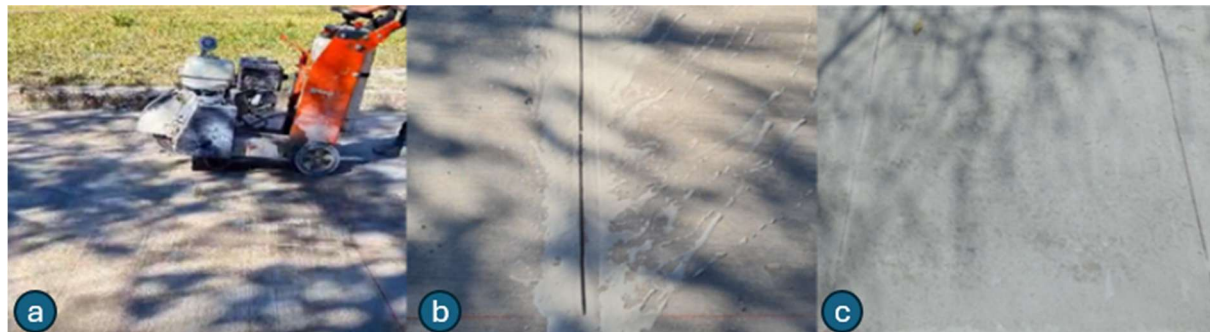
Figura 32: Agentes de curas aplicados, sendo: a) cura intermediária, b) cura final



Fonte: Autoria própria, 2024

Após 24 h, foi realizada a execução dos cortes das juntas de retração, com 2 mm de espessura e 3 cm de profundidade. Para isso, a demarcação foi feita previamente com giz vermelho, conforme o projeto, e os cortes foram executados com o cortador de piso modelo FS 400, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33: Juntas de retração, sendo: a) serra para abertura das juntas, b) abertura das juntas seguindo as marcações, c) abertura das juntas finalizadas



Fonte: Autoria própria, 2024

Uma lona plástica preta foi colocada sobre o pavimento, por um período de sete dias e molhada diariamente por um período de sete dias para garantir a cura do concreto e evitar efeitos de retração plástica, Figura 34.

Figura 34: Processo de cura com utilização de lona e hidratação manual



Fonte: Autoria própria, 2024

Por fim, foi realizado a selagem de algumas juntas. Foram removidos os isopores das juntas próximas às sarjetas, aplicado um delimitador de profundidade de polipropileno e aplicado poliuretano (PU) para selagem, conforme Figura 35.

Figura 35: Selagem das juntas, sendo: a) delimitador de profundidade, b) aplicação do delimitador, c) aplicação de PU nas sarjetas, d) aplicação de PU nas juntas entre placas.

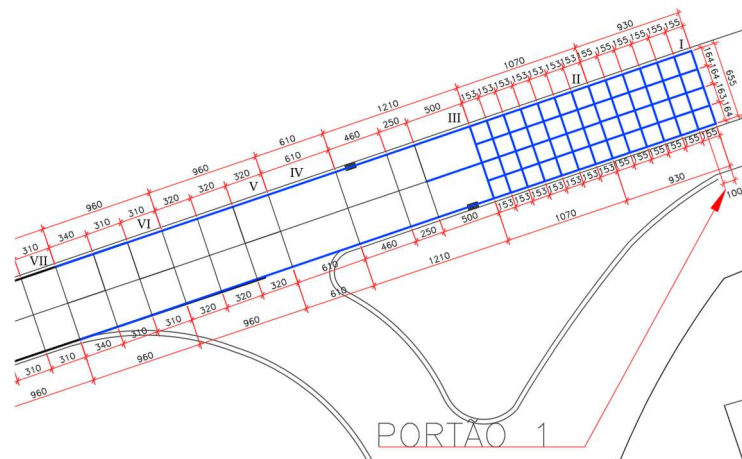


Fonte: Autoria própria, 2024

Inicialmente, a selagem não foi aplicada em todas as juntas para avaliar diferentes cenários. No dia 14 de setembro de 2024 foi aplicado selante em todas as juntas até a seção II e apenas nas sarjetas até a seção VI. As demais seções não possuem selagem, conforme ilustrado em azul no mapa, Figura 36. Foi definido este critério de execução para avaliar os efeitos da ausência de selante neste trecho urbano com tráfego leve.

Em novembro de 2025, todas as juntas entre as placas foram seladas para evitar propagação de defeitos e acúmulo de finos. Contudo, as juntas entre o pavimento e as sarjetas permaneceram sem selagem da seção VI em diante.

Figura 36: Seções com selagem, setembro 2024



Fonte: Autoria própria, 2024

3.3. Monitoramento

Foram aplicados diferentes métodos de monitoramento para avaliar as seções e suas respectivas configurações, considerando fatores como uso, intempéries, execução e planejamento do trecho. Entre os procedimentos realizados destacam-se:

- Monitoramento visual - inspeções periódicas para identificação de defeitos superficiais;
- Monitoramento topográfico - medições para detectar variações altimétricas e determinar o degrau entre placas;
- Índice de Condição do Pavimento (ICP) - análise sistemática da condição funcional do pavimento;
- Falling Weight Deflectometer (FWD) - para avaliar a eficiência de transferência de carga (LTE) entre juntas de placas.

3.3.1. Visual

O monitoramento visual do pavimento rígido foi iniciado após os 28 dias de cura do concreto, de sete em sete dias (do dia 15 de junho de 2024 até o dia 06 de julho de 2024), totalizando quatro medições mensais e, posteriormente, realizado sempre no último final de semana de cada mês até o dia 29 de novembro de 2025.

As prescrições seguidas foram da DNIT 061/2004 para identificação dos defeitos (nomenclatura), DNIT 060/2004 para definição do grau de severidade, avaliados pela inspeção objetiva da norma DNIT-TER 062/2004 para avaliação do estado do

pavimento e inspeção subjetiva da norma DNIT-TER 063/2004, conforme descrito no item 2.5.2. da referência bibliográfica.

Cada placa, junta e seção foram observadas, registradas, nomeadas e armazenadas. As imagens foram registradas por meio de uma câmera de smartphone, uma régua transparente de 30 cm, um fissurômetro e uma vara de um metro e meio.

Ao identificar um defeito, posicionou-se a régua próximo para determinar um parâmetro dimensional e realizou-se o registro. Para fissuras, também foi medida a espessura de abertura com o uso de um fissurômetro. Já a verificação dos esborcinamentos foram coletadas as medidas de largura e comprimento com o uso de uma régua acrílica transparente.

Em cada dia coletado foram registradas e anotadas em um mapa todas os defeitos apresentados para avaliar, de forma visual, a evolução dos defeitos, a composição da placa que apresentou maior número de defeitos, ausência ou não das barras de transferência etc.

3.3.2. Luminoso

O registro da luminosidade teve como objetivo avaliar a diferença de refletância e iluminação entre os pavimentos de concreto de cimento Portland e de concreto asfáltico. Para isso, foram realizadas fotografias de cada seção em diferentes ângulos, durante os períodos diurno e noturno, utilizando a câmera de um smartphone.

Foi utilizado um luxímetro digital (LD-550) para medir numericamente a refletância aparente baseada em medições de luminância entre as superfícies de concreto e asfalto. Ressalta-se que, conforme esperado, a superfície clara apresentou valores superiores de refletância em relação à superfície escura, como já observado por Avila (2018) e Carvalho (2012).

Dessa forma, para determinar o percentual de luminância das superfícies, foi utilizado um luxímetro. O sensor foi posicionado para cima, a 60 cm da superfície, para coletar as fontes de iluminação (sol para o dia e iluminação artificial dos postes durante a noite), coletada a densidade de fluxo luminoso (em lux). Em seguida, o sensor foi posicionado para baixo e coletada densidade de fluxo luminoso da superfície estudada (concreto e asfalto).

No período diurno, os dados devem ser coletados próximo ao meio-dia ou em outro horário que não gere sombreamento no ponto da coleta. Preferencialmente, deve-se posicionar na direção do ponto de iluminação para evitar que o corpo gere sombra.

Outro aspecto importante refere-se às medições realizadas no período noturno. Como o foco de iluminação artificial é mais próximo em comparação à luz solar, os pontos devem ser coletados mantendo-se a mesma distância em relação ao poste de iluminação. Assim, os pontos no pavimento de concreto e no asfalto precisam estar posicionados de forma equivalente, tanto na horizontal quanto na vertical, em relação ao foco luminoso (preferencialmente o mesmo poste). Para garantir essa uniformidade, traça-se um raio a partir do poste e as medições são realizadas tangenciando a circunferência definida.

Foram coletados 6 pontos, na mesma distância radial entre os postes no período noturno e de forma arbitrária no período diurno (evitando as regiões sombreadas pela vegetação). Calculou-se a média, o desvio padrão e a refletância média das superfícies por meio da equação 12:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\bar{\theta}_s}{\bar{\theta}_f} * 100 \quad (12)$$

Onde:

$\bar{\rho}_s$: refletância média da superfície (%);

$\bar{\theta}_s$: densidade do fluxo luminoso da superfície;

$\bar{\theta}_f$: densidade do fluxo luminoso da fonte de luz;

Como parâmetro de referência, utilizou-se a Tabela 14 de Couto (2019) que apresenta de forma resumida os intervalos de absorvância dos principais materiais da construção civil. Para este estudo, foram considerados apenas os valores correspondentes ao concreto e ao asfalto. A partir da Equação 13 proposta por Pereira *et al.* (2015), é possível determinar a refletância dos materiais, fornecendo um parâmetro comparativo para as medições realizadas, visto que não foi empregado o equipamento ideal para este tipo de análise.

$$\alpha = 1 - \rho \quad (13)$$

Sendo:

α : absorvância solar;

ρ : refletância solar;

Tabela 14: Absorvância e Refletância para radiação solar a temperaturas comuns

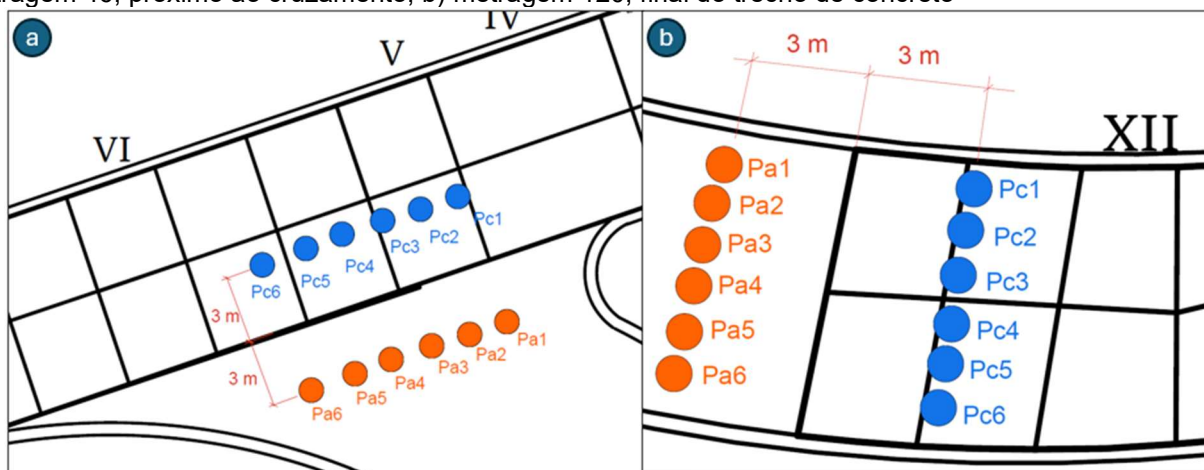
Tipo de superfície	α (Absorvância)	ρ (Refletância)
Concreto aparente	0,65~0,80	0,35~0,20
Revestimento asfáltico	0,85~0,98	0,15~0,02

Fonte: Adaptado Couto (2019)

Além dos dados mencionados, é importante registrar a distância entre o poste e o ponto de coleta, a altura do poste, as condições climáticas e o horário da coleta.

A coleta foi realizada em 21 de março de 2026, nos horários de 12h30 e 19h30. Foram coletados seis pontos em ambos os períodos, sendo que no período diurno, foram coletados os pontos de luminância nos pontos da seção V e XII que tangenciam o pavimento asfáltico em uma distância de 3 m entre o encontro das superfícies, conforme Figura 37.

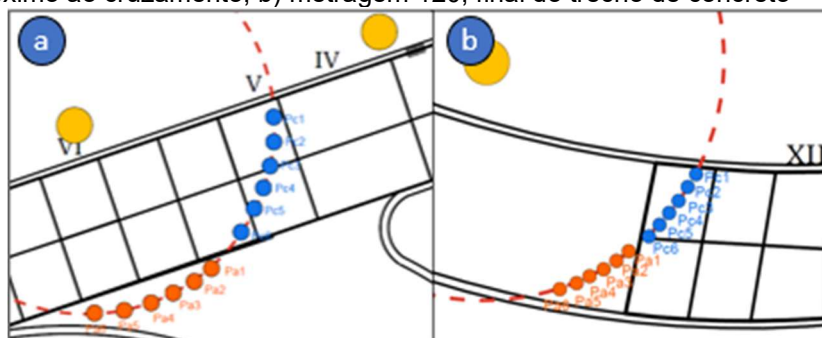
Figura 37: Pontos de coletas de refletância diurna entre o concreto e o asfalto, sendo: a) metragem 46, próximo ao cruzamento; b) metragem 120, final do trecho de concreto



Fonte: Autoria própria, 2026

No período noturno, a coleta foi realizada a uma distância de 10,5 m em relação ao poste, cuja altura é de 10,43 m. Sendo coletados seis pontos no pavimento de concreto e mais seis pontos no pavimento asfáltico, conforme Figura 38.

Figura 38: Pontos de coletas de refletância noturna entre o concreto e o asfalto, sendo: a) metragem 46, próximo ao cruzamento; b) metragem 120, final do trecho de concreto



Fonte: Autoria própria, 2026

Embora os valores obtidos representem uma refletância aparente baseada em medições de iluminância, abordagens experimentais em campo que utilizam a razão entre radiação incidente e refletida são amplamente empregadas na literatura para avaliação de superfícies (ASTM E1918, 2006; Akabari & Levinson, 2007; Zhu *et al.*, 2024). Nessas condições, quando as medições são realizadas sob geometrias e condições de iluminação equivalentes, os resultados mostram-se adequados para análises comparativas, uma vez que erros sistemáticos tendem a afetar igualmente as superfícies avaliadas.

Vale ressaltar que, de forma comparativa, os pontos foram coletados no mesmo horário de modo que não houvesse mudança na incidência solar durante o dia, mesma orientação e posição do sensor em todos os pontos, mesma altura do sensor e a superfície em todos os pontos, as superfícies estavam com a mesma condição (secos) e durante a noite a coleta teve a mesma distância em relação a fonte luminosa.

3.3.3. Índice de Condição do Pavimento (ICP)

Para definir o ICP, foram utilizados RSP MK-IV e perfilômetros inerciais a laser equipados em picape, Figura 39. O veículo percorreu, por duas vezes, cada via em uma velocidade média de 25 km/h, os dados foram compilados em uma planilha Excel e avaliado conforme Tabela 7.

Figura 39: RSP MK-IV e perfilômetros inerciais, sendo: a) sensor de nível nas rodas para avaliar do veículo, b) sensores para escaneamento, c) escâner, d) passagem do veículo na pista para coleta dos dados



Fonte: Autoria própria, 2024

3.3.4. Topográfico

Foram realizadas duas etapas de medições topográficas. A primeira coleta foi realizada uma semana após a concretagem para avaliar as movimentações altimétricas das placas após a liberação da via. A segunda coleta foi realizada quatro meses depois, para avaliar possíveis recalques da sub-base devido aos meses de uso. Os resultados foram avaliados conforme os parâmetros de desnível entre placas estabelecidos pela FHWA (2014) e o DNIT 60:2004 descritos no item 3.5.1 desse documento.

Em ambas as medições, os valores altimétricos foram obtidos por meio de estação total, referenciados ao sistema geodésico SIRGAS 2000. Ressalta-se que não foram consideradas informações referentes a latitude e longitude.

Foram considerados as diferenças altimétricas entre as juntas no sentido da via, para avaliar o escalonamento (desnível) das juntas durante esses períodos. Também foi elaborado um mapa de monitoramento, destacando exclusivamente os pontos que ultrapassaram as delimitações de escalonamento estabelecidas pela FHWA e ao DNIT (item 2.5.1.), correspondentes aos casos em que os valores apresentaram grau de severidade médio ou alto.

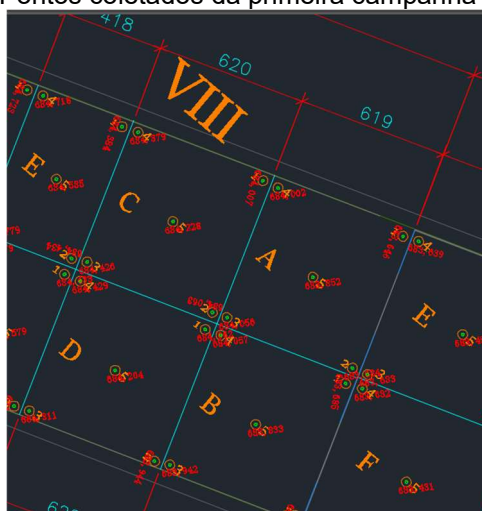
3.3.4.1. Avaliação altimétrica uma semana após liberação de uso da pista

A coleta das medidas altimétricas foi iniciada após os sete dias de cura, com início em 12 de junho de 2024, seguidas nos dias 19, 26 e 03 de julho de 2024. Foram coletados 550 pontos por campanha. Porém, para avaliar o desnível entre placas, foi considerado apenas os pontos coletados entre juntas, totalizando 440 pontos.

Os resultados foram plotados em um arquivo em DWG contemplando os dados e as divisões das placas. Com a informação do DWG, os dados foram planilhados em Excel para determinar a diferença de nível em cada ponto e sintetizado em um modelo visual em Power BI para avaliar a evolução de cada coleta.

A partir da divisão por seção em algarismos romanos e blocos em letras maiúsculas, foram determinados cinco pontos em algarismos arábicos, de forma a traçar uma nomenclatura única para cada bloco. Por exemplo: Bloco VIII-A-3. Dessa forma, foi realizada a coleta dos dados referente a altitude nos cantos e no centro das placas, Figura 40.

Figura 40: Pontos coletados da primeira campanha (Seção VIII)



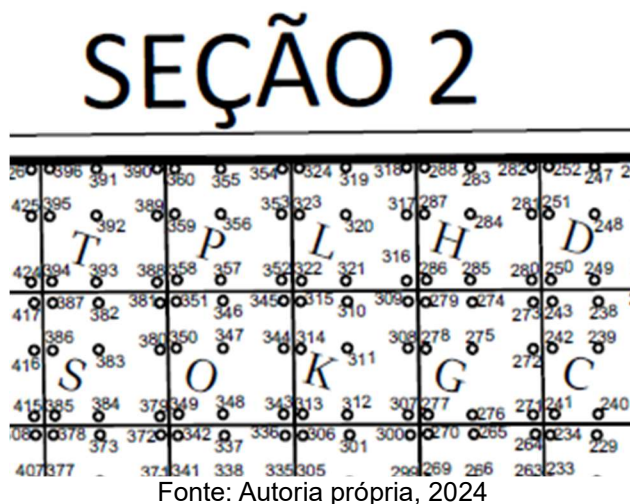
Fonte: Autoria própria, 2024

3.3.4.2. Avaliação altimétrica após quatro meses de tráfego

Para a avaliação altimétrica após quatro meses de uso do pavimento, foram coletados mais pontos por placa, a fim de obter um mapeamento altimétrico mais detalhado, com início das medições em 22 de novembro de 2024 sempre no mesmo horário. Cada campanha de coleta totalizou 1.170 pontos, dos quais 854 estavam localizados em divisas de juntas.

Para este monitoramento, foram adicionados mais pontos na malha por placas, Figura 41. Os resultados são fornecidos em DWG e Excel, e sintetizado para um modelo visual em Power BI.

Figura 41: Pontos coletados da segunda campanha (Seção II)



3.3.5. *Falling White Deflectometer (FWD)*

A medição foi realizada no dia 13 de janeiro de 2026 em dois períodos. No primeiro, realizado a partir das 10 h da manhã com temperatura média do ar de 24 °C e temperatura superficial do pavimento de 31 °C, foram coletadas as deflexões das duas faixas das seções III à XII. A segunda coleta ocorreu às 14 h com temperatura atmosférica de 31 °C e temperatura superficial de 43 °C, contemplando as quatro fileiras de placas das seções I e II.

Ressalta-se que os dias 12 e 13 de janeiro de 2026 foram caracterizados por instabilidade climática. Nesse período, de acordo com IAC (2026), ocorreu uma precipitação acumulada média de 36 mm. Essa condição pode proporcionar saturação do solo e variação dos dados coletados.

Foi utilizando o deflectômetro de impacto modelo TBTTWD-NJ-M, tipo trailer composto por um disco circular de 30 cm de diâmetro e sete geofones, conforme Figura 42.

Figura 42: Equipamento FWD, sendo: a) equipamento FWD; b) disco e geofones/sismógrafos



Fonte: Autoria própria, 2025

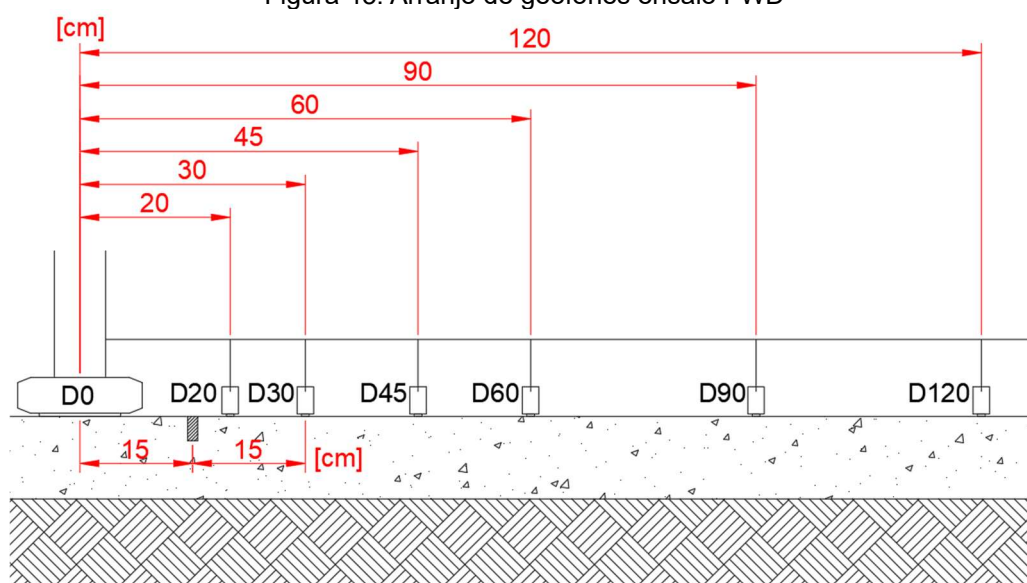
Para o ensaio de impacto não destrutivo, foi aplicado uma carga de 40 kN. Foram aplicados dois impactos, sendo o primeiro para assentamento dos pratos e sensores, e o segundo para coleta.

O equipamento coleta, por meio dos sismógrafos, a deflexão do pavimento provocada pela carga aplicada entre distâncias de 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm, registra a temperatura do solo e a posição geográfica de cada ponto coletado por meio de *Global Position System* (GPS).

O sismógrafo posicionado a 0 cm do disco registra a deflexão máxima provocada pela aplicação da carga, enquanto os demais equipamentos coletam as deflexões correspondentes à ação dessa mesma carga em diferentes pontos. Como o objetivo é avaliar a transferência de carga entre placas adjacentes, é fundamental que a distância entre o sismógrafo e a junta, bem como a distância entre a carga aplicada e a junta, sejam equivalentes. Dessa forma, garante-se a uniformidade das medições e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Visto isso, para este estudo, o disco foi posicionado a uma distância de 15 cm da junta e os geofones posicionados de forma que o D30 ficasse igualmente a uma distância de 15 cm da junta, conforme Figura 43.

Figura 43: Arranjo de geofones ensaio FWD



Fonte: Autoria própria, 2026

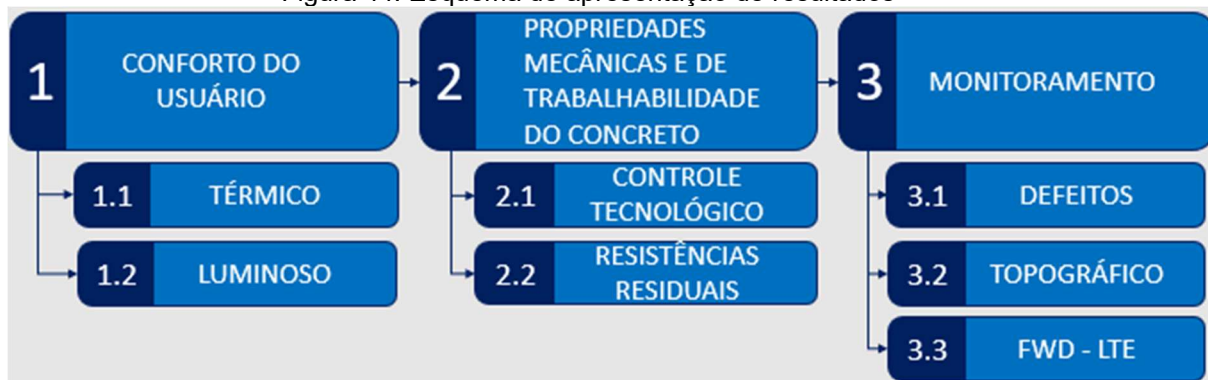
A carga é elevada a uma altura de aproximadamente 15 cm e liberada em queda livre para determinar a deflexão da placa ensaiada. O defletoômetro D30 registrou a deflexão correspondente na placa vizinha, enquanto o defletoômetro D0 captou a deflexão máxima diretamente sob a carga aplicada. A partir da razão entre a deflexão medida pelo D30 e aquela registrada pelo D0, obteve-se o *Load Transfer Efficiency* (LTE), conforme estabelecido pela norma DNER-PRO-273/96.

Os valores de eficiência de transferência de carga (LTE) são avaliados conforme FHWA (2014), Tabela 8. Dessa forma, foi possível comparar a eficiência das fibras quanto a capacidade de transferência de carga com as barras de transferência em pavimentos pavimento urbano de concreto com baixa espessura e tráfego leve.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 44 ilustra os resultados que serão discutidos.

Figura 44: Esquema de apresentação de resultados



Fonte: Autoria própria, 2025

4.1. Parâmetros Funcionais

4.1.1. Térmico

A presença de vegetação no local provoca uma variação térmica não uniforme devido ao sombreamento em diferentes horas do dia (APÊNDICE A – Tabelas I a III). Dessa forma, a irradiação solar incide de maneira parcial na maior parte do trecho. No entanto, na marca de 120 m, a exposição é constante, resultando em um resfriamento mais lento.

Aos 120 m, o asfalto alcançou as temperaturas mais elevadas dentre todas as medições, com valor máximo de 53 °C às 15 h. A superfície apresentou um rápido aquecimento entre as 5 h e 15 h, variando 27,8 °C em um período de 10 h. O resfriamento total foi às 21 h, com valor de 30,3 °C, apresentando um resfriamento gradual de 22,7 °C em um período de 6 h nessa região. A temperatura média dessa superfície, na metragem de 120 m foi de 36,88 °C, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: Variação térmica do asfalto pela extensão e período de coleta [°C]

Extensão	05:00	09:00	15:00	18:00	21:00	Δ
0	23,50	41,30	41,30	33,60	29,00	17,8
6	22,30	39,70	35,70	30,50	26,70	17,4
12	23,00	32,40	37,40	31,40	26,90	14,4
18	22,80	40,10	43,30	31,30	28,00	20,5
24	21,80	31,10	48,90	33,20	28,00	27,1
30	22,40	40,00	50,40	32,80	28,00	28,0
36	22,00	39,20	37,00	30,40	27,00	17,2
42	20,40	38,50	32,00	27,90	25,00	18,1
48	20,30	40,80	36,00	28,40	24,00	20,5
54	19,90	30,60	36,80	27,50	23,20	16,9
60	20,30	25,60	31,30	27,30	23,00	11,0
66	20,20	29,70	32,70	26,80	23,30	12,5
72	20,40	29,80	31,30	26,20	23,40	10,9
78	20,00	27,90	30,20	25,50	23,20	10,2
84	19,90	30,50	37,50	26,80	22,80	17,6
90	19,60	25,20	35,30	26,70	22,60	15,7
96	20,90	28,10	39,80	28,10	24,50	18,9
102	21,00	31,80	40,80	29,20	25,10	19,8
108	19,60	32,30	47,40	30,20	23,40	27,8
114	21,80	26,80	51,10	33,30	27,40	29,3
120	25,20	40,00	53,00	35,90	30,30	27,8

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao observar a variação térmica da calçada, nota-se que as maiores temperaturas também ocorrem aos 120 m de extensão. Porém a temperatura máxima alcançada às 15 h foi de 47,4 °C, 5,6 °C menor que a temperatura máxima do asfalto, mesmo apresentado uma coloração cinza escura. Seu aquecimento foi próximo ao observado no asfalto, sendo um aquecimento de 24,7 °C e um resfriamento de 20,3 °C.

Nota-se que a taxa de resfriamento do concreto foi menor que a do asfalto. Isso se deve pela composição de cada material, espessura e coloração, visto que ambos os pontos estavam sob irradiação solar constante. Porém, o impacto causado pelo concreto no meio urbano foi menor em relação ao asfalto por apresentar temperaturas menores, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Variação térmica do concreto pela extensão e período de coleta

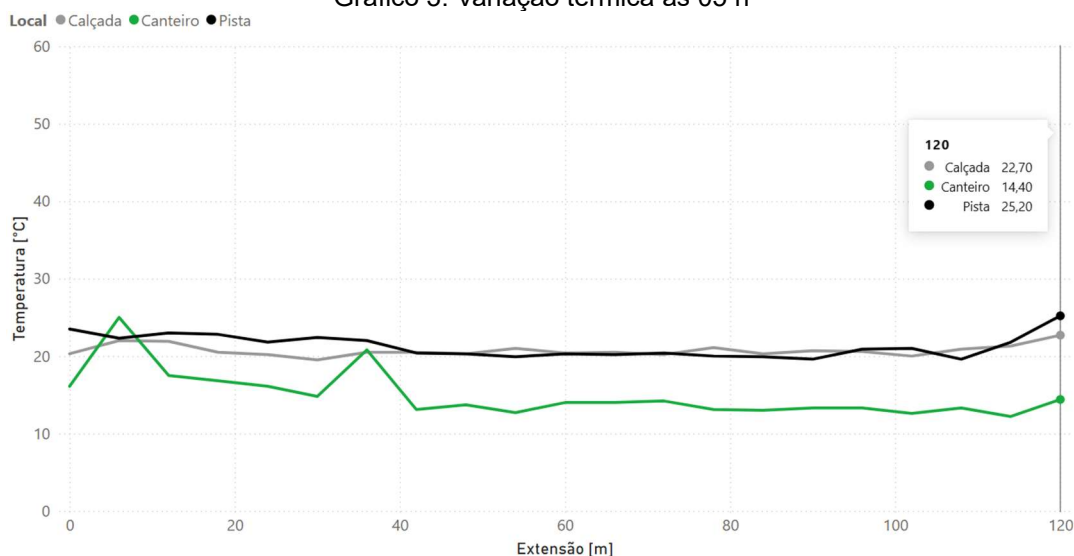
Extensão	05:00	09:00	15:00	18:00	21:00	Δ
0	20,30	24,00	37,00	29,70	25,30	16,7
6	22,00	25,20	41,60	29,90	27,10	19,6
12	21,90	25,90	42,10	28,90	26,60	20,2
18	20,50	25,00	43,00	31,20	26,20	22,5
24	20,20	24,70	35,10	28,20	24,70	14,9
30	19,50	23,80	34,20	29,50	25,50	14,7
36	20,50	33,50	29,50	28,10	25,10	13,0
42	20,50	25,60	31,90	27,80	24,50	11,4
48	20,30	24,20	33,00	28,10	24,20	12,7
54	21,00	28,10	38,00	30,00	25,50	17,0
60	20,40	24,40	34,90	29,60	25,00	14,5
66	20,50	24,30	34,40	29,40	25,10	13,9
72	20,20	24,70	30,50	26,80	24,10	10,3
78	21,10	24,50	30,10	26,00	24,50	9,0
84	20,30	23,70	39,50	29,80	25,00	19,2
90	20,70	24,10	37,80	29,60	24,60	17,1
96	20,60	26,50	40,40	30,00	25,00	19,8
102	20,00	24,50	37,90	28,40	23,90	17,9
108	20,90	25,20	41,30	31,30	25,80	20,4
114	21,30	27,90	45,40	31,80	24,50	24,1
120	22,70	37,50	47,40	33,40	27,10	24,7

Fonte: Autoria própria, 2024.

A taxa de aquecimento e resfriamento da temperatura, sabidamente, está relacionada ao albedo (capacidade de uma superfície refletir a radiação solar), tipo de material, espessura da estrutura, composição, influências externas, clima local, vegetação, sombreamento, ações do vento etc. É notável que a escolha de superfícies mais claras somadas ao sombreamento vegetal promove ambientes urbanos mais frescos, como observado por Avila (2018).

Ao comparar as superfícies de modo geral, nos horários das 05 h e das 21 h, a temperatura do trecho apresentou um comportamento linear, com um único pico registrado no ponto 120 m com 25,2 °C. As médias observadas às 5 h foram de 20,61 °C, 21,16 °C e 15,53 °C na calçada, pista e canteiro Gráfico 3.

Gráfico 3: Variação térmica às 05 h



Fonte: Autoria própria, 2024

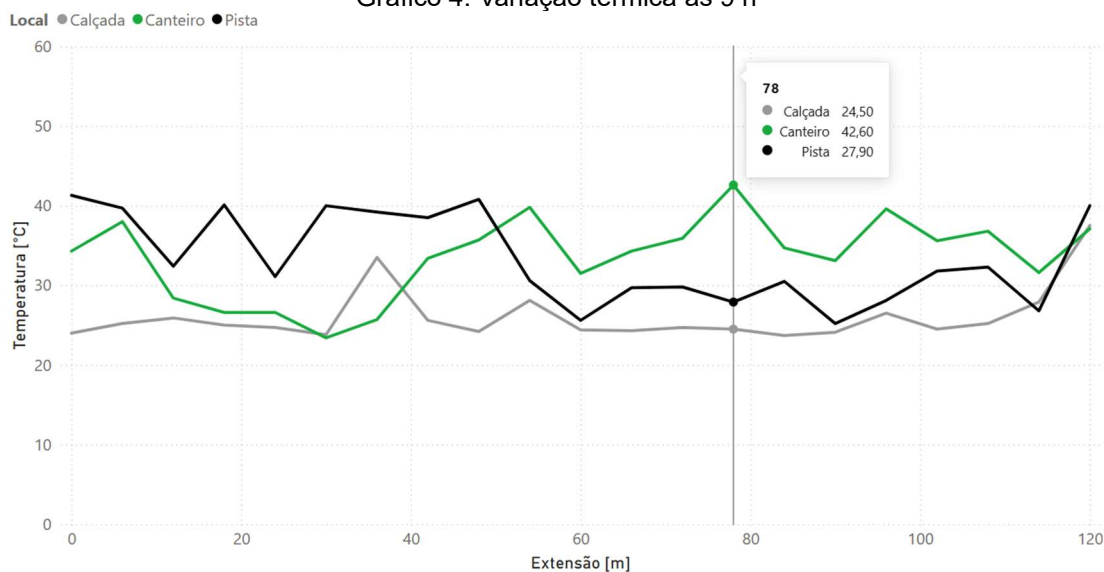
Durante este período foi possível observar que a calçada de concreto e o pavimento de superfície asfáltica apresentam temperaturas similares na grande maioria dos pontos. O canteiro apresentou uma menor temperatura, por ser composto por uma cobertura vegetal.

Durante o período inicial do dia não há incidência de radiação solar; portanto, a temperatura registrada corresponde à condição natural do material em relação ao clima local. Assim, a coleta realizada às 5 h reflete a temperatura das superfícies sem influência direta da irradiação solar ou de outros meios externos, sendo afetada apenas por fatores como o clima local, a temperatura atmosférica e eventuais iluminações artificiais.

Por outro lado, ao observar o comportamento da temperatura às 9 h, foi possível notar que a temperatura superficial entre a pista e a calçada se tornou significativamente distinta devido ao início da ação da radiação solar. Nas metragens onde a incidência de irradiação solar direta foi mais frequente, a temperatura foi expressivamente mais elevada, conforme esperado.

A maior temperatura superficial foi alcançada pelo canteiro, com uma temperatura de 42,6 °C aos 78,0 m. Nesse ponto a radiação solar foi constante, porém no concreto e no asfalto essa região se encontrava sombreada, conforme Gráfico 4.

Gráfico 4: Variação térmica às 9 h



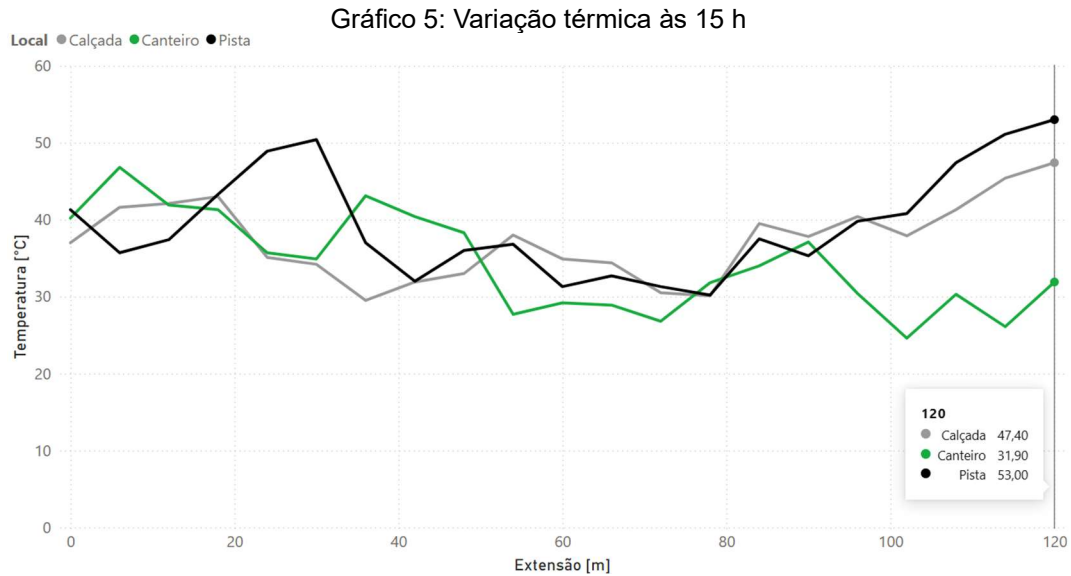
Fonte: Autoria própria, 2024

A maior temperatura registrada na calçada, pista e canteiro foi de 37,5 °C aos 120,0 m, 41,3 °C aos 0,0 m e 42,6 °C aos 78,0 m, respectivamente. Em todos esses pontos houve a irradiação direta durante o período avaliado.

Com o início do aquecimento às 9 h, a calçada apresentou menor variação, cerca de 26% da temperatura inicial pelo fato do trecho estar quase completamente sombreado. A pista apresentou maior variação até os 48,0 m com um aumento de médio de 71% e posteriormente possuiu uma variação de 48%. Por outro lado, o canteiro apresentou um comportamento oposto ao da pista, apresentando uma variação de 94% até os 48,0 m e 171% após os 48,0 m.

A terceira coleta às 15 h, permitiu avaliar a variação térmica durante o período de maior nível de irradiação solar. Conforme esperado, todos os pontos sofreram aumento de temperatura, mesmo aqueles que apresentam regiões sombreadas. Nota-se que as regiões da calçada que antes estavam sombreadas e agora apresentaram irradiação direta sofreram um aumento considerável de temperatura.

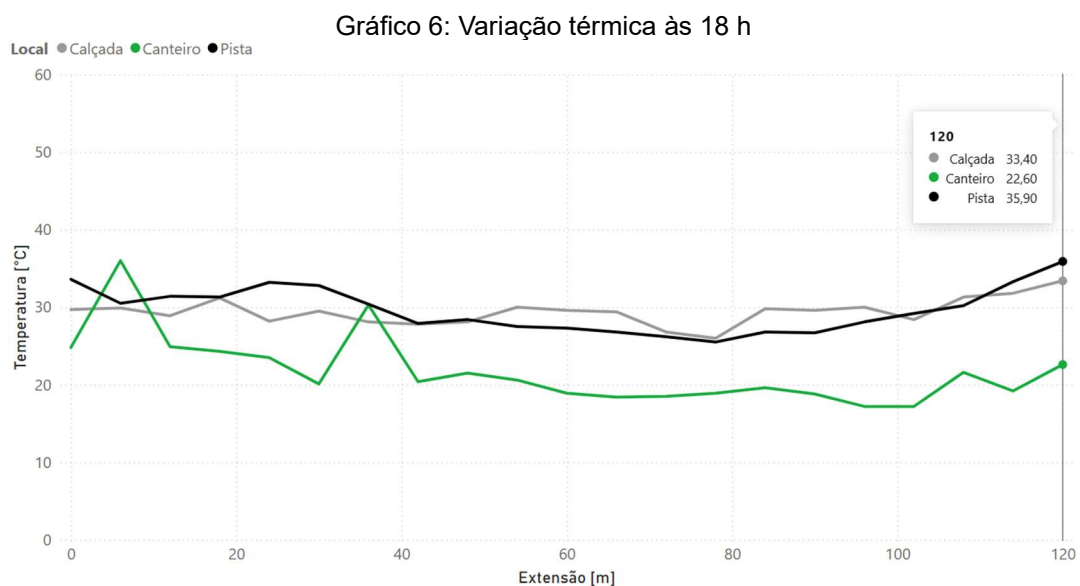
A maior temperatura da calçada, pista e canteiro foi de 47,5 °C aos 120,0 m, 53,0 °C aos 120 m e 41,9 °C aos 12,0 m, respectivamente, conforme Gráfico 5.



Fonte: Autoria própria, 2024

Às 18 h iniciou-se a fase de resfriamento e redução da incidência de raios solares. Dessa forma, foi possível avaliar a variação térmica de resfriamento e a velocidade de perda de calor de cada superfície. Essa característica varia entre materiais, composição da superfície, sombreamento, clima ambiente, condições climáticas e vento.

Observou-se temperaturas máximas de 33,4 °C aos 120,0 m, 35,9 °C aos 120,0 m e 24,9 °C aos 12,0 m na calçada, pista e canteiro, respectivamente, conforme Gráfico 6.

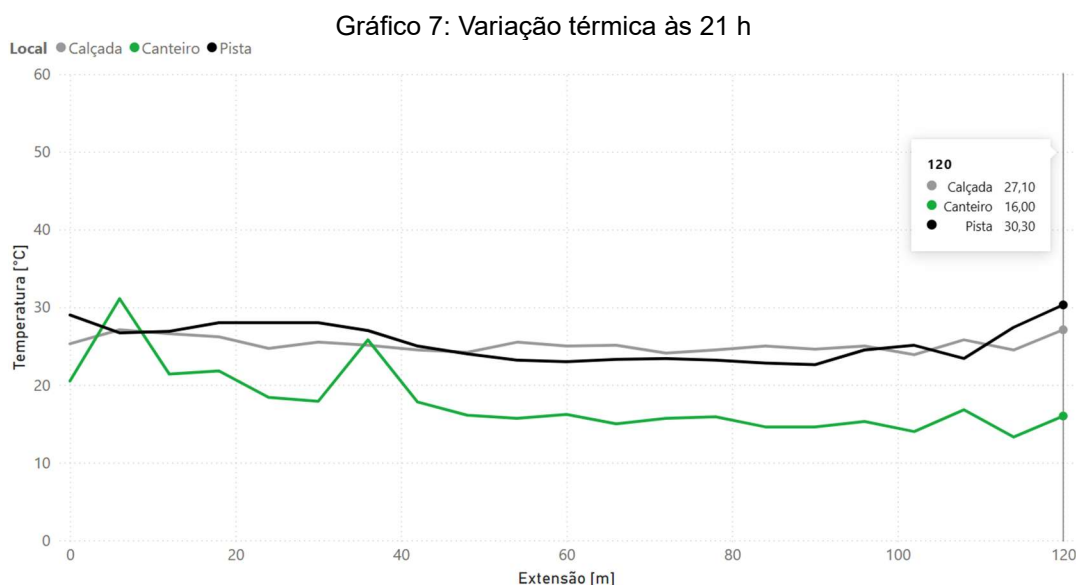


Fonte: Autoria própria, 2024

O início do resfriamento do trecho ocorreu por volta das 18 h, onde todas as superfícies sofreram uma queda de temperatura. Em comparação ao período anterior,

observou-se uma redução de aproximadamente 25% na temperatura da pista, 21% na calçada e 38% no canteiro central

Já às 21 h, houve o resfriamento absoluto das superfícies. A maior temperatura na calçada, pista e canteiro foi de 27,1 °C aos 120,0 m e 6,0 m, 30,3 °C aos 120,0 m, 21,8 °C aos 18,0 m, respectivamente, mantendo uma tendência semelhante a coleta realizada às 05 h, conforme Gráfico 7. As menores temperaturas foram registradas no canteiro, como esperado, por apresentar vegetação.



Com a redução na temperatura, a superfície composta por vegetação apresentou maior índice de resfriamento e o concreto e o asfalto voltaram a apresentar temperaturas próximas na maioria dos pontos.

De modo geral, notou-se que, mesmo com irradiação direta em todo o período diurno, o canteiro revestido por uma superfície de vegetação rasteira apresentou uma grande variação de temperatura no início do aquecimento e uma queda significativa durante o período de resfriamento, apresentando uma taxa de resfriamento superior às variações apresentadas tanto no asfalto quanto no concreto. Este comportamento também é observado no estudo de Avila (2018).

O asfalto apresentou uma taxa de aquecimento muito elevada, alcançando um pico de 53 °C, enquanto o concreto apresentou uma temperatura máxima de 47 °C. Por outro lado, durante o período de resfriamento, o asfalto apresentou uma taxa de redução maior em relação ao concreto durante o período de resfriamento inicial,

mesmo a calçada apresentando grandes trechos sombreados. Durante o resfriamento final, a taxa de variação do concreto foi maior que a do asfalto.

Ao comparar os dois pontos cuja metragem possui radiação constante (aos 120 m), a temperatura do concreto, às 21 h, era de 27 °C e o asfalto com 30 °C. Foi possível observar que a variação média entre o concreto e o asfalto neste ponto foi de aproximadamente 3 °C durante todos os períodos avaliados.

O asfalto alcança temperaturas mais elevadas devido ao seu baixo albedo, ou seja, absorve mais calor. Por outro lado, a superfície de concreto da calçada, mesmo apresentando a coloração cinza escuro, absorveu menos calor durante o período de irradiação. Dessa forma, apresentando uma temperatura superficial menor que a do asfalto.

Conforme mencionado nos itens 3.5 e 3.6 deste estudo, a temperatura e o gradiente térmico possuem impacto direto no pavimento, podendo afetar diretamente em seu desempenho. O gradiente térmico juntamente com a carga de tráfego provoca desgastes no pavimento que diminuem sua vida útil, provocando fissuras, trilhas de roda em pavimentos asfálticos e afetando diretamente na transferência de carga de pavimentos de concreto.

Mesmo comparando uma superfície de concreto de coloração cinza escura da calçada com uma superfície de coloração preta proveniente do asfalto da pista, nota-se que a superfície de concreto alcança temperaturas mais baixas em comparação ao asfalto. Ao substituir a superfície do pavimento por um concreto de coloração esbranquiçada ou cinza clara, a performance da variação térmica e a temperatura máxima atingida serão ainda melhores, conforme já demonstrado por Carvalho (2012).

Isso é reforçado ao realizar a coleta da segunda campanha, onde os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Coleta térmica comparativa entre concreto e asfalto

Pontos	Seção V		Seção XII	
	Concreto [°C]	Asfalto [°C]	Concreto [°C]	Asfalto [°C]
T1	41,00	44,50	40,10	46,00
T2	41,60	47,10	40,40	45,10
T3	41,80	46,40	40,50	46,20
T4	41,70	46,00	41,00	46,50
T5	41,50	46,20	42,00	45,60
Média	41,52	46,40	40,80	45,88
Desvio Padrão	0,28	0,85	0,67	0,49

Fonte: Autoria própria, 2026

Mesmo a coleta sendo realizada com clima instável e pouco nublado, o pavimento de concreto apresentou uma menor temperatura superficial em comparação pavimento asfáltico, assim como mencionado por Carvalho (2012), alcançando uma temperatura 11% menor, cerca de 5 °C, em comparação ao asfalto no período de maior aquecimento (às 15 h) e em locais com irradiação direta e constante.

Este fato implica em uma região urbana com climas mais frescos, reduzindo consideravelmente a ilha de calor, promovendo uma melhor qualidade de vida para os pedestres.

4.1.2. Luminoso

Conforme esperado, foi possível observar que o pavimento com superfície de concreto apresentou uma melhor refletância no período diurno e uma visibilidade melhor no período noturno devido a coloração esbranquiçada, Figura 45.

Figura 45: Iluminação do trecho, sendo: a) pavimento asfáltico período diurno, b) pavimento de concreto período diurno, c) pavimento asfáltico período noturno, d) pavimento de concreto período noturno.



Fonte: Autoria própria, 2025

Os resultados referentes a refletância dos pavimentos estão apresentados na Tabela 18 e Tabela 19, sendo que o sol apresentou um valor de luminância de 103.000 lux, a refletância do poste na seção V foi de 31 lux e da seção XII foi de 9 lux.

Tabela 18: Refletância dos pavimentos de concreto e asfalto no período diurno

Ponto	Seção V				Seção XII			
	θ_{concreto} [Lux]	ρ_{concreto}	θ_{asfalto} [Lux]	ρ_{asfalto}	θ_{concreto} [Lux]	ρ_{concreto}	θ_{asfalto} [Lux]	ρ_{asfalto}
P01	27.300	27%	11.700	11%	28.100	27%	12.000	12%
P02	27.800	27%	11.500	11%	27.500	27%	12.200	12%
P03	26.500	26%	11.400	11%	29.100	28%	12.300	12%
P04	27.700	27%	11.800	11%	28.200	27%	12.600	12%
P05	28.100	27%	12.000	12%	27.700	27%	12.300	12%
P06	27.600	27%	12.100	12%	27.900	27%	11.800	11%
Média	27.500	27%	11.750	11%	28.083	27%	12.200	12%
Desvio padrão	506,62	4%	250,00	3%	511,26	3%	251,66	4%

Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 19: Refletância dos pavimentos de concreto e asfalto no período noturno

Ponto	Metragem 46				Metragem 120			
	θ_{concreto} [Lux]	ρ_{concreto}	θ_{asfalto} [Lux]	ρ_{asfalto}	θ_{concreto} [Lux]	ρ_{concreto}	θ_{asfalto} [Lux]	ρ_{asfalto}
P01	4	13%	2	6%	1	11%	-	0%
P02	4	13%	1	3%	-	0%	-	0%
P03	4	13%	1	3%	-	0%	-	0%
P04	4	13%	1	3%	-	0%	-	0%
P05	3	10%	1	3%	1	11%	-	0%
P06	4	13%	1	3%	1	11%	-	0%
Média	3,83	12%	1,17	4%	0,50	6%	-	0%
Desvio adrão	0,37	19%	0,37	56%	0,50	6%	-	0%

Fonte: Autoria própria, 2026

Por meio dos resultados apresentados, é possível observar que, no período diurno, o pavimento de concreto apresentou uma refletância média 134% maior em relação ao pavimento asfáltico na primeira na seção V e 130% maior na seção XII.

Já no período noturno, o pavimento de concreto apresentou uma refletância média 229% maior em relação ao pavimento asfáltico na seção V e, pelo fato da fonte de lux ser muito baixa, na seção XII, o asfalto não apresentou refletância, enquanto o concreto apresentou valores muito baixos.

Foi possível observar que o concreto apresentou melhor desempenho em termos de refletância, tanto da luz solar quanto da luz artificial. Essa característica do pavimento de concreto resulta em menor absorção, o que contribui para a formação de ambientes mais frescos, já que há menor absorção de calor durante o período diurno.

No período noturno, a alta refletância proporcionada pela coloração esbranquiçada do concreto favorece ambientes mais claros e visíveis, conforme discutido por Carvalho (2012) e Zhu *et al.* (2024).

4.2. Propriedades Mecânicas e de Trabalhabilidade do Concreto

4.2.1. Controle tecnológico

AABNT NBR 8953/2015 prescreve para a classe S100 (Tabela 12) de consistência no estado fresco, um abatimento no intervalo de 100 a 160 mm para elementos estruturais com lançamento convencional do concreto. Dessa forma, todos os ensaios realizados em cada seção estão em conformidade, Tabela 20.

Também na Tabela 20, são apresentados os valores de resistência à compressão média do concreto nas idades de 7 e 28 dias. Observa-se que, já aos sete dias após a concretagem, o concreto atingiu a resistência mínima exigida em projeto, garantindo o desempenho estrutural previsto.

Tabela 20: Abatimento e resistências mecânicas médias das seções

SEÇÃO	SLUMP (mm)	$f_{c,m}$ [MPa]			$f_{ct,m}$ [MPa]		
		Média 7 dias	Média 28 dias	Desvio Padrão 28 dias	Média 7 dias	Média 28 dias	Desvio Padrão 28 dias
1	100	36,8	46,1	0,57	4,8	7,0	0,69
2	120	34,7	44,45	0,49	6,3	9,0	0,35
3	110	34,5	43,5	0,28	6,3	9,0	0,35
4	120	37,2	46,15	0,49	-	-	-
5	150	34	46,65	0,64	7,0	10,0	1,61
6	150	29,1	37,3	0,85	4,0	6,9	1,46
7	115	35,6	44,6	0,71	4,5	7,7	0,16
8	130	34,7	41,1	0,85	4,2	7,4	0,74
9	140	38,1	48	0,28	7,7	9,6	0,96
10	140	32,8	37,45	0,78	4,4	7,3	1,26
11	120	36,2	45,2	0,42	4,9	6,7	0,30
12	150	36,9	46,1	0,14	5,6	8,0	0,35

Fonte: Autoria própria, 2025

4.2.2. Resistências residuais

Para o cálculo do momento resistente do pavimento de concreto reforçado somente com fibras, foi definido em projeto um valor mínimo de 1,8 MPa para f_{R1} (resistência residual à tração na flexão com CMOD = 0,5 mm) e f_{R4} (resistência residual à tração na flexão com CMOD = 3,5 mm). Na Tabela 21, os valores médios de cada seção são apresentados. Nas seções 2, 3 e 4 foram utilizadas armaduras metálicas, portanto não constam na tabela.

Tabela 21: Resistências residuais dos pavimentos reforçados com fibra (ABNT NBR 16940)

Seção	f_L (MPa)	Desvio Padrão f_L	f_{R1} (MPa)	Desvio Padrão f_{R1}	f_{R4} (MPa)	Desvio Padrão f_{R4}	f_{Fud} (MPa)
1	6,69	0,41	2,49	0,47	1,72	0,30	0,48
5	7,11	0,60	3,06	0,27	1,59	0,27	0,53
6	5,94	0,12	2,70	0,54	2,56	0,63	0,59
7	5,81	0,44	2,26	0,48	1,55	0,54	0,43
8	6,45	0,28	3,11	0,54	2,29	0,24	0,61
9	6,16	0,43	2,30	0,40	2,21	0,46	0,51
10	5,14	0,10	1,92	0,27	1,62	0,49	0,40
11	5,31	0,20	2,16	0,14	1,92	0,25	0,46
12	5,45	0,36	1,65	0,16	1,54	0,43	0,36

Fonte: Autoria própria, 2025

Apesar dos valores individuais, em algumas seções, estarem abaixo do valor estabelecido em projeto, a resistência de cálculo à tração direta prevista em projeto é de $f_{Fud} = 0,40$ MPa. Apenas a seção 12 tem valor médio abaixo do prescrito, porém não apresentou defeitos significativos que comprometam a integridade do pavimento.

4.3. Monitoramento

4.3.1. Defeito

Considerando o primeiro mês de uso do pavimento, o Índice de Condição do Pavimento (ICP) foi classificado como excelente, com valores superiores a 85, Tabela 22.

Tabela 22: ICP do pavimento representado por seção

Faixa	Medidor	Seção inicial	Seção final	ICP	Classe
Direita	Direita	I-A	V-E	98,0	Excelente
Direita	Direita	VI-A	XII-A	92,4	Excelente
Direita	Direita	XII-C	XII-E	98,0	Excelente
Direita	Esquerda	I-B	V-E	98,0	Excelente
Direita	Esquerda	VI-A	XII-A	92,4	Excelente
Direita	Esquerda	XII-C	XII-E	100,0	Excelente
Esquerda	Direita	I-C	V-F	98,0	Excelente
Esquerda	Direita	VI-B	XII-B	86,9	Excelente
Esquerda	Direita	XII-D	XII-F	100,0	Excelente
Esquerda	Esquerda	I-D	V-F	98,0	Excelente
Esquerda	Esquerda	VI-B	XII-B	92,4	Excelente
Esquerda	Esquerda	XII-D	XII-F	98,0	Excelente

Fonte: Autoria própria, 2025

Ao avaliar os defeitos por seção, foi utilizada a ficha adaptada do DNIT 061/2004 – TER (APÊNDICE B), sendo identificado um desnível de junta com grau de severidade alto na seção VI (centro do trecho), denominado como 4-A. Os outros defeitos foram categorizados como desnível de juntas de grau de severidade baixa (4-B) e defeito na selagem das juntas de severidade baixa (5-B).

Apesar desse desempenho inicial, o pavimento continuou sendo monitorado quanto ao surgimento de possíveis defeitos ao longo dos meses.

Inicialmente, o monitoramento foi realizado uma vez por semana até completar um mês de coleta. A partir da avaliação semanal, observou-se:

- 15 de junho de 2024: não foram observados defeitos ou imperfeições na superfície ou juntas.
- 22 de junho de 2024: não foi observado defeitos ou imperfeições na superfície ou juntas.
- 29 de junho de 2024: notou-se uma pequena abertura circular, similar a um pequeno buraco de tamanho inferior a 3 cm de diâmetro (Figura 46a) e início de esborcinamento de algumas juntas (Figura 46b). Vale mencionar também o surgimento de alguns pontos com descascamento superficial devido a vegetação que caiu na superfície do pavimento durante a fase de execução (Figura 46c) e a exposição de fibras metálicas seção VIII foi observada (Figura 46d).
- 06 de julho de 2024: maior número de esborcinamento de juntas, início de corrosão em fibras metálicas expostas, algumas placas com deslocamento visível entre juntas, principalmente nas sarjetas devido à falta de selagem que pode proporcionar passagem de água (Figura 46e) e microfissuras por retração plástica (Figura 46f).

No primeiro mês de observação, a avaliação indicou que o pavimento apresentava boa condição geral. O defeito mais relevante identificado foi o esborcinamento das juntas, que pode comprometer a integridade do sistema. O pequeno buraco mencionado corresponde a um ouriço de fibras localizado na superfície do pavimento, que ficou exposto.

A presença de fibras metálicas expostas é comum nesse tipo de construção; entretanto, observou-se maior atenção às fibras próximas às juntas, já que estas não foram seladas. O processo de corrosão das fibras metálicas pode intensificar o esborcinamento. A principal causa para o agravamento desse defeito foi a ausência de selagem das juntas, associada à ação do tráfego.

Figura 46: Defeitos referentes a coleta semanal, sendo: a) pequeno buraco de 3 cm de diâmetro, b) esborcinamento de junta, c) descascamento superficial do pavimento pela vegetação, d) fibras metálicas expostas, e) desnível de juntas de encontro com a sarjeta, f) microfissura por secagem.

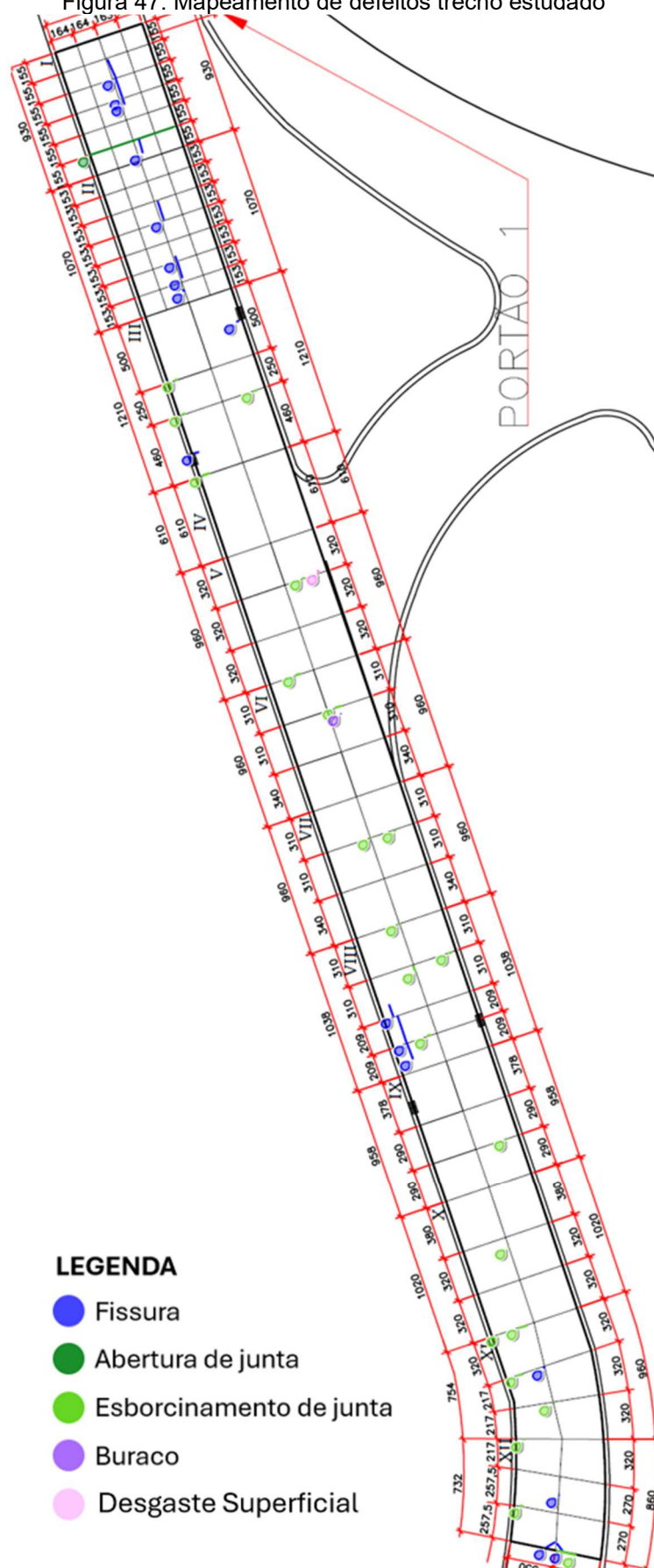


Fonte: Autoria própria, 2024

Como mencionado na metodologia, item 4.3.1, após inspeção semanal, o intervalo das inspeções foi realizado de forma mensal com início no último final de semana de julho de 2024 e término em novembro de 2025. De forma a ilustrar e facilitar o acompanhamento do desenvolvimento dos defeitos, foi elaborado um mapa para acompanhamento.

A Figura 47 representa a visão final dos defeitos observados. De modo geral, não foram apresentados defeitos severos, algumas delas ocorreram por falta de selagem das juntas, principalmente esborcinamentos.

Figura 47: Mapeamento de defeitos trecho estudado



Fonte: Autoria própria, 2025.

Os esborcinamentos de juntas foram observados em todas as seções, sem exceção. As seções I e II não aparecem na Figura 48, pois já haviam sido seladas anteriormente. Conforme mencionado, todo o trecho foi selado em novembro de 2025, com o objetivo de evitar tanto a propagação dos defeitos existentes quanto a formação de novos. Ressalta-se que a causa principal dos esborcinamentos está relacionada à deficiência ou ausência de selagem das juntas, conforme discutido por Kosmatka (2011) e ACI (2007).

Todos os casos de esborcinamento tiveram comprimento inferior à 60 cm, sendo o maior deles localizado na seção XII e possui um comprimento de 30 cm. A maior largura identificada foi de 1,5 cm na seção XII no encontro entre o pavimento de concreto e o asfáltico. Por meio do DNIT 060:2004, o grau de severidade dos esborcinamentos identificados se enquadram como grau de severidade baixo, pois possuem comprimento inferior a 60 cm e largura inferior a 10 cm.

A seção I, composta por concreto reforçado com fibra polimérica e espessura de placa de 10 cm, sem barras de transferência e divisões de placas de 1,65 m por 1,55 m, apresentou fissuras lineares longitudinais e abertura de junta após a selagem, conforme ilustrado na Figura 48.

Figura 48: Mapa de defeitos identificados na seção I



Fonte: Autoria própria, 2025

As fissuras longitudinais identificadas nessa seção iniciam na placa G, com uma abertura inicial de 0,65 mm no dia 30 de maio de 2025, reduzindo para 0,4 mm na última inspeção, Figura 49a. A fissura atravessa a placa vizinha, placa K, com espessura inicial de 0,35 mm e reduz a 0,3 mm, Figura 49b. Por fim, finaliza em um

quarto da placa O com espessura de 0,1 mm do início ao fim da campanha, Figura 49c. Além disso foi identificada uma fissura longitudinal na última coluna de placas (placa W) da seção I com espessura de 0,3 mm, Figura 49d.

Figura 49: Inspeção visual final - fissuras seção I, sendo a) placa G, b) placa K, c) placa O, d) placa W



Fonte: Autoria própria, 2025

De acordo com o DNIT 60:2004, todas as fissuras são classificadas com grau de severidade baixo, pois possuem espessura de abertura inferior a 12 mm sem a presença de degrau entre juntas. Contudo, é importante que esses defeitos sejam monitorados.

Ao observar o caso da abertura da junta, notou-se que houve o deslocamento longitudinal da placa, o que permitiu que houvesse o desprendimento do material selante. O caso foi identificado no dia 30 de maio de 2025, a qual houve o deslocamento de cerca de 2,0 mm de espessura em todas as placas localizadas na penúltima coluna da seção I (placas de Q a T).

Notou-se que as fissuras mencionadas anteriormente e este caso de abertura das juntas ocorreram no mesmo período, 30 de maio de 2025. Sendo possível deduzir que os defeitos apresentados foram provocados pelo mesmo fenômeno.

Na coleta do dia 26 de julho de 2025, a abertura da junta chegou ao seu valor máximo com cerca de 3,0 mm. Porém, no dia 30 de agosto de 2025, a abertura se fechou, quase completamente, com valor de cerca de 0,75 mm, conforme Figura 50.

Figura 50: Abertura de junta seção I, sendo: a) coleta 30 de maio de 2025, b) coleta 26 julho de 2025, c) coleta 30 de agosto de 2025.



Fonte: Autoria própria, 2025

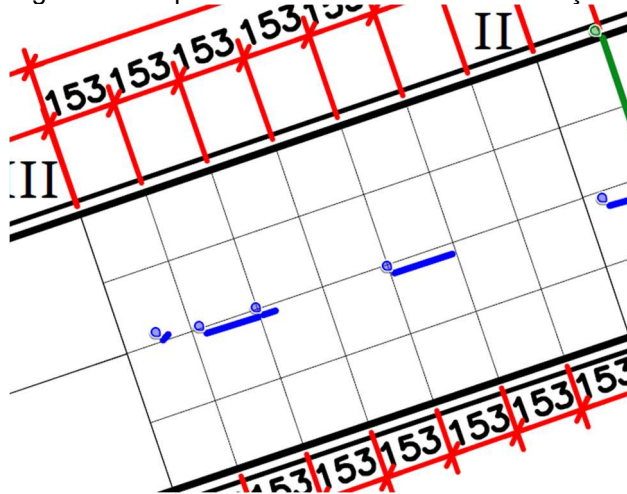
Isso ocorreu devido a dilatação térmica do pavimento, discutido por Subedi *et al.* (2025) e Ransinchung (2020), conforme descrito no item 3.5.1. As movimentações devidas as ações do gradiente térmico ocorrem de forma natural.

O período de coleta ocorreu durante o inverno (início do inverno no dia 20 de junho). Para cada campanha, foi realizada uma avaliação das condições climáticas nos dois dias anteriores à coleta. Na primeira coleta, em 29 de maio, registrou-se precipitação, e no dia 30 de maio a temperatura mínima foi de 8,1 °C. Na segunda coleta, observou-se um aumento das temperaturas: em 26 de julho, a mínima registrada foi de 12,9 °C. Tanto em maio quanto em julho, a umidade relativa do ar manteve-se elevada. Já na última coleta, em 30 de agosto, a menor temperatura registrada foi de 15,8 °C, conforme dados da estação [V0338] Campinas – SP do INMET (2025).

Uma hipótese para a abertura das juntas, singular em toda a extensão do trecho, é que, na seção II, apesar da presença de juntas de controle de fissuração, a armadura contínua faz com que toda a seção se comporte de forma monolítica. A junta mencionada não se localiza exatamente na divisa entre seções, mas sim muito próxima ao trecho armado.

Ao analisar a seção II, verificou-se que os únicos defeitos identificados foram fissuras lineares longitudinais e diagonais (Figura 51). Essa seção apresenta 10 cm de espessura de concreto, é composta por armadura simples, não possui barras de transferência e mantém as mesmas dimensões da seção I.

Figura 51: Mapa de defeitos identificados na seção II



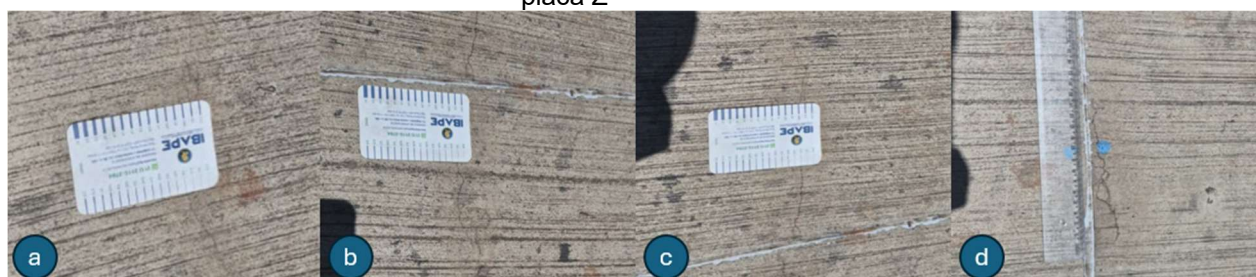
Fonte: Autoria própria, 2025.

As fissuras longitudinais foram observadas na placa K, ao longo de toda a sua extensão, com abertura de 0,2 mm (Figura 52a). Também foram identificadas fissuras em um quarto da placa S, com abertura de 0,05 mm (Figura 52b), e na placa W (vizinha da placa S), onde a fissura se estendeu por quase toda a sua extensão, com abertura de 0,15 mm (Figura 52c).

Em todos esses casos, tanto a espessura da abertura quanto a extensão das fissuras permaneceram constantes durante todo o período da campanha, cujo início de registro ocorreu em 06 de junho de 2025.

Por fim, uma fissura diagonal com ângulo de 45° de uma extensão de 12 cm e espessura de 0,2 mm localizada na placa Z, Figura 52d sendo este defeito foi observado no dia 26 de abril de 2025 e permaneceu com os mesmos parâmetros durante toda campanha.

Figura 52: Inspeção visual final - fissuras seção II, sendo a) placa K, b) placa S, c) placa W, d) placa Z



Fonte: Autoria própria, 2025

Assim como na seção I, as fissuras apresentadas possuem grau de severidade baixo com espessura de abertura inferior a 12 mm conforme definido no DNIT 60:2004.

A seção III, composta por armadura simples e espessura de concreto de 12 cm, foi a única seção que apresentou fissuras lineares transversais, sendo que essas estão localizadas no encontro entre o pavimento e as bocas de lobo, Figura 53.

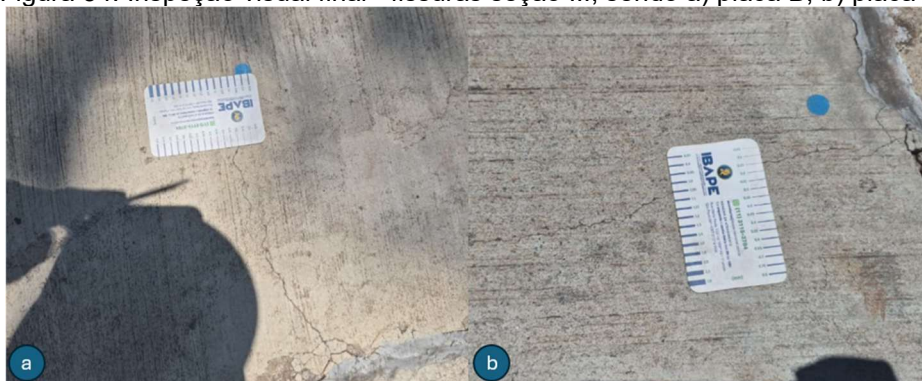
Figura 53: Mapa de defeitos identificados na seção III



Fonte: Autoria própria, 2025

A primeira foi identificada no dia 30 de novembro de 2024 na placa B (Figura 54a) e a segunda no dia 27 de setembro de 2025 na placa E (Figura 54b). Ambas apresentam espessura de 0,2 mm até o fim da campanha. Dessa forma, essas fissuras também são classificadas com grau de severidade baixo, segundo o DNIT 60:2004.

Figura 54: Inspeção visual final - fissuras seção III, sendo a) placa B, b) placa E



Fonte: Autoria própria, 2025.

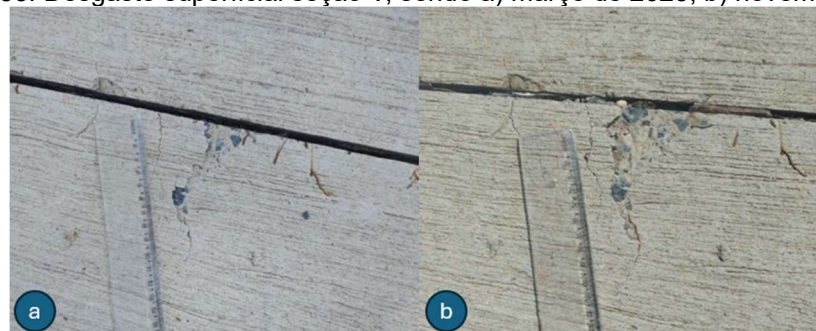
Este caso pode ter ocorrido devido a expansão térmica do concreto ou defeito de selagem da junta, visto que as fissuras ocorreram quase um ano após a selagem. Mesmo se tratando de fissuras transversais, sendo essas indicadas como críticas pelo DNIT 714/2005 por interferir na transferência de carga do pavimento, são de baixo grau de severidade. Contudo, o monitoramento deve permanecer contínuo para evitar a evolução desse defeito.

A seção IV, a seção com maior dimensão de placas e composta por armadura dupla, apresentou desempenho satisfatório, com praticamente ausência de defeitos. O único problema identificado foi o esborcinamento, assim como as seções VII, IX, X e XI.

Na seção V, composta por reforço de fibras metálicas, além do esborcinamento foi identificado um desgaste superficial com exposição dos agregados, registrado em 29 de março de 2025 (Figura 55a). Esse defeito evoluiu ao longo do tempo, apresentando aumento significativo da largura (Figura 55b). A causa está associada ao enferrujamento das fibras metálicas expostas nas juntas não seladas.

O processo de corrosão das fibras provoca a expansão do concreto, resultando no desprendimento da superfície. A ausência de selagem das juntas contribuiu diretamente para o desenvolvimento desse defeito. Embora o DNIT não estabeleça um grau de severidade específico para esse caso, recomenda que seja devidamente reportado.

Figura 55: Desgaste superficial seção V, sendo a) março de 2025, b) novembro 2025



Fonte: Autoria própria, 2025.

A seção VI também não possuiu muitos defeitos reportáveis na época, apenas um pequeno buraco de 3,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de profundidade provocado por um ouriço que estava localizado próximo da superfície do concreto que se desprendeu e formou este defeito (Figura 56). O DNIT também não menciona um grau de severidade para este caso, porém deve ser registrado. O caso ocorreu no dia 31 de agosto de 2024 e não se propagou até a última coleta.

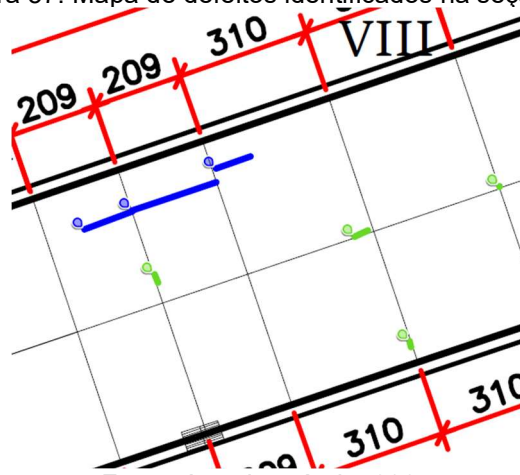
Figura 56: Evolução do buraco seção VI, sendo a) junho de 2024, b) agosto de 2024, c) novembro de 2025



Fonte: Autoria própria, 2025.

Por outro lado, a seção VIII, composta por reforço de fibra de aço, apresentou fissuras lineares longitudinais nas placas C, E e G com espessuras de abertura variadas entre 0,35 mm, 0,4 mm e 0,2 mm (Figura 58), respectivamente. A fissura da placa E inicia com 0,4 mm e finaliza na outra extremidade da placa com 0,2 mm transpassando para a placa G, conforme Figura 57.

Figura 57: Mapa de defeitos identificados na seção VIII



Fonte: Autoria própria, 2025.

Este defeito foi identificado no dia 26 de outubro de 2024 e permaneceu com a mesma espessura de abertura até o fim da campanha. Assim como os demais casos, essas fissuras são classificadas com grau de severidade baixa por possuírem abertura inferior a 12 mm, conforme o DNIT 06:2004.

Figura 58: Inspeção visual final - fissuras seção VIII, sendo a) placa C, b) medida espessura placa E, c) placa G, d) extensão placa E



Fonte: Autoria própria, 2025

Esse defeito pode ter ocorrido por diversos fatores, entre eles o estacionamento de ônibus para repouso no local, situação não prevista no projeto de cálculo, aliado à ausência de selagem das juntas, que favoreceu a passagem de água e o acúmulo de finos. Além disso, verificou-se que a profundidade das juntas apresentava irregularidades: entre as placas C e E, a profundidade próxima à sarjeta era de 1,5 cm, enquanto no centro da placa atingia 3,0 cm. Já na junta entre as placas E e G, a profundidade variava de 2,5 cm junto à sarjeta para 3,5 cm no centro.

Portanto, a carga proveniente dos veículos somada ao desnível das profundidades das juntas pode ter contribuído para o desenvolvimento do defeito, gerando tensões excessivas nas placas. Esse comportamento decorre do fato de as juntas não possuírem a profundidade adequada ($\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ da espessura da placa), o que pode resultar em defeitos estruturais, conforme discutido por Shakhmov *et al.* (2025).

Além disso, foi identificado um ponto de infiltração de água nas juntas e centro de placa da seção VIII, placas E e G devido à ausência de selagem das juntas e impermeabilização da sub-base, Figura 59.

Figura 59: Infiltração de juntas



Fonte: Autoria própria, 2025

Embora não se trate de um defeito estrutural, é relevante destacar as manchas de óleo observadas nas seções VIII e IX, provenientes do ônibus que utiliza o local para repouso (Figura 60). Esse aspecto é pertinente, pois em pavimentos asfálticos o contato com óleo de veículos pode provocar reações químicas que reduzem significativamente sua durabilidade.

No entanto, no caso do pavimento de concreto, não foram identificados defeitos associados à presença de óleo, evidenciando sua maior resistência e desempenho frente a esse tipo de agente externo.

Figura 60: Mancha de óleo proveniente do ônibus, seção IX



Fonte: Autoria própria, 2025.

A seção IX apresentou um desnível ou afundamento no centro da placa de aproximadamente 1,2 cm identificado no dia 28 de agosto de 2024, sendo este perceptível aos pedestres e condutores, Figura 61. Essa irregularidade foi proveniente da frenagem e arranque do ônibus que não havia sido considerado em projeto, conforme mencionado anteriormente.

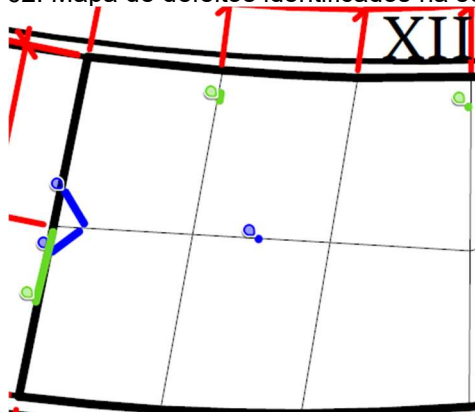
Figura 61: Desnível de meio de placa na seção IX



Fonte: Autoria própria, 2024

Por fim, na seção XII, ambos os defeitos identificados estão relacionados com a selagem ou preparação do encontro entre o pavimento de concreto e o pavimento asfáltico as quais foram identificados dois casos de fissura de canto e desnível acentuado entre os pavimentos, Figura 62.

Figura 62: Mapa de defeitos identificados na seção XII



Fonte: Autoria própria, 2025

As fissuras de canto foram identificadas no dia 26 de abril de 2025, com espessuras de abertura de 0,3 cm na placa E e 0,35 cm na placa F do início ao final da campanha, conforme Figura 63a e Figura 63c. Sendo estes casos considerados como grau de severidade baixo, segundo o DNIT 60:2004.

As fissuras de canto foram identificadas em 26 de abril de 2025, com aberturas de 0,3 cm na placa E e 0,35 cm na placa F, permanecendo constantes do início ao fim da campanha (Figura 63a e Figura 63b). Esses casos são classificados como de grau de severidade baixo, segundo o DNIT 60:2004.

O desnível entre os pavimentos foi observado próximo às sarjetas, apresentando cerca de 1,0 cm em ambos os lados (Figura 63b e Figura 63d). Tais ocorrências podem estar relacionadas à movimentação das placas, provocada pela expansão térmica e

pela passagem de veículos, conforme discutido por Subedi *et al.* (2025), Shakhmov (2025) e Abraham & Ransinchung (2020).

Figura 63: Inspeção visual final - fissuras seção XII, sendo a) fissura de canto placa E, b) Desnível entre pavimento placa E, c) Fissura de canto placa F, d) Desnível entre pavimentos placa F



Fonte: Autoria própria, 2025

Apesar da presença de alguns defeitos, o trecho encontra-se em ótimo estado, visto que a maioria deles apresenta grau de severidade baixo. A ausência de juntas nos encontros de pavimentos e a falta de selagem das juntas foram escolhas de projeto para avaliar diferentes cenários. Entretanto, o estacionamento de ônibus no local não havia sido previsto. Esses defeitos devem ser corrigidos para assegurar a integridade do pavimento, bem como o conforto e a segurança dos condutores.

A ausência de selagem das juntas pode favorecer o acúmulo de finos e a infiltração de água, conforme o DNIT 061 (2004). De acordo com Shakhmov (2025), as juntas desempenham papel crucial na movimentação das placas, e sua deficiência ou falta de planejamento pode resultar em defeitos significativos. Juntas muito rasas ($\leq 3,0$ cm) podem contribuir para o empenamento.

Nas primeiras seções, com placas de 10 cm de espessura, o surgimento de fissuras longitudinais pode ser explicado pelo fato de que placas mais finas são mais suscetíveis ao empenamento, embora reduzam parte das tensões internas, conforme Ransinchung (2020).

Uma das principais causas para a proliferação de fissuras longitudinais foi a ação da temperatura: quanto maior o gradiente térmico, maior o coeficiente de expansão

térmica (CTE), aumentando o risco de aberturas de juntas e fissurações, como discutido por Abraham e Ransinchung (2020).

Conforme mencionado no item 3.5.1, temperaturas entre 20 °C e 30 °C, associadas à umidade, podem favorecer o surgimento de fissuras, segundo Subedi *et al.* (2025).

Esse cenário contribuiu para a manutenção de um clima úmido em determinados intervalos, aliado a oscilações abruptas de temperatura. Essa variação térmica elevada foi determinante para a formação de fissuras em pavimentos de concreto, visto que, conforme Ransinchung (2020) e Mahfuda *et al.* (2023), as tensões térmicas podem superar as tensões de carga.

4.3.2. Avaliação Topográfica

De acordo com a FHWA (2014), o desnível entre juntas inferior a 1,8 cm é considerado aceitável. Já segundo o DNIT 061/2004, o desnível entre 3 mm e 10 mm corresponde a um grau de severidade baixo, entre 10 mm e 20 mm a um grau de severidade médio, e valores superiores a 20 mm são classificados como de grau de severidade alto.

De modo geral, observou-se que, em ambas as campanhas, a movimentação das placas foi constante, sem obedecer a um padrão facilmente perceptível, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo para avaliar a evolução dos desníveis e possíveis impactos na durabilidade do pavimento.

4.3.2.1. Avaliação altimétrica uma semana após liberação de uso da pista

Foi possível observar que todas as placas apresentaram movimentação altimétrica nos pontos avaliados. A maioria dos pontos coletados apresentaram valor inferior ou igual a 3 mm e 10 mm de degrau, indicando bons resultados, segundo o DNIT 61/2004, conforme Figura 64.

Os pontos com degrau entre 10 mm e 20 mm e acima de 20 mm estão localizados na sarjeta. Durante o período de coleta, não havia sido realizado a selagem das juntas, as sarjetas possuíam isopor para separação entre o concreto do pavimento e da sarjeta, alguns pontos foram demarcados em cima do isopor, gerando ruídos no resultado. Portanto, os resultados altimétricos localizados nessa região foram desconsiderados.

Figura 64: Coleta altimétrica após uma semana de uso, sendo: a) coleta 1, b) coleta 2, c) coleta 3, d) coleta 4



Fonte: Autoria própria, 2025

Na segunda coleta, o único caso reportável foi um degrau de 11 mm na seção I, localizado entre as placas Q e U, no canto inferior esquerdo da placa, sendo classificado como resultado regular. Esse ponto representou 0,2% de todos os pontos avaliados.

Na terceira coleta, novamente foi reportado apenas um ponto, com 12 mm, na seção II, também entre as placas Q e U, no canto inferior esquerdo. Já na quarta coleta, foram identificados dois pontos com 11 mm: um na seção I (entre as placas S e W) e outro na seção III (entre as placas A e C). Além disso, foi registrado mais um caso, totalizando três pontos, com 20 mm na seção I (entre as placas R e V). No conjunto, esses casos representaram 0,7% de todos os pontos coletados.

Diante disso, conclui-se que a movimentação altimétrica das placas é constante, como já discutido anteriormente. Contudo, essa movimentação não comprometeu a integridade do pavimento, visto que, em todas as coletas, apenas um único ponto ultrapassou 18 mm, o que indica um pavimento em boas condições, conforme critérios da FHWA (2014).

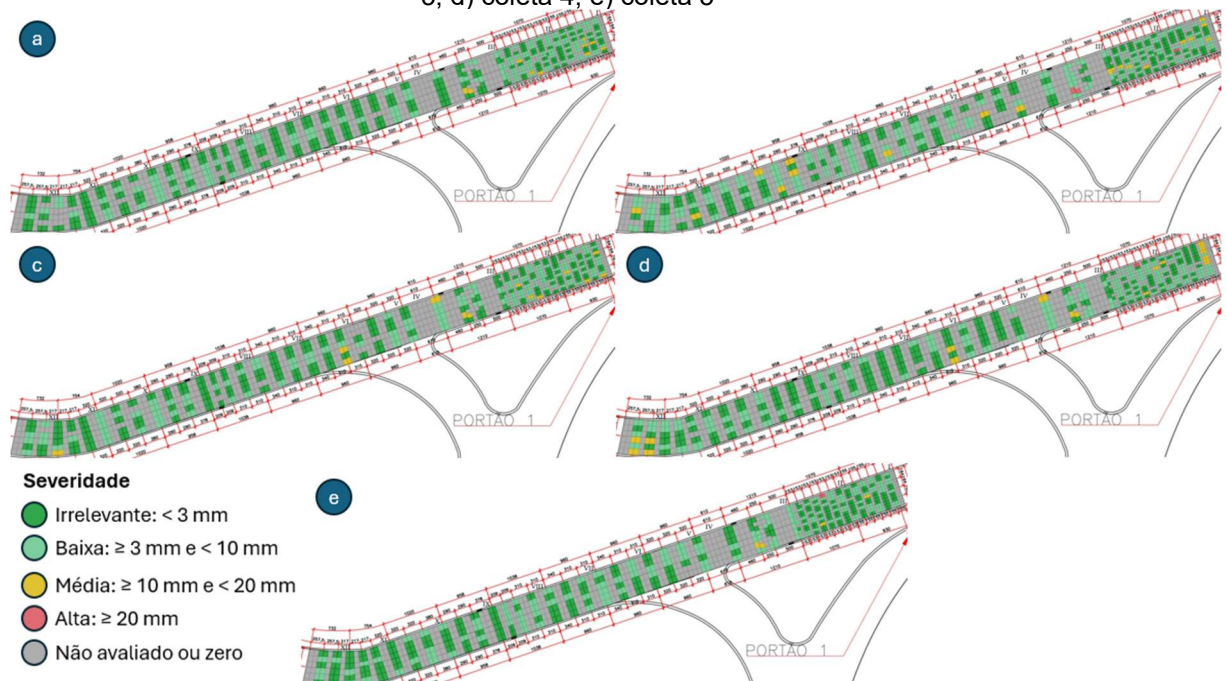
Por fim, destaca-se que a maioria dos pontos com irregularidades, independentemente do período de coleta, foi localizada na seção I, sugerindo uma relação entre a movimentação das placas e a abertura das juntas observada entre as placas Q e T.

4.3.2.2. Avaliação altimétrica após quatro meses de tráfego

Assim como na campanha realizada após uma semana de uso da pista, na segunda campanha todas as coletas apresentaram movimentações nas placas, sendo este uma característica comum do pavimento de superfície de concreto, como já discutido anteriormente.

As movimentações medidas foram diferentes entre as coletas, ou seja, as variações observadas em cada coleta não foram as mesmas ou apresentaram algum tipo de padrão lógico. Os poucos pontos com valores acima do aceitável pelo FHWA e DNIT variavam de coleta para coleta, conforme Figura 65.

Figura 65: Coleta altimétrica após quatro meses de uso, sendo: a) coleta 1, b) coleta 2, c) coleta 3, d) coleta 4, e) coleta 5



Fonte: Autoria própria, 2025

A quantidade de degraus de cada coleta está representada na Tabela 23. Diferentemente da primeira campanha, os pontos coletados próximos da sarjeta estavam alocados dentro da placa, evitando ruídos no resultado.

Tabela 23: Quantitativo de pontos acima dos padrões estabelecidos pelo DNIT e FHWA

Coleta	Data	Severidade Média	Severidade Alta	Degrau acima de 1,8 cm	Total
1	22/11/24	9	-	-	9
2	23/12/24	19	2	2	21
3	23/01/25	13	-	-	13
4	24/02/25	19	1	2	20
5	28/03/25	4	1	1	5

Fonte: Autoria própria, 2025

Mesmo apresentando alguns pontos com grau de severidade entre média e alta, o percentual de casos reportáveis representam 2%, 5%, 3%, 5% e 1%, respectivamente, da quantidade total de 427 juntas avaliadas.

As seções IV a XII não apresentaram nenhum resultado de severidade alta em todas as coletas, indicando uma ótima qualidade dessas seções. Com tudo, os casos reportáveis como severidade alta foram localizados nas seções I, II e III, sendo que na seção II houve recorrência entre as coletas 4 e 5 no ponto próximo da sarjeta entre as placas I e M. As demais ocorrências foram na segunda coleta na seção I no centro da junta das placas S e W e na seção III no centro da junta das placas D e F.

É possível observar que dentre todas as coletas, pelo menos 50% dos pontos de grau de severidade entre médio e alta, assim como os degraus acima de 18 mm, estão localizados nas seções I e II, compostos por uma espessura de placa de 10 cm. Placas menos espessuras são mais suscetíveis aos efeitos de empenamento e aos efeitos de movimentação de placa, como já discutido anteriormente.

Por outro lado, a seção VIII apresentou excelente performance com relação a formação de degraus, onde não foi reportado nenhum caso classificado com severidade média ou alta. Além disso, da seção IV, VII, X e XI também apresentaram boa performance visto que os resultados irregulares correspondem a cerca de 5% dos pontos coletados em cada seção.

Além disso, embora tenham sido registrados pontos com valores de degrau acima dos limites estabelecidos pela FHWA e pelo DNIT, tanto na análise realizada uma semana após a liberação da pista quanto na análise realizada após quatro meses de uso, verificou-se que houve movimentação contínua das placas. Essa movimentação,

entretanto, não comprometeu a integridade do pavimento, já que apenas um ponto ultrapassou 18 mm, permanecendo dentro das condições consideradas aceitáveis pela FHWA (2014).

É possível observar que os pavimentos de concreto com maior espessura e compostos por fibras metálicas e poliméricas, em uma área urbana de tráfego leve e clima tropical, de modo geral, apresentaram boa performance com relação a movimentação de placas e formação de degraus reportáveis, mesmo com a ausência de selagem das juntas. Contudo, é recomendado pelas normas regulamentadoras que as juntas sejam seladas para evitar a proliferação de outros defeitos que podem limitar a vida útil do pavimento.

A movimentação das placas é um fenômeno comum em pavimentos de concreto, agravado principalmente pela ação da carga dos veículos e gradiente térmico, conforme discutido no item 3.5.1.

4.3.3. Falling White Deflectometer (FWD)

Os resultados médios de LTE de cada seção está apresentados na Tabela 24. Os resultados completos de cada junta está apresentado no APÊNDICE D.

Tabela 24: Resultado médio do LTE por seção

Seção	LTE	LTE
	direita	esquerda
I	72%	75%
II	81%	82%
III	84%	82%
IV	85%	88%
V	37%	41%
VI	59%	46%
VII	39%	46%
VIII	36%	55%
IX	55%	54%
X	40%	63%
XI	58%	56%
XII	69%	67%

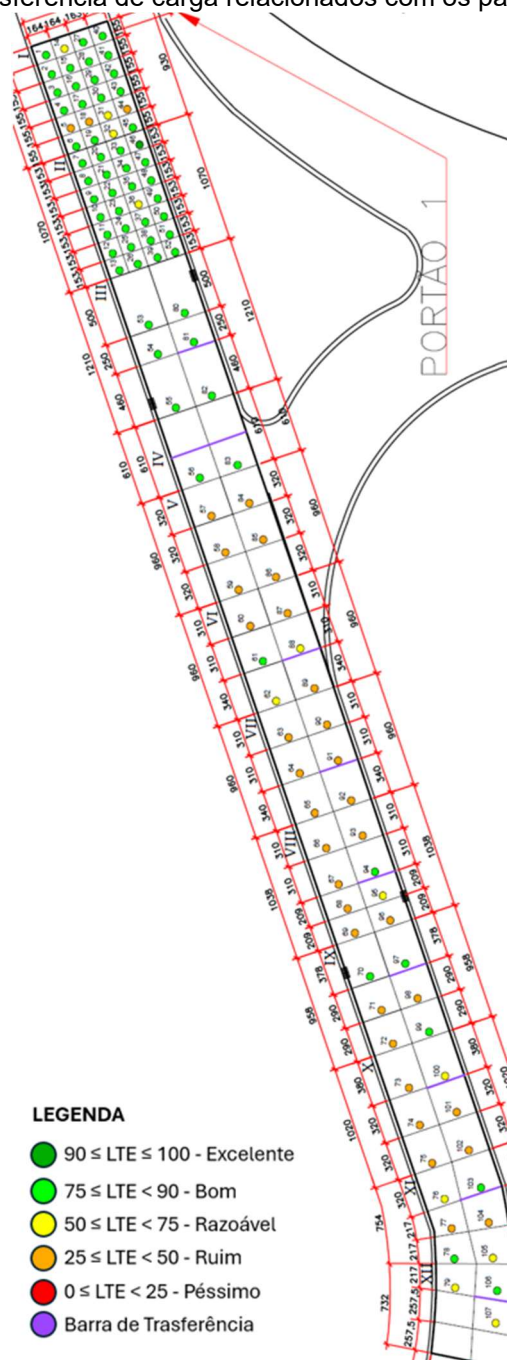
Fonte: Autoria própria, 2026

É possível observar que o LTE das seções I a IV apresentaram bons resultados, sendo que a primeira seção é composta por fibras poliméricas, espessura concreto de 10 cm e juntas menos espaçada (placas de 1,55 m por 1,65m). As seções II, III e IV

são reforçadas por armadura, sendo que a seção II também possui a juntas menos espaçada e a III e a IV são mais espaçadas (placas maiores).

As demais seções apresentaram resultados baixos de transferência de carga, sendo esses compostos apenas por fibras. É notável que os resultados foram maiores nos pontos onde foram posicionadas as barras de transferência, conforme Figura 66. Da seção da direita onde não há ação das barras de transferência, os menores valores foram apresentados nas seções V e VIII compostos por fibras metálicas.

Figura 66: Mapa de transferência de carga relacionados com os parâmetros do FHWA (2004)



Fonte: Autoria própria, 2026

Esperava-se que o LTE das seções de concreto reforçado com fibra tivesse um desempenho bom por apresentarem baixa espessura e adição de macrofibras. Contudo, observou-se que os pontos coletados longe das barras de transferência apresentaram um resultado classificado como baixa transferência de carga pelo FHWA (2004), apresentando uma média de 40% de LTE.

Como esperado, as juntas com barras de transferência e seções compostas por armadura apresentaram bons resultados, com uma média de 80% de LTE. Além disso, a seção I, mesmo sendo composta por concreto reforçado com fibra, apresentou bons resultados de LTE, média de 72%.

Observou-se que na região onde houve a abertura de junta na seção I o LTE foi ruim, Figura 66. Assim como mencionado por Abraham e Ransinchung (2020), as juntas auxiliam a controlar a transferência de carga entre as placas. Como nas fissuras lineares transversais com grau de severidade elevado (abertura superior a 50 mm), a abertura de junta relatada impactou diretamente na transferência de carga desse trecho, apresentando resultados médios de 38% de LTE.

O estudo de Berman *et al.* (2024) constata que as fibras apresentam uma boa transferência de carga em pavimentos delgados (entre 10 e 15 cm de espessura), com concreto de cimento convencional (a/c aproximadamente 0,42), dosagem das fibras sintéticas na ordem de 7 kg/m^3 , sem o uso de barras de transferência, dimensão de 1,8 m por 1,8 m das placas e abertura de corte das juntas de 1,5 mm. Apresentando uma contribuição adicional de 30% a 40% de LTE das fibras poliméricas de geometria irregular. Este estudo não avaliou fibras metálicas, portanto as conclusões referentes a transferência de carga referem-se exclusivamente a fibras sintéticas estruturais.

Neste caso, nota-se que no trecho experimental estudado apresentou algumas divergências em relação ao estudo de Berman *et al.* (2004), tais como apresentados na Tabela 25.

Tabela 25: Comparação entre estudo Berman *et al.* (2024) e trecho experimental estudado

Proporções	Berman <i>et al.</i> (2024)	Trecho Experimental PUC
Espessura de placa	Delgado - 10 cm a 15 cm	10 cm e 12 cm
a/c	0,42	$\leq 0,5$
Dosagem das fibras	7 kg/m ³	5 kg/m ³ seção I e 4 kg/m ³ demais seções
Dimensionamento das placas	1,8 cm x 1,8 cm	Variado por seção
Corte das juntas	1,5 mm	2,0 mm
Fibras utilizadas	Poliméricas ancoradas	Metálica e Polimérica ancorada

Fonte: Autoria própria, 2026

Parâmetros como espessura de placa e relação a/c estão próximos. Contudo, é possível notar divergência entre a dosagem, dimensionamento, espessura de corte das juntas e fibras utilizadas.

A dosagem das fibras é importante para garantir que haja a mesma proporção de fibras por metro cúbico de concreto. Notou-se que a seção I, apresentando uma dosagem de 5 kg/m³ apresentou resultados similares. Contudo, as demais seções de dosagem de 4 kg/m³ não apresentaram boa performance.

Ao avaliar o dimensionamento das placas, nota-se que as placas da seção I, compostas por fibras poliméricas e dimensionamento de 1,55 cm por 1,64 cm, apresentaram bons resultados de LTE, enquanto as seções com placas maiores apresentaram resultados piores. Isso pode ser relacionado com a distribuição de fibras por metro cúbico. Placas com cortes maiores podem apresentar uma menor quantidade de fibra por metro cúbico na região próxima das juntas, enquanto cortes menores podem apresentar uma distribuição melhor.

Apesar da profundidade das juntas não ter sido especificada no texto de Berman *et al.* (2024), houve uma diferença de 0,5 mm na espessura do corte das juntas. Contudo, não há indícios na literatura que isso acarrete algum fator limitante para a transferência de carga proveniente de fibras.

Para o cenário estudado, as fibras poliméricas não apresentaram bom desempenho e não proporcionaram aumento no LTE para placas mais esbeltas. Mas isso não descarta o fato que as fibras podem apresentar influência na transferência de carga de um pavimento delgado, como observado na seção I.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar um trecho experimental de pavimento de concreto de cimento Portland reforçado, considerando suas funcionalidades em ambiente urbano de tráfego leve.

Os pavimentos de concreto demonstraram vantagens importantes: alta durabilidade, baixa condutividade térmica, elevada refletância, maior segurança e conforto de rolamento, além de benefícios econômicos como redução de custos de manutenção, menor consumo de energia e água na produção, e economia de combustível e pneus.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- Na avaliação térmica, o pavimento asfáltico apresentou temperaturas até 5 °C superiores às registradas no concreto, e no período das 15h o concreto manteve uma superfície 11% mais fria, contribuindo para ambientes urbanos mais frescos.
- O concreto apresentou refletância média aparente 130% maior durante o dia e 200% superior à noite, favorecendo a visibilidade e reduzindo a necessidade de iluminação pública.
- O controle tecnológico foi bem executado, com resistências médias à compressão e à tração na flexão conforme exigidas em projeto e baixo desvio padrão.
- Após três meses da concretagem, o Índice de Condição do Pavimento (ICP) foi classificado como excelente, com menos de 2% de defeitos.
- Após um ano e meio, surgiram fissuras, esborcinamentos, degraus e abertura de juntas, todos classificados como grau de severidade baixo, sem comprometer a integridade estrutural. Contudo, a abertura de juntas na seção I impactou negativamente a transferência de carga.
- A maioria dos defeitos esteve relacionada à ausência de selagem das juntas, propositalmente adotada para avaliar diferentes cenários.
- A análise topográfica confirmou movimentação contínua das placas, sem comprometimento da infraestrutura, influenciada por variações térmicas e tráfego.

- Quanto à transferência de carga (LTE), as fibras não apresentaram bom desempenho geral. Entretanto, placas menores reforçadas apenas com fibras poliméricas tiveram resultados melhores que placas mais esbeltas. Já as seções com armaduras e pontos com barras de transferência apresentaram bons resultados de LTE.

Do ponto de vista de sustentabilidade, os pavimentos de concreto reforçado alinham-se às práticas modernas de gestão de infraestrutura, oferecendo menor emissão de gases de efeito estufa, redução de consumo energético, redução das ilhas de calor e benefícios sociais como maior segurança e menor ruído.

Conclui-se, portanto, que os pavimentos de concreto reforçado são uma alternativa viável e sustentável para ambientes urbanos, desde que acompanhados por planejamento criterioso, execução qualificada e monitoramento contínuo. Para avanços futuros, recomenda-se aprofundar os estudos sobre a dosagem ideal de fibras e o dimensionamento das placas, de modo a otimizar a transferência de carga, conforme apontado por Berman *et al.* (2024).

BIBLIOGRAFIA

AASHTO, AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, 1993.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655:2015 – Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15530:2007 – Fibras de aço para concreto – Especificações**. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16938:2021 – Concreto reforçado com fibras - Controle da qualidade**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16940:2021 – Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16942:2021 – Fibras poliméricas para concreto – requisitos, métodos e ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484:2020 – Solo- Sondagens de simples reconhecimento com SPT- Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953:2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PR 1011:2021 – Projeto de pavimentos urbanos em concreto**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PR 5738:2016 – Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PR 5739:2018 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PR 16940:2021 – Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na**

flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PR 12142:2010 – Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ABRAHAM, S. M.; RANSINCHUNG, G.D.R.N. Temperature variation and stresses in unreinforced concrete pavement containing RAP. **Construction and Building Materials**, Índia, v.263, e.120506, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120506>. Acesso em 03 de dez. 2025.

AKBARI, H.; LEVINSON, R. **Evolution of Cool-Roof Standards in the US.** Advances in Building Energy Research. EUA, e. 1, p. 32, 2007

ASBAHAN, R. E.; VANDENBOSSCHE, J. M. **Effects of Temperature and Moisture Gradients on Slab Deformation for JPCPs.** American Society of Civil Engineers Transportation Journal. Pittsburgh, p.38, 2011.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM C531:2023 - Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field.** EUA, 2006.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM E1918:2006 - Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes.** EUA, 2023.

ACI. American Concrete Institute. **Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures.** EUA, p. 26. 2007.

AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Uberlândia: IBGE, Notícias Censo 2022, [2023]. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias>. Acesso em: 13 mai 2025.

ANDREW, N. A História da Malha Rodoviária Brasileira. **Rodoquick Transportes.** 2006. Blog. Disponível em: <https://rodoquick.com.br/blog/a-historia-da-malha-rodoviaria-brasileira/>. Acesso em: 28 abr. 2024.

ASVITHA, V. S.; RAVI, K. M. S. Review on the mechanism and mitigation of cracks in concrete. **Applications in Engineering Science**, v.16, Índia, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apples.2023.100154>, Acesso em: 08 de nov. 2025.

AVILA, M.; PEZZUTO, C. C. Avaliação da temperatura superficial de materiais do meio urbano. *In*: Encontro de Iniciação Científica, Anais do XXIII, 2018, Campinas. **Anais do VIII Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – ISSN 2237-0420.** Campinas: PUC, 2018.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. 1.ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BERMAN, M. et al. **Toward the development of pavement-specific structural synthetic fibers**. National Road Research Alliance, Department of Civil Engineering. Minnesota, p. 120, 2024.

BOLETIM. Pesquisa CNT de Rodovias 2023. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. 2023. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acessado em 21 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília: Casa Civil, 1997.

CARGNIN, A. P.; BALBO, J. T. **Análise experimental e analítica da fissuração de pavimentos de concreto continuamente armados em clima tropical**. 2016. 190 f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transporte) - Engenharia de Transportes. Universidade Federal de Santa Maria, São Paulo, 2016.

CARVALHO, M. D. **Vantagens e Benefícios do Whitetopping e do INLAY na reabilitação de pavimentos**. Associação Brasileira de Cimento Portland: ABCP. São Paulo. 2012.

CHODOUNSKY, M. A. **Patologia em pisos industriais**. Associação Nacional de Piso e Revestimentos de Alto Desempenho: ANAPRE, 2010. Disponível em: [https://www.anapre.org.br/pdfs/Patologias em Pisos Industriais Anapre RJ Marcel Chodounsky Dez2010.pdf](https://www.anapre.org.br/pdfs/Patologias%20em%20Pisos%20Industriais%20Anapre%20RJ%20Marcel%20Chodounsky%20Dez2010.pdf). Acesso em: 27 de out. 2025.

CHOUBANE, B.; TIA, M. Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement. **Journal of Transportation Engineering**, v.121, e.1, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:1(75)). Acesso em: 27 de nov. 2025.

CIIAGRO Campinas (V0338). Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília: INMET, 2025. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 13 de mai. de 2025.

CONTAGEM DA POPULAÇÃO. Sistema IBGE de Recuperação Automática. Uberlândia: SIDRA/IBGE, 2007. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/793#resultado>. Acesso em: 13 de mai de 2025.

COUTO, L. S. B. **Uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento**. 2019. 167 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, Instituto de Infraestrutura e Urbanismo. São Carlos, 2019.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 404/2000. Regulamentada em 18 de abril de 2000. **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 8. 2000.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-PRO 273/1996. Regulamentada em 15 de maio de 1996. **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 4. 1996.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ES-460/2025. Regulamentada em 17 de jun. de 2025. **Pavimento rígido – Concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2.ed., p. 31. 2025.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR-720/2006. Regulamentada em 25 de jun. de 2006. **Manual de restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2.ed., p. 313. 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR-714/2005. Regulamentada em 26 de julho de 2007. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Rio de Janeiro, 2.ed., p. 234. 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ME-055/2004. Regulamentada em 25 de novembro de 2004. **Pavimento rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 6. 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. PRO-006/2003. Regulamentada em 25 de novembro de 2003. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2.ed., p. 10. 2003.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. PRO-060/2004. Regulamentada em 25 de novembro de 2004. **Pavimentos rígidos – Inspeção visual - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 22. 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. PRO-062/2004. Regulamentada em 25 de novembro de 2004. **Pavimentos rígidos – Avaliação objetiva - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 29. 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. PRO-063/2004. Regulamentada em 25 de novembro de 2004. **Pavimentos rígidos – Avaliação subjetiva - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 15. 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. PRO-102/1997. Regulamentada em 22 de janeiro de 2003. **Sondagem de reconhecimento pelo método rotativo**. Rio de Janeiro, 3.ed., p. 12. 2003.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. TER-005/2003. Regulamentada em 06 de agosto o de 2003. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia**. Rio de Janeiro, 2.ed., p. 24. 2003.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. TER-061/2004. Regulamentada em 25 de novembro de 2004. **Pavimentos rígidos – Defeitos - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1.ed., p. 13. 2004.

ESTATÍSTICAS - FROTA DE VEÍCULOS. Secretaria Nacional de Trânsito. Brasília: SENATRAN, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>. Acesso em: 13 de mai. de 2025.

FAN, Z. *et al.* Automatic Crack Detection on Road Pavements Using Encoder-Decoder Architecture. **MDPI: Materials**. Suíça, v.13, p. 2960, 2020. DOI: 10.3390/ma13132960.

FANG, M. et. al. Toughness improvement mechanism and evaluation of cement concrete for road pavement: A review. **Journal of Road Engineering**, v.3, p.125-140, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.01.005>. Disponível em: [Journal of Road Engineering](#). Acesso em: 03 de jun. 2025.

FHWA. Federal Highway Administration. **Concrete pavement preservation guide**. Washington, v.2, 2014.

GHOLAMI, M.; NEJAD, F. M.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Increasing the Length of Concrete Pavement Slabs Using Shrinkage Reducing Admixture and Polypropylene Fiber. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00647-8>.

GOLEWSKI, G. L. The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review. *Buildings*, v.13, p.765. 2023. DOI: <https://orcid.org/0000-0001-9325-666X>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/9/10/185>. Acessado em 01 de jun. 2025.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. EUA. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, v.2, 2004. E-book.

IBRACON. Live IBRACON Pavimento de concreto: Mitos e Verdades com o Prof. José Tadeu Balbo. 2020. Online (54 minutos). Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=b-5MO5mAyyg&list=WL&index=14>. Acesso em: 30 abr. 2024.

IAC. Instituto Agrônomo de Campinas. Brasília: IAC, 2026. Disponível em: <https://clima.iac.sp.gov.br/index.php/main/detalhar/3>. Acesso em: 24 de jan. de 2026.

JOHNSTON, D. P.; SURDAHL, R. D. Effects of Design and Material Modifications on Early Cracking of Continuously Reinforced Concrete Pavements in South Dakota. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2081, p. 103-109, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3141/2081-11>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/238196921_Effects_of_Design_and_Material_Modifications_on_Early_Cracking_of_Continuously_Reinforced_Concrete_Pavements_in_South_Dakota. Acessado em: 14 de set. 2025.

KHAZANOVICH, L. AND A. GOTLIF. **Evaluation of Joint and Load Transfer Final Report: No. FHWA-RD-02-088**. Federal Highway Administration, McLean, Virginia, p. 120, 2003.

KLAMT, R. A. et al. A Influência da Sobrecarga nos Pavimentos e a Importância da Fiscalização de Pesagem Veicular nas Rodovias Brasileiras. *Posso Fundo: Revista CIATEC – UPF*, vol.9, p.p.52-65, 2017. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/download/7569/4543/0>. Acesso em 14 de mai. de 2025

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. *Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials*. Portland Cement Association. Washington. 2011.

KUNZ, F. O. **Estudo Experimental do Whitetopping com Adição de Fibras Sintéticas**. 2020. 92 f. Dissertação: Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020. Disponível em: <https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/handle/123456789/15154>. Acesso em: 21 abr. 2024.

LIN, Y.; KARADELIS, J. N. **Interfacial fracture toughness of composite concrete beams**, *Construction and Building Materials*, v.213, p.413-423, 2019, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.066>

MAAFI, N. et al. The Effects of Polypropylene Fibers on the Mechanical and Durability Performance of a Roller Compacted Concrete for Pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00329-4>. Disponível em: [\(PDF\) The Effects of Polypropylene Fibers on the Mechanical and Durability Performance of a Roller Compacted Concrete for Pavement](#). Acessado em 03 de jun. de 2025.

MACHIO, A.; CARVALHO, M. D. **Vantagens do Pavimento de Concreto: Infraestrutura, Mobilidade e Transporte**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo. 2023.

MAHFUDA, A.; SISWOSUKARTO, S.; SUHENDRO, B. The Influence of Temperature Variations on Rigid Pavement Concrete Slabs. **Journal of the Civil Engineering Forum**, Indonésia, v.9, e.2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22146/jcef.5744>. Acesso em 04 de dez. 2025.

MOHAMED, A. R.; HANSEN, W. Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Michigan, v.1568, e.1, 1997. DOI: <https://doi.org/10.3141/1568-08>. Acesso em 01 de dez. 2025.

MUSLIM, H. B.; HAIDER, S. W.; CHATTI, K. Influence of seasonal and diurnal FWD measurements on deflection-based parameters for rigid pavements. **International Journal of Pavement Engineering**. EUA, p.13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1958217>. Acesso em 28 de nov. 2025.

NEUHART, B. H.; LESLIE, B.; REYNAUD, D. Alternative Material Dowel Bars for Rigid Pavement Joints. **ECT Fact Sheets: Construction Engineering and Management Commons**, 2007. DOI: 10.5703/1288284315724.

PEREIRA, C. D. et al. **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas (v.1)**. Centro brasileiro de eficiência energética em edificações, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, v.1, p.23, 2015.

RAHMAN, M. M.; UDDIN, M. M.; GASSMAN, S. L. Pavement Performance Evaluation Models for South Carolina. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v.21, n.7, p. 2695-2706, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0544-7>. Acesso em: 06 de nov. 2025.

RELATÓRIO GERAL. Pesquisa CNT de Rodovias 2023. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acessado em 21 abr. 2024.

SAADULLA, H.; IBRAHIM, I.; SANI, A. Using Pavement Condition Index to Evaluate the Condition of Flexible and Rigid Pavements. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, v. 4, 4 ed., p. 12. 2019.

SHATAYAT, A. *at al. A Review of Monitoring Systems of Paviment Condition in Paved and Unpaved Roads*. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v.7, n.5, p. 629-638, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756420301173>. Acesso em: 21 abr. 2024.

SCHINDLER, A. K.; MCCULLOUGH; B. F. Importance of Concrete Temperature Control During Concrete Pavement Construction in Hot Weather Conditions. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1813, n. 1, p. 3-10, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3141/1813-01>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228509196>. Acesso em: 14 set. 2025.

SEN, S.; LI, H.; KHAZANOVICH, L. Effect of climate change and urban heat islands on the deterioration of concrete roads. **Results in Engineering**, v.16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100736>. Disponível em: www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering. Acessado em 10 de jun. 2025.

SÉRIE HISTÓRICA DE EMISSÕES TOTAIS DE CO₂E. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Piracicaba: SEEG, 2022. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector&gl=1*wysxyq*ga*MjEyMDY2NjcyNC4xNzEzNjUxNjUw*ga_XZWSWEJDWQ*MTcxMzY1MTY0OS4xLjAuMTcxMzY1MTY0OS4wLjAuMA. Acesso em: 28 abr. 2024.

SHAKHMOV, Z. A. et al. Case study of the dynamics of thermal expansion of concrete in pavements of South Kazakhstan. **Transportation Engineering**, Cazaquistão, v.19, e. 100298, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100298>. Acesso em 03 de dez. 2025.

SHAKIR, H. M.; AL-TAMEEMI, A. F.; AL-AZZAWI, A. A. A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology. **Journal of Physics: Conference Series**, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1895/1/012053. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1895/1/012053>. Acessado em: 04 de jun. de 2025.

SHOUKRY, S. N. *et al.* **Evaluation of Load Transfer Efficiency Measurement**. Mid-Atlantic Universities Transportation Center. West Virginia University, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228410739_Evaluation_of_Load_Transfer_Efficiency_Measurement. Acesso em: 27 de nov. 2025.

SIDDIQUE, Z. Q.; HOSSAIN, M.; MEGGERS, D. Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement. Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Iowa State University, p. 12, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228678490_Temperature_and_Curling_Measurements_on_Concrete_Pavement. Acesso em: 27 de nov. 2025.

SOUZA, R. E.; LANA, S. L. B.; SILVA, G. H. T. A. Design e implementação do whitetopping na restauração de rodovias. **Concreto & Construções**, São Paulo, e.104, p.93-97, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2021.104.0010>. Acesso em: 04 de dez. 2025.

SNYDER, M. B. et al. **Guide to Dowel Load Transfer Systems for Jointed Concrete Roadway Pavements**. Nacional Concrete Consortium. Chicago, 2011.

SUBEDI, A. et al. Thermal Behavior of Concrete: Understanding the Influence of Coefficient of Thermal Expansion of Concrete on Rigid Pavements. **Applied Sciences**, Suíça, v.15, e.3213, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15063213>. Acesso em 03 de dez. de 2025.

TAN, E. B.; **Evaluation of Surface Properties of Roller Compacted Pavements Using 3D Photogrammetry Method**. 2023. 180f. Dissertação (Master of Science in Civil Engineering) - School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Turquia, 2023.

TELES, A. A. *et al.* Método para cálculo do consumo energético e da emissão de CO2 dos serviços de infraestrutura de transportes do SICRO: análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland. Distrito Federal: **Revista Transportes**, vol. 32, n. 2, e. 2791, 2024. DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2791. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2791>. Acesso em 14 de mai de 2025.

VANDENBOSSCHE, J. M. **Effects of slab temperature profiles on use of falling weight deflectometer data to monitor joint performance and detect voids**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2005, p. 75-85, 2007.

XING, J.; LIU, Y.; ZHANG, G. Concrete Highway Crack Detection Based on Visible Light and Infrared Silicate Spectrum Image Fusion. **MDPI: Sensors**. Suíça, v. 24, p. 2759, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092759>.

YILMAZ, M. C. et al. Utilization of the Pavement Condition Index for Roller Compacted Concrete Pavements: A Case Study in Türkiye. 13th International Conference on Concrete Pavements, Minneapolis, Minnesota, USA, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/383860588_Utilization_of_the_Pavement_Condition_Index_for_Roller_Compacted_Concrete_Pavements_A_Case_Study_in_Turkiye. Acesso em: 10 de nov. 2025.

ZHANG, Y. et al. Seasonal variations and in situ assessment of concrete pavement foundation mechanistic Properties. **International Journal of Pavement Research and Technology**. China, v.11, e.4, p.363-373, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.007>. Acesso em: 28 de nov. 2025.

ZHU, S. et al. Study of illumination and reflection performances on light-colored pavement materials. **Construction and Building Materials**. China, p.11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139239>. Acesso em: 15 de março de 2026

APÊNDICE A

Tabela I: Iluminação do trecho às 5 h

Metragem	Calçada	Pista	Canteiro
0	Sem iluminação	Parcialmente iluminado	Iluminado por luz artificial
6	Sem iluminação	Parcialmente iluminado	Iluminado por luz artificial
12	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
18	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
24	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
30	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste	Iluminação direta de poste
36	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste	Iluminação direta de poste
42	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste
48	Sem iluminação	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste
54	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
60	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
66	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
72	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
78	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
84	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
90	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
96	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
102	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
108	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
114	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
120	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela II: Iluminação do trecho às 9 h

Metragem	Calçada	Pista	Canteiro
0	Sombreado	Irradiação direta	Irradiação direta
6	Sombreado	Irradiação direta	Irradiação direta
12	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
18	Sombreado	Sombreado	Sombreado
24	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
30	Sombreado	Irradiação direta	Sombreado
36	Irradiação direta	Irradiação direta	Sombreado
42	Sombreado	Irradiação direta	Irradiação direta
48	Sombreado	Irradiação direta	Irradiação direta
54	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
60	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
66	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
72	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
78	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
84	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
90	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta

96	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
102	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
108	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
114	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
120	Irradiação direta	Irradiação direta	Irradiação direta

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela III: Iluminação do trecho às 15 h

Metragem	Calçada	Pista	Canteiro
0	Sombreado	Sombreado	Sombreado
6	Sombreado	Sombreado	Sombreado
12	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
18	Irradiação direta	Irradiação direta	Irradiação direta
24	Sombreado	Irradiação direta	Irradiação direta
30	Sombreado	Irradiação direta	Irradiação direta
36	Sombreado	Sombreado	Sombreado
42	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
48	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
54	Sombreado	Sombreado	Sombreado
60	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
66	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
72	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
78	Sombreado	Sombreado	Irradiação direta
84	Irradiação direta	Irradiação direta	Irradiação direta
90	Irradiação direta	Sombreado	Irradiação direta
96	Irradiação direta	Sombreado	Irradiação direta
102	Irradiação direta	Irradiação direta	Irradiação direta
108	Irradiação direta	Irradiação direta	Sombreado
114	Irradiação direta	Irradiação direta	Sombreado
120	Irradiação direta	Irradiação direta	Irradiação direta

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela IV: Iluminação do trecho às 18 h

Metragem	Calçada	Pista	Canteiro
0	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Iluminação artificial direta
6	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Iluminação artificial direta
12	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
18	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
24	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
30	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste	Iluminação direta de poste
36	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste	Iluminação direta de poste
42	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste
48	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
54	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
60	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado

66	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
72	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
78	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
84	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
90	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
96	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
102	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
108	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
114	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
120	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela V: Iluminação do trecho às 21 h

Metragem	Calçada	Pista	Canteiro
0	Sem iluminação	Parcialmente iluminado	Iluminado por luz artificial
6	Sem iluminação	Parcialmente iluminado	Iluminado por luz artificial
12	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
18	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
24	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado
30	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste	Iluminação direta de poste
36	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste	Iluminação direta de poste
42	Parcialmente iluminado	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste
48	Sem iluminação	Parcialmente iluminado	Iluminação direta de poste
54	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
60	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
66	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
72	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
78	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
84	Sem iluminação	Sem iluminação	Sem iluminação
90	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
96	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
102	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
108	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
114	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado
120	Sem iluminação	Sem iluminação	Parcialmente iluminado

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela VI: Coleta temperatura às 5 h

Metragem	Calçada [°C]	Asfalto [°C]	Canteiro [°C]
0	20,3	23,5	16,1
6	22,0	22,3	25,0
12	21,9	23,0	17,5
18	20,5	22,8	16,8
24	20,2	21,8	16,1
30	19,5	22,4	14,8
36	20,5	22,0	20,8
42	20,5	20,4	13,1
48	20,3	20,3	13,7
54	21,0	19,9	12,7
60	20,4	20,3	14,0
66	20,5	20,2	14,0
72	20,2	20,4	14,2
78	21,1	20,0	13,1
84	20,3	19,9	13,0
90	20,7	19,6	13,3
96	20,6	20,9	13,3
102	20,0	21,0	12,6
108	20,9	19,6	13,3
114	21,3	21,8	12,2
120	22,7	25,2	14,4

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela VII: Coleta temperatura às 9 h

Metragem	Calçada [°C]	Asfalto [°C]	Canteiro [°C]
0	24,0	41,3	34,3
6	25,2	39,7	38,0
12	25,9	32,4	28,4
18	25,0	40,1	26,6
24	24,7	31,1	26,6
30	23,8	40,0	23,4
36	33,5	39,2	25,7
42	25,6	38,5	33,4
48	24,2	40,8	35,7
54	28,1	30,6	39,8
60	24,4	25,6	31,5
66	24,3	29,7	34,3
72	24,7	29,8	35,9
78	24,5	27,9	42,6
84	23,7	30,5	34,7
90	24,1	25,2	33,1
96	26,5	28,1	39,6
102	24,5	31,8	35,6
108	25,2	32,3	36,8
114	27,9	26,8	31,6

120	37,5	40,0	37,1
-----	------	------	------

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela VIII: Coleta temperatura às 15 h

Metragem	Calçada [°C]	Asfalto [°C]	Canteiro [°C]
0	37,0	41,3	40,2
6	41,6	35,7	46,8
12	42,1	37,4	41,9
18	43,0	43,3	41,3
24	35,1	48,9	35,7
30	34,2	50,4	34,9
36	29,5	37,0	43,1
42	31,9	32,0	40,4
48	33,0	36,0	38,3
54	38,0	36,8	27,7
60	34,9	31,3	29,2
66	34,4	32,7	28,9
72	30,5	31,3	26,8
78	30,1	30,2	31,8
84	39,5	37,5	34,0
90	37,8	35,3	37,1
96	40,4	39,8	30,4
102	37,9	40,8	24,6
108	41,3	47,4	30,3
114	45,4	51,1	26,1
120	47,4	53,0	31,9

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela IX: Coleta temperatura às 18 h

Metragem	Calçada [°C]	Asfalto [°C]	Canteiro [°C]
0	29,7	33,6	24,8
6	29,9	30,5	36,0
12	28,9	31,4	24,9
18	31,2	31,3	24,3
24	28,2	33,2	23,5
30	29,5	32,8	20,1
36	28,1	30,4	30,3
42	27,8	27,9	20,4
48	28,1	28,4	21,5
54	30,0	27,5	20,6
60	29,6	27,3	18,9
66	29,4	26,8	18,4
72	26,8	26,2	18,5
78	26,0	25,5	18,9
84	29,8	26,8	19,6
90	29,6	26,7	18,8
96	30,0	28,1	17,2

102	28,4	29,2	17,2
108	31,3	30,2	21,6
114	31,8	33,3	19,2
120	33,4	35,9	22,6

Fonte: Aatoria própria, 2024

Tabela X: Coleta temperatura às 21 h

Metragem	Calçada [°C]	Asfalto [°C]	Canteiro [°C]
0	25,3	29,0	20,5
6	27,1	26,7	31,1
12	26,6	26,9	21,4
18	26,2	28,0	21,8
24	24,7	28,0	18,4
30	25,5	28,0	17,9
36	25,1	27,0	25,8
42	24,5	25,0	17,8
48	24,2	24,0	16,1
54	25,5	23,2	15,7
60	25,0	23,0	16,2
66	25,1	23,3	15,0
72	24,1	23,4	15,7
78	24,5	23,2	15,9
84	25,0	22,8	14,6
90	24,6	22,6	14,6
96	25,0	24,5	15,3
102	23,9	25,1	14,0
108	25,8	23,4	16,8
114	24,5	27,4	13,3
120	27,1	30,3	16,0

Fonte: Aatoria própria, 2024

APÊNDICE B

Rodovia:	Puc	Segmento:	C1	Sentido:	Crescente	Amostra:	1
Data:	03/08/2024	km:	0,000	Faixa:	1	Avaliador:	-
CADASTRO				TIPOS DE DEFEITO (DNIT 061/2004 - TER)			
Nº Placa	DEFEITO	Nº Placa	DEFEITO				
1		11		1. Alçamento de placas 2. Fissura de canto 3. Placa dividida 4. Degrau de junta		10. Desgaste superficial 11. Bombeamento 12. Quebras localizadas 13. Passagem de nível	
2		12		5. Defeito na selagem das juntas 6. Desnível pavimento acostamento 7. Fissuras lineares 8. Grandes reparos		14. Rendilhado e escamação 15. Fissuras de retração plástica 16. Quebra de canto 17. Esborcinamento de juntas	
3		13		9. Pequenos reparos		18. Placa bailarina	
				TIPOS DE DEFEITOS	GRAUS DE SEVERIDADE	Nº DE PLACAS AFETADAS	% DE PLACAS AFETADAS
4		14		5B	Baixo	2	10%
5		15					
6		16	5B				
7		17					
8		18					
9		19	5B				
				VALOR DEDUZÍVEL TOTAL			
				2			
10		20		VALOR DEDUZÍVEL CORRIGIDO (VDC) q =			
				2,0			
				IPC = 100 - VDC		98,0	CONCEITO
							Excelente

APÊNDICE C

Tabela XI: Resultados LTE

Placa	Via	Barra de Transferência	D0	D30	LTE
IA - IE	DIREITA	Não Consta	38,4	31,7	83%
IE - II	DIREITA	Não Consta	30	24,9	83%
II - IM	DIREITA	Não Consta	34,5	29,8	86%
IM - IQ	DIREITA	Não Consta	34,1	26,6	78%
IQ - IU	DIREITA	Não Consta	57,6	19,0	33%
IU - IIA	DIREITA	Não Consta	31,2	24,2	78%
IIA - IIE	DIREITA	Não Consta	28,6	23,8	83%
IIE - III	DIREITA	Não Consta	28,3	23,0	81%
III - IIM	DIREITA	Não Consta	30,9	26,1	84%
IIM - IIQ	DIREITA	Não Consta	32,3	25,8	80%
IIQ - IIU	DIREITA	Não Consta	31,1	24,1	77%
IIU - ILY	DIREITA	Não Consta	27,6	22,1	80%
ILY - IIIA	DIREITA	Não Consta	28,9	23,0	80%
IB - IF	DIREITA	Não Consta	29,7	19,9	67%
IF - IJ	DIREITA	Não Consta	22,8	18,7	82%
IJ - IN	DIREITA	Não Consta	28,5	23,6	83%
IN - IR	DIREITA	Não Consta	29,3	23,6	81%
IR - IV	DIREITA	Não Consta	41,3	13,3	32%
IV - IIB	DIREITA	Não Consta	25,9	19,8	76%
IIB - IIF	DIREITA	Não Consta	23,2	18,8	81%
IIF - IIJ	DIREITA	Não Consta	24,8	21,1	85%
IIJ - IIN	DIREITA	Não Consta	29,6	23,6	80%
IIN - IIR	DIREITA	Não Consta	30,9	24,4	79%
IIR - IIV	DIREITA	Não Consta	29,6	24,0	81%
IIV - IIZ	DIREITA	Não Consta	26,3	21,5	82%
IIZ - IIIA	DIREITA	Não Consta	27,5	21,6	79%
IC - IG	ESQUERDA	Não Consta	26,9	21,6	80%
IG - IK	ESQUERDA	Não Consta	25,9	21,7	84%
IK - IO	ESQUERDA	Não Consta	27,3	23,6	86%
IO - IS	ESQUERDA	Não Consta	29,6	23,7	80%
IS - IW	ESQUERDA	Não Consta	27,5	14,5	53%
IW - IIC	ESQUERDA	Não Consta	28,32	19,2	68%
IIC - IIG	ESQUERDA	Não Consta	30,2	24,3	80%
IIG - IIK	ESQUERDA	Não Consta	31	25,4	82%
IIK - IIO	ESQUERDA	Não Consta	27,8	22,0	79%
IIO - IIS	ESQUERDA	Não Consta	29,7	21,7	73%
IIS - IIW	ESQUERDA	Não Consta	29,3	22,7	77%
IIW - IIAa	ESQUERDA	Não Consta	25,8	21,4	83%
IIAa - IIIB	ESQUERDA	Não Consta	25,9	21,1	81%
ID - IH	ESQUERDA	Não Consta	29,3	25,0	85%
IH - IL	ESQUERDA	Não Consta	35	27,5	79%

IL - IP	ESQUERDA	Não Consta	32,2	26,5	82%
IP - IT	ESQUERDA	Não Consta	35,8	30,3	85%
IT - IX	ESQUERDA	Não Consta	49,8	17,9	36%
IX - IID	ESQUERDA	Não Consta	30,5	23,7	78%
IID - IIH	ESQUERDA	Não Consta	25,5	24,6	96%
IIH - IIL	ESQUERDA	Não Consta	29,7	25,1	85%
IIL - IIP	ESQUERDA	Não Consta	31,8	27,4	86%
IIP - IIT	ESQUERDA	Não Consta	28,7	22,2	77%
IIT - IIAX	ESQUERDA	Não Consta	29,2	23,6	81%
IIAX - IIAb	ESQUERDA	Não Consta	28,8	24,0	83%
IIAb - IIIB	ESQUERDA	Não Consta	32,7	25,6	78%
IIIB - IIIC	DIREITA	Não Consta	30,7	25,5	83%
IIIC - IIIE	DIREITA	Não Consta	37,7	30,4	81%
IIIE - IVA	DIREITA	Não Consta	26,2	23,0	88%
IVA - VA	DIREITA	Não Consta	29,6	25,3	85%
VA - VC	DIREITA	Não Consta	64	23,6	37%
VC - VE	DIREITA	Não Consta	59	22,2	38%
VE - VIA	DIREITA	Não Consta	54,8	20,6	38%
VIA - VIC	DIREITA	Não Consta	56,2	20,1	36%
VIC - VIE	DIREITA	Não Consta	35	29,1	83%
VIE - VIIA	DIREITA	Não Consta	44,4	25,7	58%
VIIA - VIIC	DIREITA	Não Consta	52,6	20,6	39%
VIIC - VIIE	DIREITA	Não Consta	45,4	21,3	47%
VIIE - VIIIA	DIREITA	Não Consta	83	26,9	32%
VIIIA - VIIIC	DIREITA	Não Consta	99,7	31,4	31%
VIIIC - VIIIE	DIREITA	Não Consta	82,9	29,3	35%
VIIIE - VIIIG	DIREITA	Não Consta	76	27,1	36%
VIIIG - IXA	DIREITA	Não Consta	84	34,6	41%
IXA - IXC	DIREITA	Não Consta	39	30,6	78%
IXC - IXE	DIREITA	Não Consta	59,2	23,5	40%
IXE - XA	DIREITA	Não Consta	43,3	20,2	47%
XA - XC	DIREITA	Não Consta	47,4	18,3	39%
XC - XE	DIREITA	Não Consta	51,4	20,6	40%
XE - XIA	DIREITA	Não Consta	55,6	22,3	40%
XIA - XIC	DIREITA	Não Consta	49,6	27,4	55%
XIC - XIE	DIREITA	Não Consta	54,9	22,5	41%
XIE - XIIA	DIREITA	Não Consta	32,9	25,6	78%
XIIA - XIIIC	DIREITA	Não Consta	37,2	25,7	69%
XIIIC - IIID	ESQUERDA	Não Consta	35,6	29,5	83%
IIID - IIIF	ESQUERDA	Consta	32	26,1	82%
IIIF - IVB	ESQUERDA	Não Consta	29,1	23,9	82%
IVB - VB	ESQUERDA	Consta	25,4	22,4	88%
VB - VD	ESQUERDA	Não Consta	57,4	22,4	39%
VD - VF	ESQUERDA	Não Consta	50,3	21,4	43%
VF - VIB	ESQUERDA	Não Consta	47,9	20,0	42%

SISTEMA DE INFRAESTRUTURA URBANA
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

VIB - VID	ESQUERDA	Não Consta	48,5	20,7	43%
VID - VIF	ESQUERDA	Consta	32	18,2	57%
VIF - VIIB	ESQUERDA	Não Consta	58,7	23,1	39%
VIIB - VIID	ESQUERDA	Não Consta	47,1	19,7	42%
VIID - VIIF	ESQUERDA	Consta	37,2	18,4	49%
VIIF - VIIIB	ESQUERDA	Não Consta	78,3	26,7	34%
VIIIB - VIIID	ESQUERDA	Não Consta	75,4	26,0	34%
VIIID - VIIIF	ESQUERDA	Consta	34,5	28,6	83%
VIIIF - VIIIH	ESQUERDA	Não Consta	42,7	28,6	67%
VIIIH - IXB	ESQUERDA	Não Consta	58,6	23,1	39%
IXB - IXD	ESQUERDA	Consta	30,3	24,8	82%
IXD - IXF	ESQUERDA	Não Consta	57,7	23,7	41%
IXF - XB	ESQUERDA	Não Consta	42,9	32,6	76%
XB - XD	ESQUERDA	Consta	35,2	23,9	68%
XD - XF	ESQUERDA	Não Consta	42,6	19,7	46%
XF - XIB	ESQUERDA	Não Consta	45	20,1	45%
XIB - XID	ESQUERDA	Consta	31,2	24,9	80%
XID - XIF	ESQUERDA	Não Consta	48,5	20,7	43%
XIF - XIIB	ESQUERDA	Não Consta	44,8	24,9	56%
XIIB - XIID	ESQUERDA	Consta	30	25,6	85%
XIID - XIIF	ESQUERDA	Não Consta	34,9	20,7	59%

Fonte: Autoria própria, 2026

ANEXO D

Este Anexo apresenta todos os ensaios de sondagem realizados, realizado pela Helix Engenharia E Geotecnia Ltda.

CLIENTE: PUC - Campinas.					SONDAGEM A PERCUSSÃO	
OBRA: Sondagem a Percussão - Estudo para reforço de pavimento					SP01	
LOCAL: Dependências Internas - PUCCAMP - Campinas, SP.					INÍCIO: 06/05/24 TÉRMINO: 06/05/24 COTA: 694,02	

Cota em Relação ao R.N.	Amostras	ENSAIO PENETRO-MÉTRICO (Golpes/cm)	Número de Golpes (30 cm finais)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 34,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	Profundidade da Camada
NÍVEL D'ÁGUA				10 20 30 40 50 60 70	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	
					Piso existente (asfalto + base e sub-base de brita + rachão).	0.23
					Argila silto arenosa, vermelha escura (aterro).	0.60
					Silte argilo arenoso, com vestígios de rocha em decomposição, mole a médio, marrom claro, amarelo claro/escuro (solo residual).	3.45
					- Limite da sondagem - - NFE : nível d'água não foi encontrado -	
					Obs.: A parada da sondagem se deu conforme orientações da contratante	

PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA

INICIAL: NFE em 06/05/24

FINAL: NFE em 06/05/24

----- SPT ESTIMADO

———— SPT 30 cm FINAIS

AVANÇO A TRADO: 0,00 m a 3,45 m

AVANÇO POR LAVAGEM:

PROF. DO REVESTIMENTO:

REFERÊNCIA: 21.965/2024

DATA: 07/05/24

ESCALA VERT.: 1/100



HELIX
Engenharia e Geotecnia
s/c Ltda

HELIX ENGENHARIA E GEOTECNIA S/C LTDA

LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)			DESENHO No.: 6549
TEMPO	DE	PARA	FOLHA No.: 1
			RESP. TÊC.:

CLIENTE: PUC - Campinas.				SONDAGEM A PERCUSSÃO			
OBRA: Sondagem a Percussão - Estudo para reforço de pavimento				SP02			
LOCAL: Dependências Internas - PUCCAMP - Campinas, SP.				INÍCIO: 06/05/24 TÉRMINO: 06/05/24 COTA: 692,23			
Cota em Relação ao R.N.	Amostras	ENSAIO PENETRO-MÉTRICO (Golpes/cm)	Número de Golpes (30 cm finais)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 34,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	Profundidade da Camada	
NÍVEL D'ÁGUA				10 20 30 40 50 60 70	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA		
*NFE	1	2 15 2 15 2 15	4		Piso existente (asfalto + base e sub-base de brita + rachão).	0.21	
690	2	3 15 3 15 3 15	6		Argila silto arenosa, vermelha escura (aterro).	0.47	
	3	3 15 3 15 4 15	7		Argila silto arenosa, mole, vermelha escura.	1.47	
					Silte argilo arenoso, com vestígios de rocha em decomposição, médio, marrom claro (solo residual).	3.45	
					- Limite da sondagem - - NFE : nível d'água não foi encontrado -		
					Obs.: A parada da sondagem se deu conforme orientações da contratante		
PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA				AVANÇO A TRAÇO: 0,00 m a 3,45 m			
INICIAL: NFE em 06/05/24				AVANÇO POR LAVAGEM:			
FINAL: NFE em 06/05/24				PROF. DO REVESTIMENTO:			
 HELIX Engenharia e Geotecnia s/c Ltda				REFERÊNCIA: 21.965/2024		LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)	
				DATA: 07/05/24		TEMPO DE PARA	
				ESCALA VERT.: 1/100		DESENHO No.: 6550	
						FOLHA No.: 1	
						RESP. TÉCN.: _____	

CLIENTE: PUC - Campinas.				SONDAGEM A PERCUSSÃO			
OBRA: Sondagem a Percussão - Estudo para reforço de pavimento				SP03			
LOCAL: Dependências Internas - PUCCAMP - Campinas, SP.				INÍCIO: 06/05/24		TÉRMINO: 06/05/24	
				COTA: 690,04			
Cota em Relação ao R.N.	Amostras	ENSAIO PENETROMÉTRICO (Golpes/cm)	Número de Golpes (30 cm finais)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 34,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	Profundidade da Camada	
NÍVEL D'ÁGUA				10 20 30 40 50 60 70	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA		
					Piso existente (asfalto + base e sub-base de brita + rachão).	0.20	
					Argila silto arenosa, vermelha escura (aterro).	0.86	
					Argila silto arenosa, mole, vermelha escura.		
					Silte argilo arenoso, com vestígios de rocha em decomposição, médio, amarelo claro/escuro (solo residual).	2.45	
						3.45	
					- Limite da sondagem - - NFE : nível d'água não foi encontrado -		
					Obs.: A parada da sondagem se deu conforme orientações da contratante		
PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA				AVANÇO A TRADO: 0,00 m a 3,45 m			
INICIAL: NFE em 06/05/24				AVANÇO POR LAVAGEM:			
FINAL: NFE em 06/05/24				PROF. DO REVESTIMENTO:			
 HELIX Engenharia e Geotecnia s/c Ltda				REFERÊNCIA: 21.965/2024		DESENHO No.: 6551	
				DATA: 07/05/24		FOLHA No.: 1	
				ESCALA VERT.: 1/100		RESP. TÉC.:	
				LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)			
				TEMPO		DE	
						PARA	

[illegible]

CLIENTE: PUC - Campinas.					SONDAGEM A PERCUSSÃO				
OBRA: Sondagem a Percussão - Estudo para reforço de pavimento					SP05				
LOCAL: Dependências Internas - PUCCAMP - Campinas, SP.					INÍCIO: 06/05/24 TÉRMINO: 06/05/24 COTA: 684,28				

Cota em Relação ao R.N.	Amostras	ENSAIO PENETROMÉTRICO (Golpes/cm)	Número de Golpes (30 cm finais)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES	REVESTIMENTO: Ø 63.5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 34.9 mm Ø EXTERNO: 50.8 mm PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	Profundidade da Camada
NÍVEL D'ÁGUA				10 20 30 40 50 60 70	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	
					Piso existente (asfalto + base e sub-base de brita + rachão).	0.21
					Argila silto arenosa, vermelha escura (aterro).	0.85
					Argila silto arenosa, média, vermelha escura.	
					- Limite da sondagem - - NFE : nível d'água não foi encontrado - Obs.: A parada da sondagem se deu conforme orientações da contratante	3.45

PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA

INICIAL: NFE em 06/05/24

FINAL: NFE em 06/05/24

--- SPT ESTIMADO

— SPT 30 cm FINAIS

AVANÇO A TRADO: 0,00 m a 3,45 m

AVANÇO POR LAVAGEM:

PROF. DO REVESTIMENTO:

 HELIX Engenharia e Geotecnia s/c Itaa	REFERÊNCIA:	LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)			DESENHO No.:
		TEMPO	DE	PARA	6553
	DATA:				FOLHA No.:
	ESCALA VERT.:				1
HELIX ENGENHARIA E GEOTECNIA S/C LTDA		1/100			RESP. TÉCN.:

CLIENTE: PUC - Campinas.				SONDAGEM A PERCUSSÃO			
OBRA: Sondagem a Percussão - Estudo para reforço de pavimento				SP06			
LOCAL: Dependências Internas - PUCCAMP - Campinas, SP.				INÍCIO: 06/05/24		TÉRMINO: 06/05/24	
				COTA: 682,13			
Cota em Relação ao R.N.	Amostras	ENSAIO PENETRO-MÉTRICO (Golpes/cm)	Número de Golpes (30 cm finais)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 34,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	Profundidade da Camada	
NÍVEL D'ÁGUA				10 20 30 40 50 60 70	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA		
*NFE	1	3 4 4 15 15 15	8		Piso existente (asfalto + base e sub-base de brita + rachão).	0.22	
680	2	2 3 3 15 15 15	6		Argila silto arenosa, vermelha escura (aterro).	0.45	
	3	3 3 3 15 15 15	6		Argila silto arenosa, média, vermelha escura.		
					- Limite da sondagem - - NFE : nível d'água não foi encontrado -		3.45
					Obs.: A parada da sondagem se deu conforme orientações da contratante		
PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA				AVANÇO A TRAÇO: 0,00 m a 3,45 m			
INICIAL: NFE em 06/05/24				AVANÇO POR LAVAGEM:			
FINAL: NFE em 06/05/24				PROF. DO REVESTIMENTO:			
 HELIX Engenharia e Geotecnia s/c Ltda				REFERÊNCIA: 21.965/2024		LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)	
				DATA: 07/05/24		TEMPO DE PARA	
				ESCALA VERT.: 1/100		DESENHO No.: 6554	
						FOLHA No.: 1	
						RESP. TÉC.:	