

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

NICOLLY LIMA DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL, PAVIMENTO DE  
CONCRETO ARMADO E PAVIMENTO DE CONCRETO COM A IMPLEMENTAÇÃO  
DE BARRAS DE FIBRA DE VIDRO**

São Carlos -SP  
2025

NICOLLY LIMA DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL, PAVIMENTO DE  
CONCRETO ARMADO E PAVIMENTO DE CONCRETO COM A IMPLEMENTAÇÃO  
DE BARRAS DE FIBRA DE VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho.

São Carlos-SP  
2025

NICOLLY LIMA DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL, PAVIMENTO DE  
CONCRETO ARMADO E PAVIMENTO DE CONCRETO COM A IMPLEMENTAÇÃO  
DE BARRAS DE FIBRA DE VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de São Carlos, como parte  
dos requisitos para a conclusão da  
graduação em Engenharia Civil.

São Carlos, 14 de fevereiro de 2025.

---

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho, UFSCar - SP

---

Prof. Dr. Diego de Oliveira Martins, UFSCar - SP

---

Prof. Dr. Marcelo Takeda, UFSCar - SP

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde ao longo de toda esta jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando, pela paciência, dedicação e por compartilhar seu conhecimento. Suas orientações foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Edivaldo e Cristiana, e aos meus irmãos, Natália e Otávio, pelo apoio incondicional, pelo amor e por acreditarem no meu potencial em todos os momentos. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu companheiro de vida, José Ivo, pela paciência e por estar sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua presença foi meu alicerce e sua confiança em mim me deu força para superar cada obstáculo.

Às minhas amigas de faculdade, Maria Isabel, Gabriela, Laiane e Letícia, por compartilharem momentos de incentivo, por estarem ao meu lado nos períodos mais difíceis e por trazerem leveza e alegria a essa caminhada. Obrigada por cada palavra de encorajamento e por acreditarem em mim.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional durante esta trajetória, minha eterna gratidão.

## RESUMO

A pavimentação no Brasil é classificada como rígida, semi rígida e flexível. Esses pavimentos diferem quanto aos materiais empregados, suas camadas de suporte, gastos envolvidos, métodos de dimensionamento e desempenho em relação a diversos tráfegos. A escolha entre eles impacta diretamente os custos de construção e manutenção das vias, influenciando, assim, sua viabilidade econômica. Este estudo faz uma análise comparativa entre os dois formatos mais prevalentes: o pavimento rígido, que utiliza concreto de cimento Portland, e o pavimento flexível, que utiliza asfalto. As características técnicas, bem como as vantagens, desvantagens e utilizações de ambos os tipos, foram detalhadas. Além disso, a pesquisa avaliou a adição de barras de fibra de vidro em pavimentos urbanos de concreto, que atuam como reforço secundário, aumentando a resistência à tração e possibilitando a diminuição da espessura do concreto. Este estudo comparou os pavimentos flexível, que utiliza asfalto, e rígido, com concreto de cimento Portland. O pavimento flexível teve um custo total de R\$139.839,47, sendo a opção mais econômica, enquanto o pavimento rígido com barras de aço apresentou um custo de R\$176.913,90. O pavimento rígido com barras de fibra de vidro (GFRP) teve o maior custo, R\$275.696,90, mas oferece maior durabilidade e resistência à corrosão. Portanto, a decisão sobre usar pavimentos flexíveis ou rígidos deve levar em conta não só o custo inicial, mas também a durabilidade, a manutenção e a sustentabilidade da estrada.

**Palavras-chave:** pavimento rígido; pavimento flexível; reforço do pavimento; fibra de vidro; gerência do pavimento.

## ABSTRACT

Rigid, Semi-Rigid, and Flexible pavement types are used in Brazil, differing in materials, support layers, costs, design methods, and performance under various traffic conditions. The choice among them directly impacts construction and maintenance costs, influencing economic feasibility. This study presents a comparative analysis of the two most prevalent types: rigid pavement, which uses Portland cement concrete, and flexible pavement, which uses asphalt. The technical characteristics, advantages, disadvantages, and applications of both types were detailed. Additionally, the research evaluated the incorporation of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars in urban concrete pavements, which act as secondary reinforcement, increasing tensile strength and allowing for a reduction in concrete thickness. This study compared flexible pavements, which use asphalt, and rigid pavements, which use Portland cement concrete. The flexible pavement had a total cost of R\$139,839.47, making it the most economical option, while the rigid pavement with steel bars had a cost of R\$176,913.90. The rigid pavement with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars had the highest cost, R\$275,696.90, but offered greater durability and corrosion resistance. Therefore, the decision to use flexible or rigid pavements should consider not only initial cost but also durability, maintenance, and road sustainability.

**Keywords:** rigid pavement; flexible pavement; pavement reinforcement; glass fiber; pavement management.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA</b>	<b>13</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
4.1 PAVIMENTO	16
4.2 ESTRUTURA DO PAVIMENTO	16
<b>4.2.1 Subleito</b>	<b>17</b>
<b>4.2.2 Regularização</b>	<b>17</b>
<b>4.2.3 Reforço de Subleito</b>	<b>17</b>
<b>4.2.4 Base e Sub-base</b>	<b>18</b>
<b>4.2.5 Revestimento</b>	<b>18</b>
4.3 PAVIMENTO FLEXÍVEL	18
4.4 PAVIMENTO SEMI RÍGIDO	20
4.5 PAVIMENTO RÍGIDO	20
<b>4.5.1 Tipos de Pavimento Rígido</b>	<b>21</b>
4.5.1.1 Pavimento de Concreto Simples (PCS)	22
4.5.1.2 Pavimento de Concreto Armado (PCA)	22
4.5.1.3 Pavimento de Concreto Protendido (PCPRO)	23
<b>4.5.2 Tipo de juntas no pavimento de concreto</b>	<b>24</b>
4.5.2.1 Juntas de Construção	24
4.5.2.2 Juntas de Isolamento	24
4.5.2.3 Juntas de Expansão	24
4.5.2.4 Juntas de Contração	25
4.6 COMPARATIVO ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO E FLEXÍVEL	25
4.7 CONCRETO REFORÇADO COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO	26
<b>4.7.1 Características de GFRP</b>	<b>28</b>
<b>4.7.2 Propriedades das barras de GFRP</b>	<b>28</b>
4.7.2.1 Coeficiente de expansão térmica	29
4.7.2.2 Resistência à tração	30
4.7.2.3 Resistência ao cisalhamento	30
4.7.2.4 Fadiga	31
<b>4.7.3 Fatores que influenciam a aderência entre barras de GFRP e o concreto</b>	<b>32</b>
4.7.3.1 Diâmetro da barra	32
4.7.3.2 Posição das barras na seção transversal do concreto	33
4.7.3.3 Resistência à compressão do concreto	34
<b>5. METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
<b>6. DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS</b>	<b>37</b>
6.1 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL	37
5.2 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO	41
<b>5.2.1 Juntas</b>	<b>48</b>
5.3 DIMENSIONAMENTO DE CONCRETO COM GFRP	50

5.4 COMPARATIVO DE CUSTOS	54
<b>7. ANÁLISE E DISCUSSÃO</b>	<b>57</b>
6.1 COMPARATIVO TÉCNICO ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL E RÍGIDO	57
<b>6.1.1 Construção</b>	<b>57</b>
<b>6.1.2 Manutenção</b>	<b>58</b>
<b>6.1.3 Segurança</b>	<b>59</b>
6.2 DIMENSIONAMENTO E DESEMPENHO ESTRUTURAL	60
6.3 ANÁLISE ECONÔMICA	61
6.4 IMPACTOS AMBIENTAIS	62
<b>8. CONCLUSÕES</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>65</b>

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Comparativo entre o pavimento flexível e rígido.....	25
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das barras de aço e fibra de vidro.....	29
Tabela 2 - Valores dos coeficientes de expansão térmica (°C).....	29
Tabela 3 - Resistência à tração das barras de GFRP.....	30
Tabela 4 - Dados para dimensionamento do pavimento flexível.....	37
Tabela 5 - Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	38
Tabela 6 - Coeficiente de Equivalência estrutural.....	39
Tabela 7 - Dados para dimensionamento do pavimento de concreto.....	41
Tabela 8 - Dimensões básicas para as três configurações de eixo.....	42
Tabela 9 - Dimensões x e d para situação de carregamento no interior e na borda da placa.....	44
Tabela 10 - Número N de Blocos da carta de influência para eixos simples.....	45
Tabela 11 - Número N de Blocos da carta de influência para eixo tandem duplo.....	45
Tabela 12 - Número N de Blocos da carta de influência para eixo tandem triplo.....	46
Tabela 13 - Momento atuante no interior e na borda da placa.....	46
Tabela 14 - Valor de $k_6$ .....	47
Tabela 15 - Valor de $k_3$ obtido na tabela.....	47
Tabela 16 - Armadura inferior.....	48
Tabela 17 - Diâmetro das barras de transferência.....	49
Tabela 18 - Barras de transferência.....	49
Tabela 19 - Dados para o dimensionamento.....	50
Tabela 20 - Cálculo da resistência do concreto à tração.....	51
Tabela 21 - Cálculo da armadura de retração.....	51
Tabela 22 - Cálculo da tensão de retração.....	52
Tabela 23 - Flexão no concreto.....	52
Tabela 24 - Cálculo da armadura inferior.....	53
Tabela 25 - Cálculo da armadura superior.....	53
Tabela 26 - Orçamento do pavimento flexível.....	54
Tabela 27 - Orçamento do pavimento rígido armado.....	55
Tabela 28 - Orçamento do pavimento rígido utilizando barra de fibra de vidro.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha rodoviária pavimentada.....	11
Figura 2 - Esquema de seção transversal do pavimento.....	17
Figura 3 - Deformação elástica pela carga no pavimento flexível.....	19
Figura 4 - Seção transversal típica do pavimento flexível.....	19
Figura 5 - Seção transversal típica do pavimento semi rígido.....	20
Figura 6 - Deformação elástica pela carga no pavimento rígido.....	21
Figura 7 - Placa de concreto de cimento Portland.....	21
Figura 8 - Placa de pavimento de concreto simples.....	22
Figura 9 - Seção transversal de placa de pavimento de concreto armado.....	23
Figura 10 - Sem transferência de carga (esquerda); Total transferência de carga (direita).....	23
Figura 11 - Estacionamento interno de um shopping - Berlim, Alemanha.....	27
Figura 12 - 3º Ponte - Ontário, Canadá.....	27
Figura 13 - Barra de fibra de vidro.....	28
Figura 14 - Distribuição de tensão normal em uma barra GFRP sob carregamento axial.....	32
Figura 15 - Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais em virtude da segregação e acúmulo de água.....	33
Figura 16 - Resultado do dimensionamento do pavimento flexível.....	40
Figura 17 - Ilustração do posicionamentos dos eixos no interior da placa.....	43
Figura 18 - Ilustração dos posicionamentos dos eixos na borda da placa.....	43

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte rodoviário é responsável pela movimentação de 65% das cargas e 95% pelo transporte dos passageiros, a escolha do tipo de pavimento tem implicações significativas nos custos de implantação, manutenção e na durabilidade das rodovias (Figura 1). Entretanto, a má qualidade da infraestrutura viária é um desafio persistente, agravado por uma malha pavimentada que cobre apenas 12,4% do território nacional, sendo predominantemente composta por pavimentos flexíveis que exigem manutenção frequente (CNT, 2024).

Figura 1- Malha rodoviária



Fonte: Adaptado de CNT, 2024.

As estruturas viárias podem ser classificadas em pavimentos flexíveis ou rígidos, conforme suas características construtivas e comportamento mecânico. O pavimento flexível, predominantemente composto por camadas asfálticas, adapta-se mais facilmente às deformações do subleito e distribui as cargas aplicadas de maneira gradativa ao longo de suas camadas. Por outro lado, o pavimento rígido, elaborado com concreto de cimento Portland, oferece maior longevidade e demanda menos manutenção, sendo uma alternativa vantajosa para vias de alto tráfego e condições adversas. Nos últimos anos, têm sido exploradas soluções inovadoras, como a incorporação de barras de fibra de vidro (GFRP) em pavimentos de concreto, destacando-se por sua elevada resistência à tração, imunidade à corrosão e potencial para reduzir a espessura da estrutura.

Embora o uso de GFRP em pavimentos já seja consolidado em países como Canadá e Estados Unidos, no Brasil essa tecnologia ainda enfrenta desafios devido à ausência de regulamentação específica e estudos aplicados. Nesse contexto, a comparação entre pavimentos flexíveis, rígidos convencionais e rígidos com reforço

de GFRP representa uma oportunidade de explorar soluções inovadoras que possam melhorar a durabilidade, reduzir custos e minimizar impactos ambientais na infraestrutura viária.

Além disso, a execução e a manutenção dos pavimentos desempenham um papel essencial na garantia de sua funcionalidade e durabilidade. O pavimento asfáltico, por ser mais flexível, está sujeito a deformações plásticas, fissuração por fadiga e formação de panelas ao longo do tempo, exigindo manutenções mais frequentes, como recapeamento e tapa-buracos, que apesar de mais simples, representam um custo recorrente. Já o pavimento de concreto destaca-se pela sua rigidez e menor necessidade de reparos frequentes, apresentando maior resistência a deformações e fissuras. No entanto, quando a manutenção é necessária, os reparos costumam ser mais complexos e onerosos, podendo envolver a substituição de placas inteiras. Nesse contexto, estratégias inovadoras, como o uso GFRP, surgem como uma alternativa promissora para reduzir custos de manutenção, melhorar o desempenho estrutural e aumentar a vida útil das vias.

Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre o pavimento flexível e o pavimento rígido, avaliando seus desempenhos técnicos, econômicos e estruturais. Além disso, busca-se verificar a viabilidade do uso de GFRP em pavimentos urbanos no Brasil, contribuindo para ampliar o conhecimento técnico e fomentar o uso de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

## 2. JUSTIFICATIVA

Considerando que o transporte rodoviário é predominante no Brasil, onde é responsável por transportar 65% das cargas e 95% dos passageiros, a análise dos diferentes tipos de pavimento adequados ao território nacional torna-se essencial para garantir a qualidade, eficiência e segurança das rodovias. A escolha correta do tipo de pavimentação é um fator crítico, pois impacta diretamente os custos de implantação, manutenção e operação, além de influenciar a durabilidade e o desempenho da malha viária.

O Brasil enfrenta desafios expressivos no que diz respeito à infraestrutura rodoviária. Atualmente, aproximadamente 78,5% das estradas continuam sem qualquer tipo de pavimentação, enquanto a qualidade das vias já pavimentadas muitas vezes não atende aos padrões desejáveis. Entre as rodovias pavimentadas, que correspondem a apenas 12,4% da malha viária total, a grande maioria utiliza pavimento flexível (CNT 2024). Essa predominância está associada à tradição na aplicação desse tipo de revestimento e ao seu menor custo inicial em comparação ao pavimento rígido. No entanto, os pavimentos flexíveis demandam manutenção mais frequente, o que pode gerar custos elevados ao longo de sua vida útil.

Além disso, os gastos com manutenção das estradas existentes, somados à baixa durabilidade de muitos pavimentos devido a falhas de execução, escolha inadequada de materiais ou ausência de planejamento estratégico, tornam imprescindível a avaliação criteriosa do tipo de pavimentação a ser adotado. Esse cenário reforça a necessidade de estudos que analisem as condições técnicas, econômicas e de desempenho dos pavimentos, a fim de orientar decisões mais eficientes para a restauração e construção de novas estradas.

Diante desse contexto, destaca-se a importância de comparar os tipos de pavimentação disponíveis, como os pavimentos flexíveis, rígidos e rígidos com reforço de barras de fibra de vidro (GFRP). Esse último, embora ainda pouco utilizado no Brasil, apresenta vantagens promissoras, como maior resistência à tração, redução da espessura necessária do concreto e maior durabilidade, especialmente em condições de tráfego intenso e exposição a ambientes agressivos.

Este estudo, delimitado a uma abordagem comparativa, baseou-se em uma ampla pesquisa bibliográfica, reunindo informações de livros, manuais técnicos,

repositórios acadêmicos e bases de dados científicas. A análise busca estabelecer critérios normativos, econômicos e de desempenho para auxiliar na escolha do tipo de pavimentação mais adequado às condições brasileiras, promovendo melhorias na malha rodoviária, maior eficiência para o setor produtivo e melhores condições para o transporte de passageiros.

### 3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho dos pavimentos flexível e de concreto armado e com a implementação de barras de fibra de vidro (GFRP), analisando sua segurança, conforto, economia e sustentabilidade.

Para isso, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar os conceitos fundamentais da pavimentação, destacando a estrutura, as características e as propriedades dos diferentes tipos de pavimentos;
- Analisar as vantagens e desvantagens de cada tipo de pavimento, evidenciando suas principais diferenças e aplicações práticas;
- Dimensionar um pavimento de concreto armado com barras de fibra de vidro, avaliando o impacto dessa inovação no desempenho estrutural;
- Comparar pavimentos flexíveis, rígidos convencionais e rígidos reforçados com fibra de vidro.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta seção, foram apresentados os conceitos teóricos que embasam este trabalho, incluindo definições sobre pavimentos flexíveis e rígidos, além do uso de barras de fibra de vidro.

### **4.1 PAVIMENTO**

O pavimento é composto por camadas sucessivas de materiais compactados, que se estendem a partir do subleito da via, formando uma estrutura projetada para suportar o tráfego de veículos de maneira eficiente e com o menor custo possível. Segundo Balbo (2007), a pavimentação de uma estrada melhora a capacidade operacional do tráfego, ao criar uma superfície mais uniforme e aderente, garantindo aos usuários maior conforto no deslocamento e mais segurança, especialmente em condições de pista úmida ou molhada.

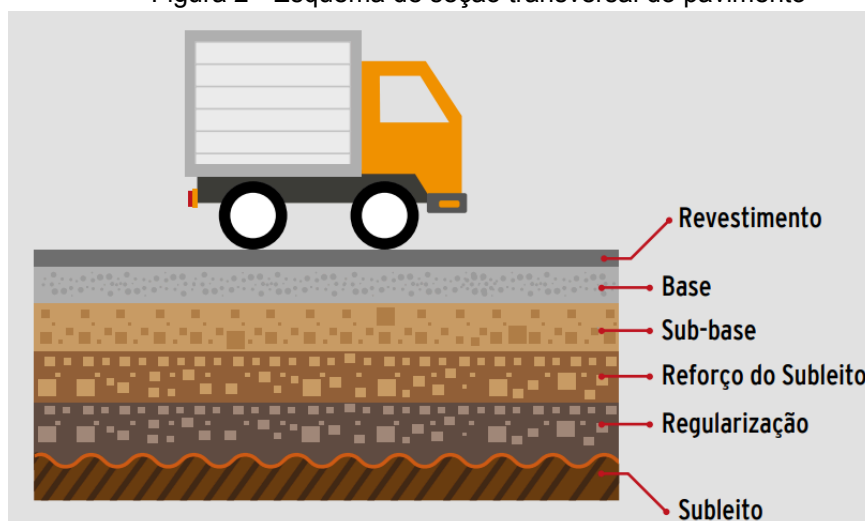
As estruturas de pavimento são projetadas para suportar cargas repetidas ao longo de sua vida útil, prevenindo danos estruturais que ultrapassem os limites toleráveis. Os principais tipos de desgaste considerados no dimensionamento são a deformação permanente e a fadiga. Para um dimensionamento adequado, é crucial compreender as características dos materiais que compõem o pavimento, como resistência à ruptura, permeabilidade e comportamento diante da repetição de cargas e das mudanças climáticas.

De acordo com Balbo (2007), os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semi-rígidos ou rígidos, dependendo das características da sua base estrutural. Quando a base é granular, o pavimento apresenta maiores deflexões e tensões no subleito, caracterizando um comportamento flexível. Em contrapartida, quando a base é de concreto, o pavimento se comporta de forma rígida, com deflexões e tensões reduzidas no subleito.

### **4.2 ESTRUTURA DO PAVIMENTO**

Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que proporcionam condições adequadas de suporte e rolamento em quaisquer condições climáticas. Na Figura 2 é possível visualizar quais são essas camadas.

Figura 2 - Esquema de seção transversal do pavimento



Fonte: Adaptado de CNT, 2017.

Com isso, será apresentado na seção seguinte as principais camadas que constituem o pavimento e suas respectivas funções.

#### **4.2.1 Subleito**

De acordo com Balbo (2007), o subleito é um bloco maciço de terra que serve de base para o pavimento ou revestimento. Embora não seja considerado uma camada do pavimento, ele funciona como a fundação sobre a qual a estrutura será assentada. Assim, o subleito corresponde à etapa final da terraplanagem, sendo essencial que o pavimento o proteja das tensões geradas pelo tráfego. Composto por materiais naturais, como solos, o subleito é submetido a um processo de compactação durante a construção.

#### **4.2.2 Regularização**

A regularização é uma camada de material granular ou solo compactado aplicada sobre o subleito de uma rodovia antes da construção das camadas do pavimento. Seu principal objetivo é corrigir irregularidades, melhorar a capacidade de suporte e proporcionar uma superfície uniforme para a base ou sub-base do pavimento.

#### **4.2.3 Reforço de Subleito**

O reforço do subleito consiste em uma camada granular incorporada ao pavimento com a finalidade de aumentar a capacidade de suporte do subleito e

reduzir a espessura da sub-base. Quando o subleito apresenta baixa resistência, torna-se necessário adicionar uma camada adicional para melhorar sua capacidade de suporte e minimizar as tensões transmitidas a essa fundação, sendo essa camada denominada reforço do subleito.

Conforme Balbo (2007), sua aplicação não é obrigatória, pois espessuras maiores das camadas de base e sub-base já conseguem atenuar os esforços que atingem o subleito. No entanto, o autor destaca que a adoção do reforço do subleito pode ser vantajosa economicamente, pois utiliza materiais de menor custo.

#### **4.2.4 Base e Sub-base**

A base é a camada responsável por suportar os esforços verticais gerados pelo tráfego de veículos, distribuindo-os para o subleito e servindo de suporte para o revestimento.

De acordo com Balbo (2007), quando a espessura da base se torna muito grande, seja por questões construtivas ou econômicas, ela pode ser dividida em duas camadas, originando a sub-base. A sub-base atua como uma camada corretiva do subleito e complementar à base, desempenhando as mesmas funções desta. Sua execução é indicada quando a redução da espessura da base se mostra mais vantajosa do ponto de vista econômico.

#### **4.2.5 Revestimento**

O revestimento é a camada do pavimento responsável por absorver os impactos gerados pelo tráfego, resultantes do contato entre os pneus e a superfície da via. Essa camada suporta tanto os esforços estáticos quanto dinâmicos, devendo resistir às solicitações sem apresentar deformações elásticas ou plásticas excessivas, além de evitar outros tipos de falhas.

Segundo Balbo (2007), os revestimentos devem ser constituídos por materiais fortemente aglutinados ou organizados de modo a impedir deslocamentos horizontais. Exemplos comuns incluem blocos intertravados, placas de concreto, concreto compactado com rolo e misturas asfálticas.

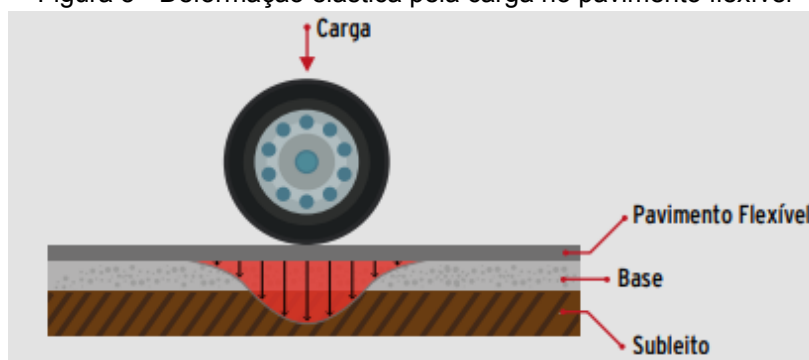
### **4.3 PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Os pavimentos flexíveis, frequentemente associados às estruturas asfálticas,

são formados por uma camada de revestimento asfáltico, que se apoia sobre as camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Essas camadas são compostas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem o uso de agentes cimentantes.

A configuração do pavimento pode ser ajustada conforme fatores como volume de tráfego, capacidade de suporte do subleito, rigidez e espessura das camadas, além das condições ambientais, o que pode levar à eliminação de algumas camadas. Conforme a CNT (2017), todas as camadas sofrem deformações elásticas consideráveis. A carga gerada pelo tráfego se distribui de maneira relativamente uniforme entre elas, concentrando as tensões nas proximidades do ponto onde a carga é aplicada, conforme ilustrado na Figura 3.

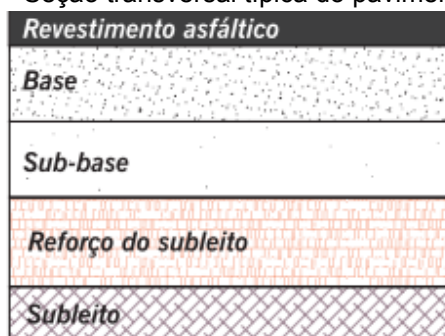
Figura 3 - Deformação elástica pela carga no pavimento flexível



Fonte: Adaptado de CNT, 2017.

Uma seção transversal de um pavimento flexível é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Seção transversal típica do pavimento flexível



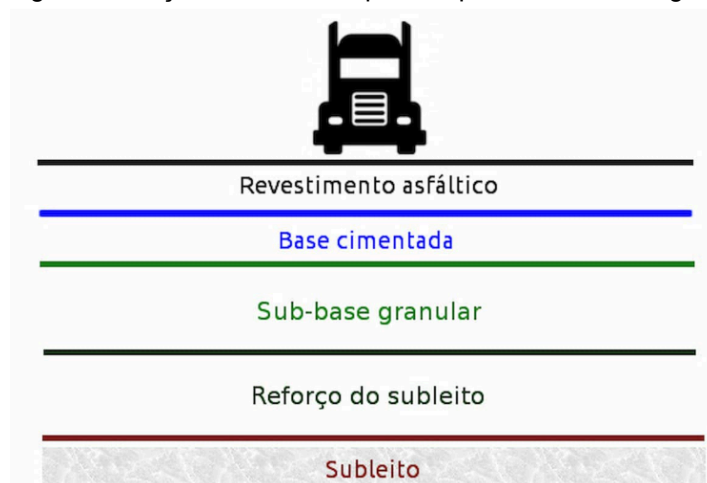
Fonte: Adaptado de BERNUCCI, *et al*, 2006.

Nos pavimentos asfálticos, a razão da rigidez do revestimento em relação às demais camadas granulares não é tão elevada como no caso do revestimento de concreto de cimento Portland, fazendo com que as tensões sejam compartilhadas entre as diversas camadas, proporcionalmente à rigidez (material e geometria).

#### 4.4 PAVIMENTO SEMI RÍGIDO

O pavimento semi rígido é uma solução de pavimentação que combina características dos pavimentos flexíveis e rígidos. Ele é composto principalmente por uma camada de base granular ou estabilizada, coberta por uma camada de mistura betuminosa (asfalto) que dá uma maior flexibilidade ao pavimento (Figura 5). Esse tipo de pavimento é considerado semi rígido porque, embora tenha um comportamento mais rígido em comparação com os pavimentos flexíveis, não alcança a rigidez de um pavimento de concreto.

Figura 5 - Seção transversal típica do pavimento semi rígido



Fonte: Adaptado de Master Plate, 2025.

O pavimento semi-rígido pode ser executado de duas maneiras principais. No método direto, a camada de revestimento asfáltico é colocada diretamente sobre a base cimentada. Já no método indireto/invertido, o revestimento é aplicado sobre uma sub-base granular, que oferece maior flexibilidade e facilita a adaptação do pavimento às condições do solo. A escolha do método depende das características do solo e das necessidades do projeto.

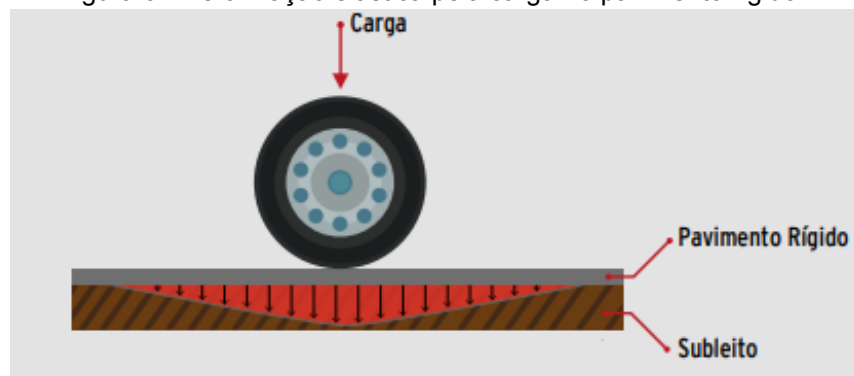
#### 4.5 PAVIMENTO RÍGIDO

Os pavimentos rígidos, em geral associados aos de concreto de cimento Portland, são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento, assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário.

No caso de pavimentos de concreto de cimento Portland, devido à elevada

rigidez do revestimento em relação às demais camadas, as cargas de superfície são distribuídas por uma grande área em relação à área de contato pneu-pavimento, aliviando dessa forma as tensões transmitidas às camadas subjacentes (Figura 6).

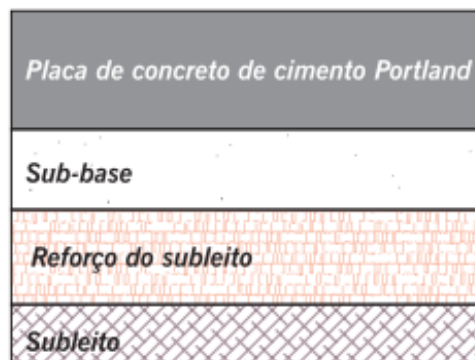
Figura 6 - Deformação elástica pela carga no pavimento rígido



Fonte: Adaptado de CNT, 2017.

Uma seção transversal de um pavimento rígido é apresentada na Figura 7. Devido à camada de revestimento absorver quase todos os esforços, o pavimento rígido possui um número menor de camadas em comparação com o pavimento flexível.

Figura 7 - Placa de concreto de cimento Portland



Fonte: Adaptado de BERNUCCI, *et al*, 2006.

Sendo assim, abordou-se os principais tipos de pavimento rígido e suas particularidades na seção seguinte.

#### 4.5.1 Tipos de Pavimento Rígido

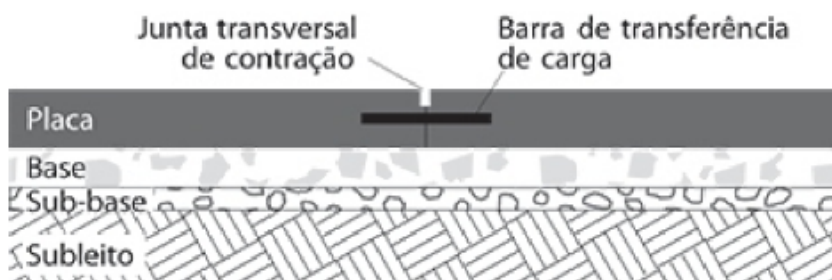
Existem diversos tipos de pavimento rígido, mas a seguir, de acordo com Balbo (2009), será tratado alguns dos principais tipos.

#### 4.5.1.1 Pavimento de Concreto Simples (PCS)

O pavimento de concreto simples (PCS) é um tipo de pavimento sem armadura, composto por placas de concreto moldadas no local e separadas por juntas transversais e longitudinais. Essas placas são apoiadas sobre uma base e o subleito. As placas podem ser fabricadas com concreto comum, concreto de alta resistência ou concreto compactado com rolo.

O principal objetivo da serragem de juntas igualmente espaçadas é minimizar a retração hidráulica da massa de concreto fresca, especialmente em áreas e volumes grandes. As barras de transferência de carga, instaladas nas juntas transversais, são o tipo de aço empregado na construção do pavimento.

Figura 8 - Placa de pavimento de concreto simples



Fonte: Adaptado de BALBO, 2009.

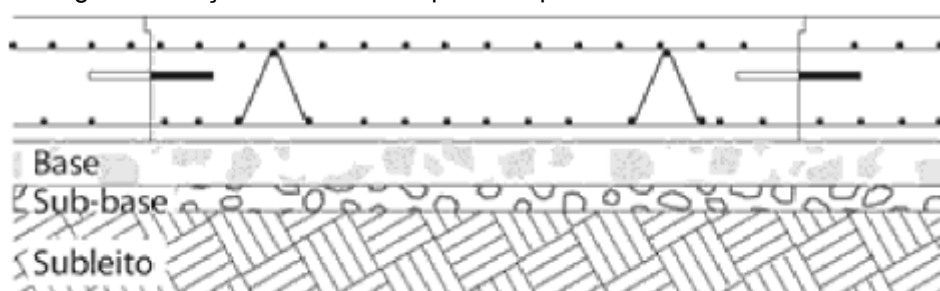
As barras de ligação são dispostas nas juntas longitudinais do pavimento para evitar o deslocamento horizontal relativo entre as placas lateralmente dispostas devido ao engastamento da armadura de ambas as placas de concreto.

Algumas vezes, é necessário usar uma armadura de retração em forma de tela acima da linha neutra, permitindo a execução de placas de maior comprimento sem uma armadura destinada a reduzir os esforços de tração.

#### 4.5.1.2 Pavimento de Concreto Armado (PCA)

Segundo Balbo (2006), o pavimento de concreto armado é composto por várias placas reforçadas, sendo que essas placas possuem dimensões planas maiores do que as do pavimento de concreto simples (PCS), o que implica na necessidade reduzida de barras de ligação e transferência de carga durante a sua construção.

Figura 9 - Seção transversal de placa de pavimento de concreto armado



Fonte: Adaptado de BALBO, 2009.

De acordo com o DNIT (2005), o uso desse tipo de pavimento é recente no Brasil, sendo mais comum em pátios, embora também esteja sendo aplicado em rodovias. A principal vantagem deste pavimento é a diminuição da espessura das placas e o maior espaçamento entre as juntas, o que resulta em menores custos de manutenção, devido à menor extensão das juntas, além de ser mais durável, pois não está sujeito aos problemas de fadiga.

#### 4.5.1.3 Pavimento de Concreto Protendido (PCPRO)

Ainda de acordo com Balbo (2006), o pavimento de concreto protendido permite a execução de placas de concreto massivas planas de grandes dimensões e espessuras menores sem juntas de contração (Figura 10).

Figura 10 - pavimentos de concreto protendido



Fonte: Adaptado de Além da Inércia, 2018.

Ao contrário do PCA, que permite detalhamento de armaduras para resistência de concreto inferior às dos tradicionais PCS, o PCPRO tem como requisito

normal uma elevada resistência à compressão do concreto, pela necessidade de imposição de esforços primários de protensão e compressão.

#### **4.5.2 Tipo de juntas no pavimento de concreto**

De acordo com Rodrigues (2008), os pavimentos de concreto podem desenvolver fissuras transversais e longitudinais devido às tensões causadas por empenamentos e variações no volume das placas. Para controlar essas fissuras, são aplicadas juntas, que consistem em áreas enfraquecidas e distribuídas de maneira uniforme ao longo do pavimento. Essas juntas têm a função de orientar o surgimento das fissuras em locais específicos e permitir que as placas de concreto se expandem ou contraem conforme necessário. Entre os tipos mais comuns de juntas utilizadas nos pavimentos estão: junta de contração, junta de expansão, junta de construção e junta de isolamento.

##### **4.5.2.1 Juntas de Construção**

Segundo Balbo (2009), para o caso de juntas de construção, a fissura não é induzida para a região pois a separação entre as placas ocorre naturalmente e é necessário apenas a selagem superficial da junta.

##### **4.5.2.2 Juntas de Isolamento**

O objetivo principal das juntas de isolamento é permitir que uma placa de concreto se movimente sem causar esforços em outros componentes estruturais, como os pilares. Os esforços imprevistos que podem afetar esses elementos podem ser causados pelo movimento da placa de concreto em contato com eles.

Para a proteção dos elementos estruturais, são executadas caixas de isolamento que são perímetros sem a placa de concreto ao redor do elemento estrutural, preenchido com um material de pavimentação flexível.

##### **4.5.2.3 Juntas de Expansão**

De acordo com Colim (2009), às juntas de expansão são usadas quando as placas de pavimentação de concreto se unem a estruturas como pontes ou viadutos, ou quando um novo pavimento se une a um velho. Em áreas de transição, eles são usados para separar segmentos de pavimentação de objetos relativamente imóveis.

As juntas de dilatação não são necessárias, a menos que a laje de concreto

seja colocada próxima a uma estrutura que não esteja sujeita às mesmas variações de temperatura e umidade. Nestes casos, as juntas de dilatação são críticas para acomodar o movimento diferencial dos elementos. Isso evita trincas e danos estruturais que comprometem a integridade e a durabilidade da estrutura.

#### 4.5.2.4 Juntas de Contração

As juntas de contração são instaladas tanto no sentido transversal quanto no longitudinal para controlar a formação de fissuras de retração e definir o formato das placas de concreto. A configuração dessas placas influencia diretamente o comportamento estrutural do pavimento diante das cargas aplicadas e das variações ambientais.

### 4.6 COMPARATIVO ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO E FLEXÍVEL

Com base nas características e propriedades dos pavimentos flexíveis e rígidos, torna-se essencial realizar um comparativo entre ambos, evidenciando suas vantagens e limitações em diferentes contextos de aplicação. A seguir, foi apresentado no quadro 1 o comparativo que sintetiza os principais aspectos desses dois tipos de pavimento.

Quadro 1 - Comparativo entre o pavimento flexível e rígido

<b>Pavimentos rígidos</b>	<b>Pavimentos flexíveis</b>
Estrutura mais delgada de pavimento	Estrutura mais espessas
Resistente a ataques químicos (óleo, graxas, combustíveis)	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleo, graxas, combustíveis)
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança.	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas aversas.
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções.	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos ao tráfego e custos elevados.
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade.	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais durável).
Vida útil mínima de 20 anos.	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção).

<p>Maior segurança à derrapagem em função da textura dada à superfície (veículo precisa de 16% menos de distância de frenagem em superfície seca, em superfície molhada 40%.</p>	<p>A superfície é muito escorregadia quando molhada</p>
<p>O concreto é feito com materiais locais, a mistura é feita a frio e a energia consumida é a elétrica.</p>	<p>O asfalto é derivado de petróleo importado, misturado normalmente a quente, consome óleo combustível e divisas.</p>
<p>Melhores características de drenagem superficial: escoamento melhor a água superficial.</p>	<p>Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos.</p>

Fonte: Adaptado de BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008

Ao analisar as diferenças entre os pavimentos flexíveis e rígidos, é possível observar as vantagens e limitações de cada tipo, especialmente em termos de resistência e durabilidade. No entanto, com o avanço das tecnologias de materiais, surge a possibilidade de otimizar o desempenho dos pavimentos rígidos através da utilização de materiais inovadores, como as barras de fibra de vidro (GFRP). Este novo conceito oferece uma alternativa ao uso de armaduras convencionais, proporcionando maior resistência à tração e flexibilidade, além de reduzir o peso e o custo de manutenção. A seguir, será abordado o pavimento de concreto com a implementação de barras de fibra de vidro, destacando seus benefícios e potenciais aplicações.

#### **4.7 CONCRETO REFORÇADO COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO**

O uso da barra de fibra de vidro em lajes de concreto já vem sendo aplicado em diversos países pelo mundo, isso para aumentar a capacidade de deformação destes materiais e auxiliar na capacidade de resistir maiores solicitações de tração. Nas Figuras 11, pode-se observar a construção de um estacionamento interno de um shopping, na Alemanha.

Figura 11 - Estacionamento interno de um shopping - Berlim, Alemanha



Fonte: Adaptado de Vergalight, 2006.

Na Figura 12, pode-se observar a execução de uma ponte, no Canadá.

Figura 12 - 3ª Ponte - Ontário, Canadá



Fonte: Adaptado de Vergalight, 2008.

No Brasil, recentemente, algumas indústrias iniciaram a produção das barras e telas de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), porém não existem normas brasileiras que abordam o assunto ainda. As barras de GFRP são pré fabricados, têm uma seção circular e provêm de fibras de vidro de alta resistência alinhadas numa direção, sua geometria se apresenta através de um enrolamento em espiral, o que permite aumentar a capacidade de aderência nestes materiais compósitos (Figura 13).

Figura 13 - Barra de fibra de vidro



Fonte: Adaptado de Aprenda Engenharia, 2023.

A corrosão da armadura de aço causada por agentes deletérios está diretamente relacionada à durabilidade do concreto armado. A partir dessa perspectiva, as barras de GFRP parecem ser uma alternativa viável para substituir a armadura de aço. O material também tem a vantagem de não ser magnético e muito menos condutor elétrico.

#### **4.7.1 Características de GFRP**

Conforme Rodrigues *et al.* (2022), os polímeros reforçados com fibras de vidro resultam da combinação de dois ou mais materiais, sendo a resina e as fibras de reforço os principais componentes.

Barras de fibra de vidro cobertas com polímero são um substituto para reforço tradicional em concreto. Essas barras são compostas de um núcleo de fibras fortes (naturais ou sintéticas), que são esticadas e embutidas em uma matriz polimérica (resina).

A eficiência das barras de GFRP depende de múltiplos fatores, incluindo as propriedades mecânicas das fibras, seu conteúdo, orientação, comprimento, tipo e composição, bem como a qualidade da fixação entre a fibra e a matriz polimérica. A distribuição uniforme das fibras diminui a probabilidade de falhas nas áreas mais suscetíveis.

#### **4.7.2 Propriedades das barras de GFRP**

As propriedades mecânicas das barras variam significativamente com o tipo de resina e fibra, orientação da fibra, efeitos dimensionais e controle de qualidade da

produção. Além disso, como todos os materiais estruturais, suas propriedades mecânicas também são afetadas pelo tipo de duração do carregamento pela temperatura e pela umidade (ACI 440 1R, 2015).

Na tabela 1 é possível observar as propriedades das barras de aço e de fibra de vidro.

Tabela 1 - Propriedades das barras de aço e de fibra de vidro

	Aço	GRFP
Tensão de escoamento (MPa)	276 a 517	-
Resistência à tração (MPa)	483 a 690	483 a 1600
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	35 a 51
Resistência à compressão (MPa)	276 a 414	310 a 482
Massa específica ( $g/cm^3$ )	7,9	1,25 - 2,10
Deformação de Ruptura (%)	6,0 a 12,0	1,2 a 3,1

Fonte: Adaptado do ACI 440 1R, 2015.

#### 4.7.2.1 Coeficiente de expansão térmica

Os coeficientes de expansão térmica das barras de GFRP variam nas direções longitudinal e transversal, dependendo do tipo de fibra, resina e fração volumétrica da fibra.

Polímeros reforçados com fibras tem uma expansão térmica na direção transversal muito superior que na direção longitudinal é maior que a expansão térmica do concreto endurecido. A diferença entre o coeficiente de transversal de expansão térmica de barras de GFRP e o concreto pode causar fissuras no concreto sob aumento de temperatura. A Tabela 2 apresenta os valores dos coeficientes de expansão térmica das barras de fibra de vidro, de aço e concreto.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de expansão térmica ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ )

Direção	Aço	GRFP	Concreto
Longitudinal $\alpha_L$	6,5	6,0 a 10,0	7,2 a 10,8
Transversal $\alpha_T$	6,5	21,0 a 23,0	7,2 a 10,8

Fonte: Adaptado do ACI 440 1R, 2015.

#### 4.7.2.2 Resistência à tração

As barras de GFRP quando carregadas alcançam sua resistência última sem apresentar comportamento plástico, ou seja, rompem no patamar de escoamento. A resistência à tração e rigidez de uma barra de GFRP (Tabela 3) é dependente de vários fatores como resistência da resina e da fibra, a cura, o processo de fabricação e o controle de qualidade da fabricação da barra (ACI 440.1R-15).

Tabela 3 - Resistência à tração das barras de FRP

Diâmetro (mm)	Seção Transversal ( $mm^2$ )	Resistência à Tração (MPa)
9	71	900
13	127	740
16	198	655
19	285	620
22	388	585

Fonte: Adaptado de COUTO, 2017.

As barras de fibra de vidro não podem ser dobradas após a fabricação, com exceção a alguns casos como uma barra de resina termoplástica que pode ser remodelada com adição de calor e pressão. Pode haver uma redução da resistência de cerca de 40 a 50% na região da dobra em comparação com a resistência à tração de uma barra reta. Isto ocorre devido às concentrações de tensões e curvatura das fibras na zona quebrada (ACI 440 1R, 2015).

Segundo o ACI 440 1R, 2015, o módulo de elasticidade à tração das barras de fibra de vidro é 75% menor do que o das barras de aço.

#### 4.7.2.3 Resistência ao cisalhamento

Os fios de fibra de vidro têm baixa capacidade de resistência ao cisalhamento devido à direção longitudinal das fibras, portanto, a capacidade de resistência ao cisalhamento é derivada principalmente da resina. Como as camadas geralmente não são reforçadas pela matriz interlaminar, a força da ligação interlaminar é determinada pela matriz polimérica fraca.

O ACI 440.1R-15 estabelece diretrizes para o uso das barras GFRP em situações de cisalhamento, enfatizando a necessidade de limitar as tensões

cortantes aplicadas e de adotar fatores de redução para compensar a fragilidade do material. O guia recomenda evitar esforços cortantes diretos em barras GFRP, utilizando estratégias de projeto como a introdução de reforços auxiliares ou o ajuste no espaçamento de estribos realizados com esse material. Além disso, as condições ambientais, como umidade e temperatura, devem ser consideradas, pois podem impactar a resistência ao cisalhamento.

#### **4.7.2.4 Fadiga**

A fadiga é um fenômeno caracterizado pela degradação progressiva do material quando submetido a ciclos repetidos de carregamento e descarregamento. Em barras de fibra de vidro reforçadas com polímero (GFRP), a fadiga é uma questão importante no projeto de estruturas de concreto armado sujeitas a esforços cíclicos, como pontes e outras obras submetidas a tráfego constante (ACI 440.1R-15).

A fadiga nas barras GFRP ocorre devido à interação entre suas fibras, matriz polimérica e a interface entre elas. Entre os principais mecanismos que levam à deterioração do material estão:

- Degradação das fibras: As fibras de vidro podem apresentar microfissuras ou perda progressiva de resistência devido à repetição de ciclos de tensão.
- Danos na matriz polimérica: A matriz pode desenvolver microtrincas, reduzindo sua capacidade de transmitir tensões às fibras.
- Falhas na interface fibra-matriz: A perda de aderência entre as fibras e a matriz compromete a eficiência estrutural do material.
- Acúmulo de danos: Pequenos defeitos que se acumulam ao longo de vários ciclos podem levar a falhas estruturais severas.

As barras GFRP exibem uma boa resistência à fadiga em comparação ao aço em certas condições, mas seu comportamento é fundamentalmente diferente devido à natureza composta do material.

A resistência à fadiga em barras GFRP é determinada por meio de testes de carregamento cíclico, nos quais o material é submetido a amplitudes de carga repetitivas até a falha ou até um número predeterminado de ciclos. Estes testes ajudam a estabelecer os limites de resistência à fadiga do material e a orientar o projeto de estruturas em condições críticas (ACI 440.1R-15).

### 4.7.3 Fatores que influenciam a aderência entre barras de GFRP e o concreto

A aderência entre barras de GFRP e o concreto é influenciada por diversos fatores que determinam a eficiência estrutural e a durabilidade do sistema. Diversos fatores influenciam essa interação, e alguns dos mais relevantes foram destacados a seguir.

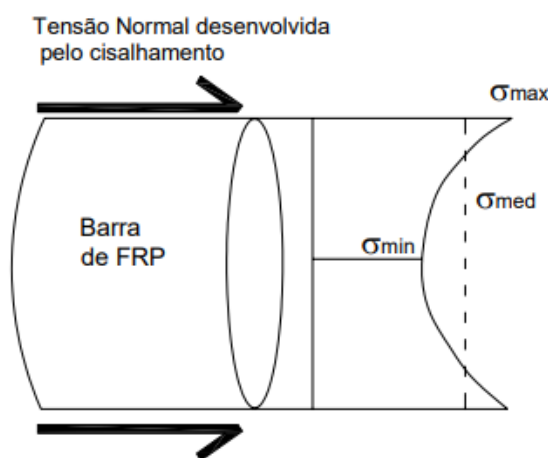
#### 4.7.3.1 Diâmetro da barra

O diâmetro da barra tem importante papel no comportamento da aderência entre concreto e barras de GFRP. Barras de grande diâmetro apresentam menor resistência de aderência que barras de diâmetro pequeno.

A resistência de aderência em barras de GFRP é afetada por sua pequena rigidez ao cisalhamento na direção axial. O valor da rigidez ao cisalhamento leva em consideração a rigidez ao cisalhamento da resina e a resistência na interface entre resina e fibra de vidro. Quando uma barra é submetida a uma força axial de tração, ocorrem deslocamentos diferenciais entre as fibras superficiais e as fibras situadas do centro da barra, resultando em uma distribuição de tensão normal não uniforme na seção transversal da barra (Couto, 2007).

Na Figura 14 é possível observar distribuição de tensão normal em uma barra GFRP sob carregamento axial.

Figura 14 - Distribuição de tensão normal em uma barra GFRP sob carregamento axial



Fonte: Adaptado de COUTO, 2007.

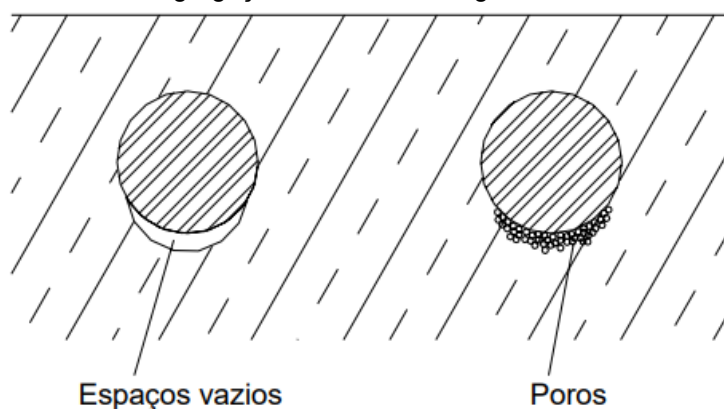
A resistência de aderência efetiva é medida por meio da tensão normal desenvolvida na superfície da barra ( $\sigma_{max}$ ). Por outro lado, a resistência da aderência

real, é proporcional à tensão normal média na seção transversal da barra ( $\sigma_{med}$ ). Com o aumento do diâmetro da barra essa diferença entre tensões aumenta, e a resistência de aderência real diminui. Como não é possível calcular a tensão média referente à média entre a tensão na zona mais externa e a tensão na zona mais interna da barra, para efeito de cálculo utiliza-se a resistência da aderência efetiva (Couto, 2007).

#### 4.7.3.2 Posição das barras na seção transversal do concreto

A posição da barra durante a concretagem interfere diretamente na resistência da aderência entre os materiais. Observa-se que a segregação do concreto fresco gera o acúmulo de água abaixo das armaduras. Posteriormente, essa água é absorvida pelo concreto endurecido ou evapora, criando vazios e poros na parte inferior das barras. Esses defeitos comprometem significativamente a aderência, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais em virtude da segregação e acúmulo de água



Fonte: Adaptado de COUTO, 2007

A posição das barras de FRP durante a moldagem do concreto afeta a aderência entre o concreto e as barras. Quando as barras são colocadas na posição horizontal, a exsudação da água de amassamento provoca o acúmulo de água abaixo delas. Além disso, os agregados maiores tendem a se deslocar para a parte inferior das barras durante o processo de adensamento, resultando na formação de vazios nessa região após a evaporação da água (Couto, 2007).

#### **4.7.3.3 Resistência à compressão do concreto**

O valor da resistência do concreto comparativamente com a resistência ao cisalhamento da superfície da barra afetam o modo de ruptura das barras de FRP. A resistência do concreto circunvizinho está diretamente relacionada com a ruptura da aderência durante o arrancamento.

Para concretos com resistência à compressão maior que 30 MPa, a ruptura da aderência ocorre na superfície da barra, conseqüentemente a resistência de aderência das barras de FRP não depende da resistência do concreto. Porém, para os concretos com menor resistência à compressão (15 MPa) o modo de ruptura da aderência é diferente, neste caso, a ruptura ocorre na matriz de concreto e, portanto, a resistência à compressão é significativa (Couto, 2007).

## 5. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo comparativo entre pavimentos flexíveis e rígidos com a implementação de barras de fibra de vidro segue uma abordagem estruturada e fundamentada em normas técnicas e literatura especializada.

Inicialmente, realizou-se um levantamento de informações sobre os pavimentos flexíveis e rígidos, incluindo suas características estruturais, processos construtivos e desempenho ao longo do tempo. Além disso, realizou-se uma pesquisa sobre o uso de barras de fibra de vidro em pavimentos urbanos de concreto, suas propriedades mecânicas e vantagens em relação às armaduras convencionais. As fontes consultadas para essa etapa incluem livros, normas técnicas nacionais e internacionais, manuais especializados e repositórios acadêmicos.

Em seguida, procedeu-se ao dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos, considerando parâmetros essenciais como capacidade estrutural, carga aplicada, comportamento mecânico dos materiais, durabilidade e custos associados.

Atualmente, o método mais divulgado e empregado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis é o método empírico, o qual é caracterizado no manual de pavimentação do DNIT (2006).

Já para o dimensionamento de pavimentos rígidos armado utilizou o manual de pavimentos rígidos do DNIT (2005). E para o dimensionamento do pavimento de concreto com a implementação da barra de fibras de vidro utilizou os parâmetros da NBR 17196 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024), onde estabelece critérios para a aplicação de materiais compósitos, em estruturas de concreto. Para isso, foram empregadas ferramentas computacionais, como o Microsoft Excel, para a realização de cálculos estruturais e análise dos resultados.

A análise comparativa contempla diversos critérios como segurança, conforto, economia e sustentabilidade. A partir desses dados, busca-se identificar a solução mais viável e eficaz.

Além disso, são levantadas vantagens e desvantagens de cada solução com base na literatura técnica e em estudos de caso anteriores, a fim de embasar de forma sólida a tomada de decisão sobre a escolha do tipo de pavimento mais adequado para diferentes cenários urbanos.

Por fim, a análise dos resultados e conclusões foram verificados os resultados e apresentadas as conclusões a respeito da viabilidade da execução de pavimentos flexíveis, armado e com barras de fibra de vidro.

## 6. DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS

Para alcançar o objetivo do presente trabalho, o dimensionamento do pavimento flexível foi realizado conforme o manual de pavimentação do DNIT (2006). Já para o dimensionamento de pavimentos rígidos armado utilizou o manual de pavimentos rígidos do DNIT (2005). E para o dimensionamento do pavimento de concreto com a implementação da barra de fibras de vidro utilizou os parâmetros da NBR 17196 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024).

### 6.1 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

Para realizar o dimensionamento do pavimento flexível, foi necessário determinar parâmetros essenciais, como o valor de California Bearing Ratio (CBR) do subleito, do reforço do subleito e da sub-base. Contudo, como não foi possível realizar os ensaios laboratoriais para obtenção desses valores, optou-se por utilizar dados fictícios. Dessa forma, o dimensionamento foi realizado com base nas informações apresentadas no Tabela 4. A via considerada foi unidirecional, com duas faixas de tráfego.

Tabela 4 – Dados para dimensionamento do pavimento flexível

Nº de veículos	850 veículos
Período	20 anos
Subleito	CBR = 5%
Reforço do subleito	CBR = 12%
Sub-base	CBR = 25%
Base	CBR $\geq$ 80%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o início dos cálculos, foi fundamental determinar o valor do número N. Esse parâmetro representa a quantidade acumulada de repetições de cargas que o pavimento suportará ao longo de sua vida útil, sendo um fator crucial para o dimensionamento adequado e para garantir a durabilidade da estrutura.

Para determinar o N, foi necessário definir previamente o volume de projeto e o volume total de tráfego, conforme indicado na Equação (1). O volume diário médio de veículos foi considerado linear. Com isso, a partir dessas informações, o número N é calculado utilizando a fórmula apresentada na Equação (2), que considera fatores como a conversão de veículos comerciais em eixos equivalentes, garantindo

um dimensionamento adequado às solicitações previstas.

$$Vt = 365 * P * Vm \quad (1)$$

Sendo:

P: Período

Vm: Número de veículos

$$Vt = 365 * 20 * 850 = 6.205.000 \text{ veíc}$$

Com isso, pode-se calcular o número N.

$$N = Vt * FC * FE \quad (2)$$

Sendo:

FC: Fator de Carga

FE: Fator de Equivalência

$$N = 6.205.000 * 0,986 * 1,48$$

$$N = 9,06 * 10^6$$

Com base no valor do número N e na tabela 5, foi possível definir que a espessura do revestimento adotado para o pavimento é de 7,5 cm.

Tabela 5 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

<b>N</b>	<b>ESPESSURA MÍNIMA DO REVESTIMENTO</b>
$N \leq 10^6$	TRATAMENTO SUPERFICIAIS
$10^6 < N \leq 5 * 10^6$	CBUQ - Espessura > 5,0 cm
$5 * 10^6 < N \leq 10^7$	CBUQ - Espessura > 7,5 cm
$10^7 < N \leq 5 * 10^7$	CBUQ - Espessura > 10,0 cm
$N > 5 * 10^7$	CBUQ - Espessura > 12,5 cm

Fonte: Adaptado do DNIT, 2006.

Para determinar as espessuras das camadas de base, sub-base e subleito, utilizou-se a equação (3).

$$H_t = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (3)$$

Obteve-se aproximadamente as seguintes espessuras totais para as camadas:

- Revestimento:  $R = 7,5$  cm
- Sub-base:  $H_{20} = 22$  cm
- Reforço do subleito:  $H_n = 38,5$  cm
- Subleito:  $H_m = 64$  cm

Com as espessuras totais das camadas definidas, foi possível determinar os valores do coeficiente de equivalência estrutural  $K$  (Tabela 6). Para calcular a contribuição estrutural de cada camada, realizou-se a multiplicação do valor de  $K$  pela espessura da respectiva camada. Como o revestimento adotado para o pavimento é de concreto betuminoso, o valor de  $K$  utilizado para esta camada é 2,0. Para as camadas de sub-base e de reforço do subleito, o valor de  $K$  foi 0,8 e 0,7 respectivamente.

Tabela 6 - Coeficiente de equivalência estrutural

<b>COMPONENTE DO PAVIMENTO</b>	<b>COEFICIENTE ESTRUTURAL (K)</b>
CONCRETO BETUMINOSO (CBUQ)	2,00
PRÉ-MISTURADO A QUENTE, DENSO (PMQ)	1,70
PRÉ-MISTURADO A FRIO, DENSO (PMF)	1,40
BASE OU CAPA DE PENETRAÇÃO	1,20
BASE GRANULAR	1,00
BASE DE SOLO-CIMENTADO ( $21 < RCS < 28$ kgf/cm <sup>2</sup> )	1,20
BASE DE SOLO-CIMENTADO ( $28 < RCS < 45$ kgf/cm <sup>2</sup> )	1,40
BASE DE SOLO-CIMENTADO ( $RCS > 45$ kgf/cm <sup>2</sup> )	1,70

Fonte: Adaptado do DNIT, 2006.

Com o valor de  $N$  já calculado e o coeficiente de equivalência estrutural ( $K$ ) definido, torna-se possível calcular as espessuras das camadas da base, sub-base e do reforço do subleito. Esse cálculo é fundamental para garantir que cada camada tenha a resistência necessária para suportar as cargas e assegurar a durabilidade do pavimento.

Para a camada de base, o cálculo de sua espessura foi realizado com base na equação 3.

$$K_R * R + K_B * B \geq H_{20} * 1,2 \quad (3)$$

$$2 * 7,5 + 1,0 * B \geq 26,39$$

$$B \geq 11,0 \text{ cm}$$

Sendo assim, foi adotada uma espessura de 11cm para a camada da base. Para a sub-base, obteve o seguinte resultado:

$$K_R * R + K_B * B + K_s * h_{20} > H_n \quad (4)$$

$$2 * 7,5 + 1 * 11 + 0,8 * h_{20} > 38,04$$

$$h_{20} \geq 15,0 \text{ cm}$$

Adotou-se, 15 cm para a espessura da camada de sub-base. E por fim, para a camada do reforço do subleito calculou-se:

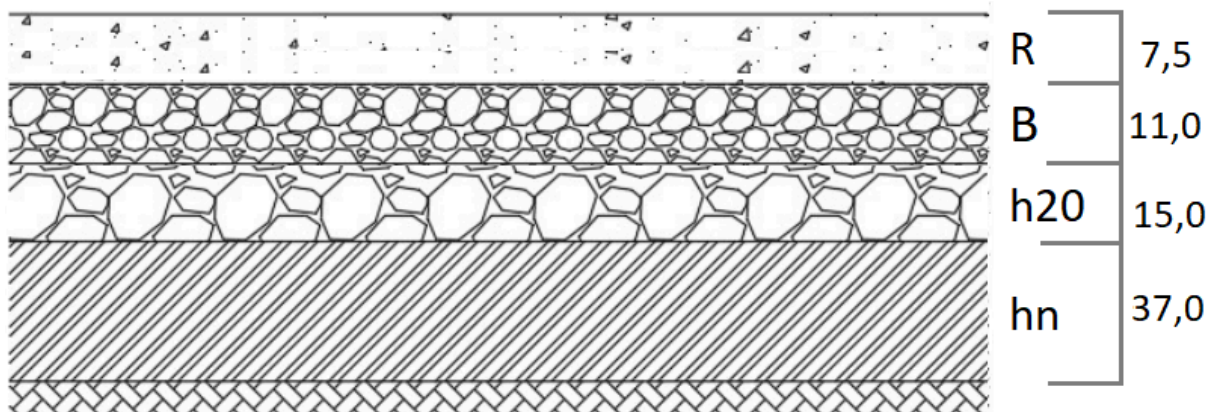
$$K_R * R + K_B * B + K_s * h_{20} + K_{Ref} * h_n > H_m \quad (5)$$

$$2 * 7,5 + 1 * 11 + 0,8 * 15 + 0,7 * h_n > 64,21 \text{ cm}$$

$$h_n \geq 37 \text{ cm}$$

Para o reforço do subleito, a espessura da camada foi de 37 cm. Com isso, é possível visualizar a seguir a dimensão das camadas.

Figura 16 – Resultado do dimensionamento do pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Silva; Silva, 2021.

O dimensionamento do pavimento flexível foi realizado com base nos parâmetros fornecidos, levando em consideração o tráfego total previsto durante o período de projeto e os valores de CBR das diferentes camadas. A espessura de cada camada foi definida de forma a atender às exigências normativas e garantir o desempenho estrutural do pavimento ao longo de sua vida útil. É importante destacar que a adequação das espessuras às condições locais, como tipo de solo, regime de tráfego e condições climáticas, é essencial para assegurar a durabilidade, a estabilidade e a eficiência do pavimento.

## 5.2 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO

De acordo com o DNIT (2005), o pavimento de concreto armado é um tipo de pavimento de concreto que utiliza armaduras para resistir às tensões causadas pelo tráfego, geralmente posicionadas na parte inferior da placa. Além disso, conta com armaduras na parte superior da placa para controlar os esforços de retração e empenamento.

Na Tabela 7, encontram-se os parâmetros iniciais para o dimensionamento do pavimento de concreto armado.

Tabela 7 - Dados para dimensionamento do pavimento de concreto

<b>Dados para o dimensionamento</b>	
CBR do subleito	5%
Sub-base	10
Tipo de concreto	Rolado
fck (concreto)	25
Coefficiente de Poisson do Concreto	0,15
Comprimento da placa (m)	15
Coefficiente de atrito placa/ sub-base	1,7
Carga máxima em eixo simples (kN)	100
Carga máxima em eixo tandem duplo (kN)	170
Carga máxima em eixo tandem triplo (kN)	250
Módulo de Elasticidade (MPa)	30000
Pressão de enchimento dos pneus (MPa)	0,7
Período de projeto	20 anos

Fonte: Autoria própria, 2024.

O dimensionamento do pavimento se inicia pela fixação de uma espessura tentativa, para a qual, em função das cargas atuantes e da resistência característica

do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ), irá definir a armadura. A espessura teste utilizada será de 20 cm.

O dimensionamento é realizado considerando o carregamento no interior da placa e na borda livre do pavimento. Realizou-se o cálculo da área de contato  $A$  ( $m^2$ ) do pneu e as suas dimensões  $L$  (comprimento) e  $W$  (largura). A área é calculada pela carga atuante em um pneu, em Newton (N), pela pressão de enchimento dos pneus, em Pa.

$$A = \frac{P_R}{q} \quad (6)$$

$$L = \sqrt{\frac{A}{0,523}} \quad (7)$$

$$W = 0,6 * L \quad (8)$$

Sendo:

$P_R$ : Carga atuante em um pneu, em Newton (N).

$q$ : pressão de enchimento dos pneus (Pa).

Os resultados podem ser observados na tabela 8.

Tabela 8 - Dimensões básicas para as três configurações de eixos

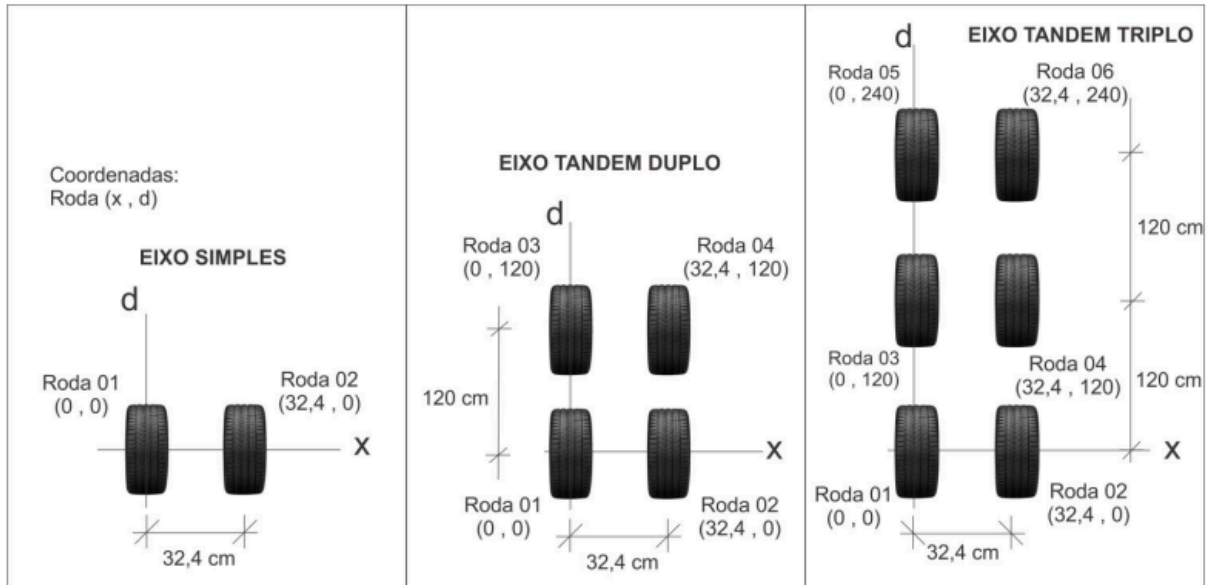
<b>Eixo Simples</b>	
Área de Contato do Eixo (m2)	0,0357
Comprimento L (m)	0,2613
Largura W (m)	0,1568
<b>Eixo Tandem Duplo</b>	
Área de Contato do Eixo (m2)	0,030
Comprimento L (m)	0,241
Largura W (m)	0,145
<b>Eixo Tandem Triplo</b>	
Área de Contato do Eixo (m2)	0,030
Comprimento L (m)	0,241
Largura W (m)	0,145

Fonte: Autoria própria, 2024.

O dimensionamento foi realizado em duas etapas, considerando a situação de carga no interior da placa, apresentando o posicionamento dos eixos adotados na Figura 17, enquanto que para a situação de carregamento na borda da placa, foi

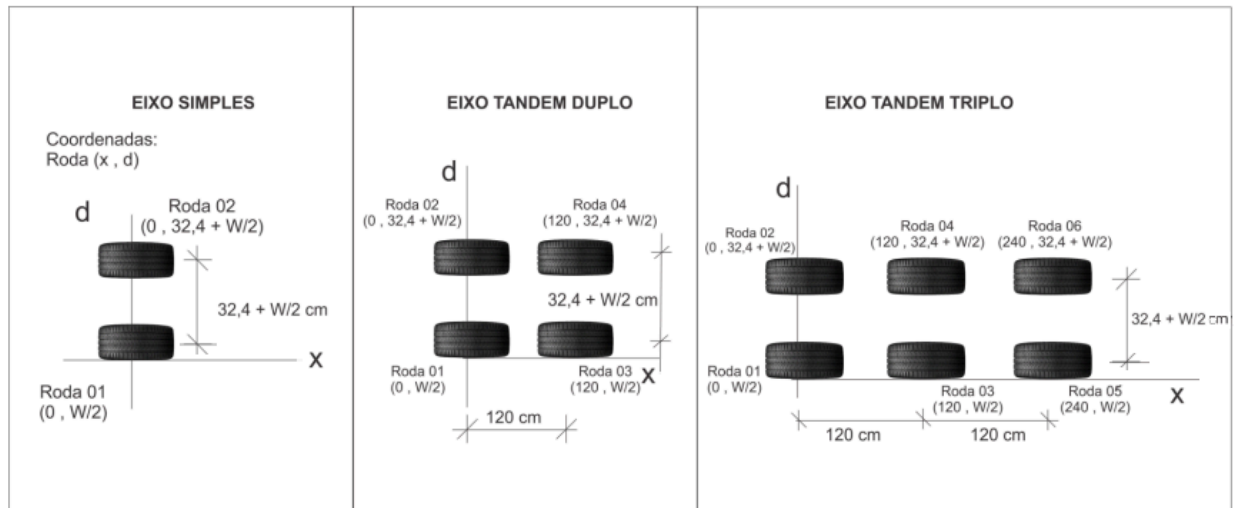
apresentado na Figura 18. Utilizou-se para este dimensionamento as mesmas configurações de eixo padrão adotadas pelo DNIT.

Figura 17 - Ilustração do posicionamentos dos eixos no interior da placa



Fonte: Adaptado do BATISTA, 2021.

Figura 18 - Ilustração do posicionamentos dos eixos na borda da placa



Fonte: Adaptado do BATISTA, 2021.

Sendo assim, realizou-se o cálculo do raio de rigidez a partir da equação 9.

$$l = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot kr}} \quad (9)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{50000 \cdot 0,15^3}{12 \cdot (1 - 0,20^2) \cdot 100}} = 0,673$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do Concreto, em MPa;

h: espessura arbitrada inicialmente para a placa de concreto, em m;

V: Coeficiente de Poisson do concreto, geralmente é de 0,15;

Kr: Coeficiente de recalque da fundação

Com o cálculo do raio de rigidez foi possível realizar o cálculo do número N de blocos da carta de influência disponibilizada no manual de pavimento rígido do DNIT (2005), onde depende do posicionamento dos semi-eixos nas placas. Nas Figuras 17 e 18 foi possível determinar a distância entre as duas rodas do semi-eixo de rodagem dupla – x - e a distância entre os conjuntos de rodas dos semi-eixos – d - para ambas as situações de carregamento (interior e borda da placa) e para cada tipo de eixo, os quais estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões x e d para situação de carregamento no interior e na borda da placa.

	<b>Carregamento no Interior da Placa - Eixo Simples</b>		<b>Carregamento na borda da Placa - Eixo Simples</b>	
	x (m)	d (m)	x (m)	d (m)
Roda 01	0	0	0	0,078
Roda 02	0,324	0	0	0,402
	<b>Carregamento no Interior da Placa - Eixo Tandem Duplo</b>		<b>Carregamento na borda da Placa - Eixo Tandem Duplo</b>	
	x (m)	d (m)	x (m)	d (m)
Roda 01	0	0	0	0,078
Roda 02	0,324	0	0	0,402
Roda 03	0	1,2	1,2	0,072
Roda 04	0,324	1,2	1,2	0,396
	<b>Carregamento no Interior da Placa - Eixo Tandem Triplo</b>		<b>Carregamento na borda da Placa - Eixo Tandem Triplo</b>	
	x (m)	d (m)	x (m)	d (m)
Roda 01	0	0	0	0,078
Roda 02	0,324	0	0	0,402
Roda 03	0	1,2	1,2	0,072
Roda 04	0,324	1,2	1,2	0,396
Roda 05	0	2,4	2,4	0,072
Roda 06	0,324	2,4	2,4	0,396

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para a determinação do número N de blocos no interior da placa, utilizou o auxílio da carta de influência nº 1, em função do raio de rigidez da placa de concreto (l), distância entre as duas rodas do semi-eixo de rodagem dupla (x), e distância entre os conjuntos de rodas dos semi eixos tandem duplo ou triplo (d). Para o carregamento na borda da placa é utilizado a carta de influência nº 2.

Com isso, os valores do carregamento no interior e na borda da placa para os eixos simples estão indicados na tabela 10.

Tabela 10 – Número N de Blocos da carta de influência para eixos simples

L/l	Eixo simples - Carregamento no interior da placa			Eixo simples - Carregamento na borda da placa		
	x/l	d/l	N	x/l	d/l	N
0,443						
Roda 01	0	0	200	0	0,11656	380
Roda 02	0,4817	0	80	0	0,59831	180
<b>N total</b>	280			560		

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os valores do carregamento para o eixo tandem duplo estão indicados na tabela 11.

Tabela 11 – Número N de Blocos da carta de influência para eixo tandem duplo

L/l	Eixo tandem duplo - Carregamento no interior da placa			Eixo tandem duplo - Carregamento na borda da placa		
	x/l	d/l	N	x/l	d/l	N
0,1401						
Roda 01	0	0	200	0	0,1166	380
Roda 02	0,4817	0	800	0	0,5983	180
Roda 03	0	1,7842	0	1,7842	0,1075	0
Roda 04	0,4817	1,7842	0	1,7842	0,5892	0
<b>N total</b>	280			560		

Fonte: Autoria própria, 2024.

E os valores do carregamento do eixo tandem triplo estão indicados na tabela 12.

Tabela 12 – Número N de Blocos da carta de influência para eixo tandem triplo

L/l	Eixo tandem triplo - Carregamento no interior da placa			Eixo tandem triplo - Carregamento na borda da placa		
	x/l	d/l	N	x/l	d/l	N
0,11870						
Roda 01	0	0	150	0	0,1166	300
Roda 02	0,4817	0	50	0	0,5983	180
Roda 03	0	1,7842	0	1,7842	0,1075	0
Roda 04	0,4817	1,7842	0	1,7842	0,5892	0
Roda 05	0	3,5685	0	3,5685	0,1064	0
Roda 06	0,4817	3,5685	0	3,5685	0,5882	0
<b>N total</b>	200			480		

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com os resultados dos números de N, notou-se que, para os carregamentos previstos no estudo de tráfego, aqueles que resultaram nos maiores momentos fletores foram os produzidos pelos eixos simples. Sendo assim, é possível determinar o momento atuante no interior e na borda da placa de acordo com a equação 10 e 11.

$$M_i = \frac{N \cdot q \cdot l^2}{10000} \text{ em } (N \cdot m/m) \quad (10)$$

$$M_b = \frac{N \cdot q \cdot l^2}{10000} \text{ em } (N \cdot m/m) \quad (11)$$

Sendo:

Mi: Momento interior da placa

Mb: Momento na borda da placa

N: Número N, determinado pelas cartas de influência;

q: Pressão de enchimento do pneu, em Pa;

l: Raio de rigidez relativo da placa.

Com isso, obteve os seguintes resultados:

Tabela 13 - Momento atuante no interior e na borda da placa

Momento no interior da placa (Mi)	Momento na borda da placa (Mb)
88,66	177,31

Fonte: Autoria própria, 2024.

Após o cálculo do momento no interior e na borda da placa, foi determinado o coeficiente adimensional  $k_6$  a partir da equação 12.

$$k_6 = \frac{b \cdot h^2}{M_i} \quad (12)$$

Sendo:

b: Largura considerada da placa, 100 cm;

h: Espessura da placa, menos 3,0 cm de cobrimento;

$M_i$ : Momento atuante no interior da placa, em tf.cm/m;

Tabela 14 - Valor de  $k_6$

$k_6$ no interior da placa	$k_6$ na borda da placa
325,97	162,99

Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir do coeficiente  $k_6$  e da resistência característica à compressão do concreto da placa ( $f_{ck}$ ), em MPa, pode-se determinar o coeficiente  $k_3$  de acordo com a tabela de valores de valores de  $k_3$  disponibilizada no manual do DNIT de concreto rígido (2006).

Tabela 15 - Valor de  $k_3$  obtido na tabela

$k_3$ no interior da placa	$k_3$ na borda da placa
0,285	0,279

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com isso, foi possível realizar o cálculo da seção de armadura inferior ( $A_s$ ) no interior da placa e na borda da placa:

$$A_s = k_3 * \frac{M_i}{h} \text{ em cm}^2/\text{m} \quad (13)$$

Sendo:

h: Espessura da placa, menos 3,0 cm de cobrimento;

$M_i$ : Momento atuante no interior da placa, em tf.cm/m;

Tabela 16 - Armadura inferior

$A_s$ no interior da placa	$A_s$ na borda da placa
1,434	2,910

Fonte: Autoria própria, 2024.

A armadura negativa (também chamada armadura de retração) deve ser posicionada no terço superior da placa e a não mais de 5 cm da superfície, e depende do comprimento, da espessura da placa e do coeficiente de atrito. A área de aço da armadura negativa foi determinada através da equação (14):

$$A_s = \frac{f * L * h}{333} \quad (14)$$

Sendo:

AS: Área da armadura, em cm<sup>2</sup>/m;

f: Coeficiente de atrito da placa;

L: Comprimento da placa;

h: Espessura da placa

A área de aço para a armadura de retração foi de 1,532 cm<sup>2</sup>/m, para a qual se indica a utilização de uma tela soldada Q-159. A armadura de retração deve ficar posicionada no terço superior da placa e não a mais do que 5 cm da superfície.

### 5.2.1 Juntas

As juntas dos pavimentos de concreto estão sujeitas à ocorrência de defeitos, mas este problema nos pavimentos de concreto armado pode ser minimizado pela introdução de reforço nas juntas. Quando a eficiência da junta for 100% o momento que nela atua iguala ao momento interior da placa.

- Para juntas longitudinais:

$$M_{jL} = M_b(1 - \delta/200) \quad (15)$$

- Para juntas transversais:

$$M_{jT} = 0,7 \cdot M_b(1 - \delta/350) \quad (16)$$

Sendo:

$M_{jL}$ : momento na junta longitudinal

$M_{jT}$ : momento na junta transversal

$M_b$ : momento na borda livre da placa

$\delta$ : eficiência da junta, em %

O momento nas juntas longitudinais foi de 137,42 e nas juntas transversais foi de 108,16.

As barras de transferência aplicadas nas juntas transversais como mecanismo de transferência de carga, devem ter o diâmetro compatível com a espessura do pavimento (Tabela 17).

Tabela 17 – Diâmetro das barras de transferência

Espessura do pavimento - h (cm)	Diâmetro da barra
≤ 10 cm	10 mm
10 cm ≤ 15 cm	12 mm
15cm ≤ 20 cm	16 mm
20 cm ≤ 25 cm	20 mm
25 cm ≤ 30 cm	25 mm
> 30 cm	32 mm

Fonte: DNIT, 2005.

Sendo assim, realizou-se a análise para as barras de transferência adotadas para o pavimento (Tabela 18).

Tabela 18 - Barras de transferência

Altura da camada	h=	15	cm
Força cortante na barra de transferência	Vd=	16,25	kN
Diâmetro da barra de transferência	$\emptyset$ =	16	mm
Distância entre as barras	d=	30	cm

Fonte: Autoria própria, 2024.

Em resumo, o dimensionamento teve como resultado um pavimento rígido com 20 cm de espessura, armação positiva composta por uma tela soldada Q-159 para o interior da placa e duas telas soldadas uma Q-138 e uma Q-159 para a borda da placa e armação negativa composta por uma tela soldada Q-159 em toda a

extensão da placa.

### 5.3 DIMENSIONAMENTO DE CONCRETO COM GFRP

Para dimensionar um pavimento rígido, é necessário definir as características do pavimento e alguns parâmetros iniciais de dimensionamento (Tabela 19).

Tabela 19 - Dados para o dimensionamento

CBR do subleito	5%
Espessura da Sub-base	10 cm
Coefficiente de Poisson do Concreto	0,15
Comprimento da placa	15 m
Largura da placa	6 m
Módulo de elasticidade aço (GPa)	200
Módulo de elasticidade GFRP (GPa)	45
Coefficiente de atrito placa/ sub-base	1,7
Tensão de tração (ftk) (MPa)	800
Resistência à tração do GFRP (ffu)	600
Período de projeto	20 anos

Fonte: Autoria própria, 2025.

Para início dos cálculos utilizou o momento atuante do dimensionamento anterior, com alguns ajustes devido a espessura ser diferente e foi calculado o momento solicitante de acordo com a equação 17.

$$M_{solicitante} = M_{atuante} * 1,4 \quad (17)$$

O momento solicitante inferior foi de 10,276 kN.m/m e o momento solicitante superior foi de 5,960 kN.m/m.

Com os momentos solicitantes calculados foi possível realizar o cálculo do momento mínimo e da armadura mínima, onde:

$$M_{d,min} = 1,5 * \frac{I_c}{y_t} * f_{ctk,sup} \quad (18)$$

Obteve o valor de 7,66 kN/m.m o momento mínimo e o valor de 1,233 para a armadura mínima.

Com isso, deu-se continuidade no dimensionamento, realizou-se o cálculo da resistência à tração do concreto de acordo com a NBR 6118 (Tabela 20).

Tabela 20 - Cálculo da resistência do concreto à tração

Resistência à tração média do concreto	$f_{ct,m}$	2,565
Resistência à tração superior característica do concreto	$f_{ctk,sup}$	3,334
Resistência à tração inferior característica do concreto	$f_{ctk,inf}$	1,795
Resistência à tração na flexão do concreto	$f_{ct,d}$	1,069
Coefficiente de Segurança para concreto simples	$\gamma_c$	1,68
Tensão à tração do concreto ct,Rd	$\sigma_{ct,Rd}$	0,908

Fonte: Autoria própria, 2025.

Sendo assim, com os cálculos da resistência do concreto à tração, foram realizados os cálculos da armadura de retração (19) e também o cálculo da tensão de retração (20). A armadura de retração foi calculada com base nos cálculos elaborados para armadura de aço, mas corrigindo a área de fibra com base na deformação. Conforme a equação a seguir.

$$A_{f,ret} = \frac{f * \gamma \left(\frac{kN}{m^3}\right) * L(m) * W(m) * h(m)}{2 * 0,75 * \frac{f_{yk} \left(\frac{kN}{cm^2}\right)}{1,15}} * \frac{E_s}{E_f} \quad (19)$$

$$\sigma_r = \frac{Fr \left(\frac{kN}{m}\right)}{h(cm) \cdot 100} = \left(\frac{kN}{cm^2}\right) \quad (20)$$

Sendo assim, obteve os seguintes valores de acordo com as tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Cálculo da armadura de retração

Peso específico do concreto	$\gamma$	25	kN/m <sup>3</sup>
Altura do Piso	h	15	cm
Coefficiente de atrito	f	0,5	
Tensão de escoamento do aço	$f_{yk}$	600	MPa
As,ret	As, ret	0,426	cm <sup>2</sup> /m

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 22 - Cálculo da tensão de retração

Força de retração	Fr	1,875	kN/m
Tensão de retração	$\sigma_r$	0,01	MPa

Fonte: Autoria própria, 2025.

Em seguida, foi possível realizar o dimensionamento da flexão do concreto, onde calculou a tensão máxima para verificar se era necessário a utilização de armadura inferior (Tabela 23).

Tabela 23 - Flexão no concreto

Momento fletor máximo inferior	M+=	10,276	kN.m/m
Momento fletor máximo superior	M-=	5,960	kN.m/m
Tensão máxima	$\sigma_{max,inf}$	2,75	MPa
Módulo elástico do piso	$W$	3750	cm <sup>3</sup>
Inércia do piso	$I$	28125	cm <sup>4</sup>
Verificação da necessidade de armadura inferior: $\alpha_{max,inf} \leq \sigma_{ct,Rd}$		É necessária armadura inferior	

Fonte: Autoria própria, 2025.

Como a tensão máxima na face inferior é superior à tensão à tração do concreto, torna-se necessário o uso de armadura na face inferior para resistir às forças de tração e evitar a fissuração. A presença da armadura inferior é fundamental para garantir a integridade estrutural do pavimento, proporcionando maior segurança e durabilidade..

Sendo assim, realizou o cálculo da armadura inferior (Tabela 24) para verificar a taxa de armadura limite para falha na fibra com a taxa de armadura existente. Dando continuidade do cálculo da linha neutra.

Tabela 24 - Cálculo da armadura inferior

<b>Armadura inferior</b>			
Resistência a tração da fibra	$f_{fd}$	560,00	MPa
Coefficiente de simplificação do diagrama triângulo-retângulo	$\lambda$	0,80	
Coefficiente de correção da resistência do concreto	$\alpha_c$	0,85	
Área da fibra	$A_f$	2,0096	cm <sup>2</sup> /m
Largura considerada	$b$	100	cm
Altura útil	$d$	12	cm
Taxa de armadura limite para falha na fibra	$\rho_{fb}$	0,00171	
Taxa de armadura existente	$\rho_f$	0,00167	
Altura da linha neutra	$x$	0,581	cm
Armadura final	$A_{s,Tot}$	2,4355	cm <sup>2</sup> /m

Fonte: Autoria própria, 2025.

Calculou-se também a armadura superior (Tabela 25).

Tabela 25 - Cálculo da armadura superior

<b>Armadura superior</b>			
Resistência a tração da fibra	$f_{fd}$	560	MPa
Coefficiente de simplificação do diagrama	$\lambda$	0,80	
Coefficiente de correção da resistência do concreto	$\alpha_c$	0,85	
Área da fibra	$A_f$	1,539	cm <sup>2</sup> /m
Largura considerada	$b$	100	cm
Altura útil	$d$	10,5	cm
Taxa de armadura limite para falha na fibra	$\rho_{fb}$	0,00179	

Taxa de armadura existente	$\rho_f$	0,00147	
Altura da linha neutra	x	0,445	cm
Armadura final	$A_{s,Tot}$	1,965	cm <sup>2</sup> /m

Fonte: Autoria própria, 2025.

Em resumo, o dimensionamento resultou em um pavimento rígido com espessura de 15 cm, contendo armadura superior composta por uma tela G283 e armadura inferior com uma tela G283. Esses parâmetros foram definidos com base nas cargas previstas, no comportamento estrutural e nas exigências normativas, garantindo a resistência e durabilidade do pavimento ao longo do tempo.

#### 5.4 COMPARATIVO DE CUSTOS

Uma das propostas do presente trabalho é detalhar as diferenças de custo entre a aplicação do pavimento flexível e o pavimento urbano de concreto, e, posteriormente, realizar o comparativo com a adição de barras de fibra de vidro no pavimento urbano de concreto. Considerando que os dados utilizados para o dimensionamento são fictícios, a análise foi feita com base nos custos relativos aos valores obtidos neste dimensionamento. Foram analisadas as composições dos custos unitários de cada serviço, a fim de fornecer uma visão clara das variações de custo associadas a cada tipo de pavimento.

Para a realização desse comparativo não considerou todos os serviços e materiais, como por exemplo, os valores de espaçadores das barras. Os valores foram retirados da Tabela de Preços Unitários (TPU) do Departamento de Estradas Rodoviárias (DER), do estado de São Paulo e do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), todos os valores referentes aos meses de 2024.

Na Tabela 26 apresenta a estimativa de valores para o pavimento flexível.

Tabela 26 – Estimativa de valor da execução da espessura do pavimento flexível

SERVIÇOS E MATERIAIS	Extensão (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Custo unitário	Custo total
CBUQ	150	6	0,075	68	R\$ 1.468,19	R\$ 99.146,87
Base de brita graduada	150	6	0,10	90	R\$ 397,64	R\$ 35.787,60
Sub-base	150	6	0,10	90	R\$ 42,60	R\$ 3.834,00

Reforço do subleito	150	6	0,20	180	R\$ 5,95	R\$ 1.071,00
Total						R\$ 139.839,47

Fonte: Aatoria própria, 2025.

Na Tabela 27 foi apresentado a estimativa de custos para o pavimento rígido armado.

Tabela 27 – Estimativa de valor da execução da espessura do pavimento rígido armado

SERVIÇOS E MATERIAIS	Extensão (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Quantidade	Custo unitário	Custo total
Regularização do Subleito	150	6	-	-	R\$ 1,15	R\$ 1.035,00
Sub-base de concreto compactado a rolo	150	6	0,1	-	R\$ 251,51	R\$ 22.635,90
Pintura de ligação	150	5,4	-	-	R\$ 2,14	R\$ 1.733,40
Membrana plástica isolante e impermeabilizante	150	-	-	-	R\$ 2,16	R\$ 1.749,60
Concreto (fck 25 MPa) (considerado 3% de perdas)	150	5,4	0,2	-	R\$ 384,00	R\$ 62.208,00
Tela aço soldada nervurada CA-60, Q-159 (p/ o interior da placa)	150	5,4	-	123	R\$ 328,00	R\$ 40.344,00
Tela aço soldada nervurada CA-60, Q-159 (p/ a borda da placa)	150	2,00	-	11	R\$ 328,00	R\$ 3.608,00
Tela aço soldada nervurada CA-60, Q-138 (p/ borda da placa)	150	2,00	-	11	R\$ 296,00	R\$ 3.256,00
Tela aço soldada nervurada CA-60, Q-159 (retração)	150	5,40	-	123	R\$ 328,00	R\$ 40.344,00
Total						R\$ 176.913,90

Fonte: Aatoria própria, 2025.

Na Tabela 28 foi apresentado a estimativa de custos para o pavimento rígido utilizando barras de fibra de vidro.

Tabela 28 – Estimativa de valor da execução da espessura do pavimento rígido utilizando barra de fibra de vidro.

<b>SERVIÇOS E MATERIAIS</b>	<b>Extensão (m)</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Custo unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo total</b>
Regularização do Subleito	150	12	-	R\$ 1,15	-	R\$ 2.070,00
Sub-base de concreto compactado a rolo	150	12	0,10	R\$ 251,08	-	R\$ 45.194,40
Pintura de ligação	150	12	-	R\$ 0,38	-	R\$ 684,00
Membrana plástica isolante e impermeabilizante	150	12	-	R\$ 2,16	-	R\$ 3.888,00
Concreto (fck 25 MPa) (considerado 3% de perdas)	150	11,4	0,15	R\$ 384,00	-	R\$ 98.496,00
Tela inferior - G283 (245x600 cm)	150	11,4	-	R\$ 775,00	130	R\$ 100.750,00
Tela inferior - G283 (245x600 cm)	150	11,4	-	R\$ 775,00	130	R\$ 100.750,00
Total						R\$ 275.696,90

Fonte: Autoria própria, 2025.

Diante das mesmas condições de tráfego e características do subleito, foram analisados os custos de execução dos diferentes tipos de pavimentos. O custo estimado para o pavimento flexível foi de R\$139.839,4, configurando-se como a alternativa mais econômica. Em contrapartida, a execução do pavimento rígido armado apresentou um custo de R\$176.913,90. Já o pavimento rígido com GFRP atingiu um custo de R\$275.696,90, sendo a solução mais cara.

## **7. ANÁLISE E DISCUSSÃO**

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos no estudo comparativo entre pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos convencionais e pavimentos rígidos reforçados com barras de fibra de vidro (GFRP). São identificadas as vantagens e limitações de cada tipo de pavimento, proporcionando subsídios para a definição de diretrizes que auxiliem na escolha do tipo de pavimentação mais adequado a cada situação específica.

### **6.1 COMPARATIVO TÉCNICO ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL E RÍGIDO**

A distribuição de tensões nas camadas subjacentes é a principal distinção entre pavimentos flexíveis e rígidos. O pavimento flexível serve como camada de rolamento e a base absorve o esforço do tráfego. O pavimento rígido e a camada de rolamento redistribuem os esforços e diminuem a tensão aplicada à fundação.

#### **6.1.1 Construção**

A estrutura requerida para a construção de pavimentos flexíveis apresenta maior complexidade em comparação à de pavimentos rígidos, principalmente devido à diferença na forma como as cargas são absorvidas por cada tipo de pavimento. No pavimento flexível, as cargas são distribuídas ao longo de suas diversas camadas, como revestimento, base, sub-base e subleito, exigindo atenção especial ao dimensionamento e à qualidade de cada camada para garantir um bom desempenho. Já no pavimento rígido, as cargas são dispersas de forma mais ampla pela própria laje de concreto, reduzindo a necessidade de reforços intensivos no subleito, o que pode simplificar alguns aspectos da fundação.

Apesar dessa simplificação estrutural, a construção de pavimentos rígidos demanda maior rigor técnico na execução e no controle da qualidade dos materiais, como o concreto e as juntas de dilatação, que são fundamentais para evitar patologias como fissuras e falhas prematuras. Esse rigor inclui um controle mais preciso sobre a mistura do concreto, o posicionamento correto das barras de transferência de carga e o respeito aos procedimentos de cura.

No Brasil, embora historicamente o pavimento flexível seja mais amplamente empregado, o setor de construção civil tem avançado na especialização da execução de pavimentos rígidos. Segundo estudos como os da Associação

Brasileira de Cimento Portland (ABCP), há um crescimento na capacitação de empresas e profissionais para a aplicação desse tipo de pavimento, com normas técnicas e treinamentos específicos que garantem a qualidade da execução (ABCP, 2009). Além disso, órgãos como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e concessionárias rodoviárias têm incentivado o uso do pavimento de concreto em diversas obras, ampliando o conhecimento e a experiência no setor.

Outro ponto importante é que o pavimento flexível, por ser tradicional no Brasil, conta com uma ampla disponibilidade de empresas especializadas, bem como de mão de obra, equipamentos e máquinas adaptados à sua construção. Isso facilita a execução e pode reduzir custos. Em contrapartida, apesar dos avanços na especialização, a construção de pavimentos rígidos ainda requer um controle tecnológico mais rigoroso para evitar erros construtivos, garantindo a durabilidade e a qualidade final do pavimento.

### **6.1.2 Manutenção**

A manutenção de pavimentos é essencial para garantir a funcionalidade e a segurança das vias ao longo de sua vida útil. Sempre que um pavimento deixa de atender aos requisitos mínimos de desempenho, torna-se necessário adotar medidas corretivas ou preventivas para preservar suas condições estruturais e superficiais. Nesse contexto, a Gerência de Pavimentos desempenha um papel fundamental, permitindo a identificação antecipada de falhas e a otimização de recursos para a manutenção e reabilitação das rodovias.

Os defeitos em pavimentos podem ter diversas origens, exigindo tratamentos específicos de acordo com o tipo de manifestação patológica e a tipologia do pavimento – flexível ou rígido. Nos pavimentos flexíveis, como os asfálticos, as principais causas de deterioração incluem o desgaste natural, o excesso de carga aplicada e as condições climáticas. Nos pavimentos rígidos, as falhas geralmente estão relacionadas a erros de execução, dimensionamento inadequado ou movimentações do solo. Embora fatores como sobrecarga, falhas construtivas e intempéries afetem ambos os tipos, seus impactos e mecanismos de degradação são distintos.

Para garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento, é fundamental a aplicação de sistemas de Gerência de Pavimentos, como o Pavement Management

System (PMS), que auxilia no monitoramento e na tomada de decisões sobre intervenções necessárias. Indicadores como o Índice de Serviciabilidade (PSI), o Índice de Condição do Pavimento (PCI) e o International Roughness Index (IRI) são amplamente utilizados para avaliar o desempenho e definir prioridades de manutenção.

A manutenção pode ser classificada como preventiva, corretiva ou reabilitação. A manutenção preventiva busca evitar danos severos por meio de intervenções pontuais e de menor custo, como selagem de trincas e micro revestimento. A manutenção corretiva é adotada quando os defeitos já comprometem a funcionalidade do pavimento, necessitando de recapagens ou reforços estruturais. Já a reabilitação envolve reconstruções parciais ou totais quando o pavimento atinge seu limite de deterioração.

Dentro dessa perspectiva, uma análise comparativa entre pavimentos flexíveis e rígidos deve considerar condições equivalentes, como correta execução, exposição idêntica às intempéries e ao tráfego de veículos. O pavimento rígido, constituído de concreto, destaca-se por sua maior resistência a defeitos e sua longevidade superior em relação ao pavimento flexível. Além da superioridade técnica, apresenta vantagens econômicas ao longo do ciclo de vida, pois, apesar do custo inicial mais elevado, a necessidade reduzida de manutenção minimiza interrupções no tráfego e reduz custos operacionais.

Com uma gestão eficiente e o uso de indicadores adequados, é possível maximizar o desempenho das infraestruturas viárias, garantindo segurança, conforto e sustentabilidade para os usuários.

### **6.1.3 Segurança**

Os pavimentos de concreto refletem mais luz do que os pavimentos asfálticos devido à sua coloração mais clara. Essa característica melhora a visibilidade, especialmente à noite ou em condições climáticas adversas, como dias chuvosos. Isso contribui para a segurança dos motoristas, facilitando a identificação de obstáculos e sinalizações na estrada.

Além disso, o pavimento de concreto proporciona uma melhor aderência entre os pneus e a superfície de rolamento, reduzindo a distância necessária para uma frenagem de emergência. Esse aspecto aumenta a segurança e ajuda a prevenir acidentes. Outra vantagem importante é a possibilidade de aplicar texturas

planejadas, que auxiliam no escoamento da água da chuva. Isso reduz a formação de poças e o risco de aquaplanagem, melhorando a aderência dos veículos e reduzindo a chance de derrapagens em pistas molhadas.

Por outro lado, os pavimentos flexíveis, como os asfálticos, possuem uma textura naturalmente mais rugosa. Essa característica melhora a fixação das demarcações viárias, como faixas de sinalização, que tendem a se desgastar mais rapidamente em pavimentos rígidos devido à menor porosidade da superfície. No entanto, os pavimentos asfálticos podem acumular mais água superficial, o que pode comprometer a segurança durante chuvas intensas.

Dessa forma, tanto pavimentos rígidos quanto flexíveis apresentam características que influenciam diretamente a segurança viária. A escolha do tipo de pavimento deve levar em consideração fatores como o volume de tráfego, as condições climáticas da região e a finalidade da via, garantindo um equilíbrio entre durabilidade, segurança e eficiência.

## **6.2 DIMENSIONAMENTO E DESEMPENHO ESTRUTURAL**

Os cálculos dimensionais realizados no estudo evidenciaram que o uso de barras de fibra de vidro (GFRP) permite uma redução significativa de aproximadamente 20% na espessura da placa de concreto, sem comprometer sua capacidade estrutural. Essa redução se deve às excelentes propriedades mecânicas do GFRP, como sua elevada resistência à tração e baixo módulo de elasticidade, que favorecem uma melhor distribuição das tensões ao longo da estrutura. Em comparação com os pavimentos rígidos convencionais, o pavimento com GFRP consegue manter um desempenho estrutural superior, mesmo com uma espessura menor.

No caso do pavimento com GFRP, a espessura da placa foi reduzida para 15 cm, enquanto o pavimento rígido convencional exigiu 20 cm de espessura para garantir o mesmo nível de resistência estrutural. Essa diferença se explica, em parte, pela quantidade de aço necessária nos pavimentos convencionais: à medida que a espessura da placa diminui, a quantidade de armadura de aço necessária para resistir às tensões aumenta. O GFRP, por ser mais leve e com propriedades mecânicas superiores, permite reduzir a necessidade de armadura metálica e, conseqüentemente, a espessura do pavimento.

Além da redução da espessura, o uso de GFRP também contribui para um pavimento mais durável, com maior resistência à corrosão, o que pode resultar em menor necessidade de manutenção ao longo do tempo. Isso representa uma economia considerável ao longo da vida útil do pavimento, além de uma possível redução nos custos associados à execução e manutenção das obras.

### **6.3 ANÁLISE ECONÔMICA**

Embora o pavimento flexível e o pavimento rígido apresentem diferenças em termos de materiais e métodos de construção, o custo total entre essas duas alternativas não é tão discrepante quanto poderia ser esperado, considerando as distinções em sua composição. O pavimento flexível, com um custo total de R\$139.839,47, mostrou-se a opção mais econômica entre as analisadas, principalmente devido à simplicidade na execução e ao menor preço dos materiais utilizados. Já o pavimento rígido com barras de aço, que teve um custo de R\$176.913,90, apresentou um aumento significativo no preço, mas essa diferença não é tão grande se comparada aos benefícios de durabilidade e resistência que o pavimento rígido oferece.

Em termos de custos iniciais, a diferença entre o pavimento flexível e o pavimento rígido pode ser vista como relativamente pequena, considerando que a maior parte do aumento de preço se deve à utilização de materiais mais resistentes e à maior complexidade na execução do pavimento rígido.

O pavimento rígido com barras de fibra de vidro (GFRP) apresenta um custo consideravelmente mais elevado, totalizando R\$275.696,90, quando comparado ao pavimento flexível e até mesmo ao pavimento rígido com barras de aço. A principal razão para essa diferença está no custo das barras de fibra de vidro, que são mais caras do que as barras de aço convencionais.

Portanto, a escolha entre pavimento flexível e pavimento rígido não deve ser baseada apenas no custo imediato, mas sim em uma análise mais profunda que leve em consideração não só o valor inicial, mas também as necessidades futuras da infraestrutura. Embora o pavimento flexível seja mais barato inicialmente, o pavimento rígido pode se tornar uma solução mais vantajosa a longo prazo, quando se considera a menor necessidade de manutenção e a maior durabilidade da estrutura. A diferença entre os dois, portanto, pode não ser tão significativa se analisada sob a ótica do ciclo de vida da obra.

## 6.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

O processo de fabricação das barras de GFRP demanda significativamente menos energia em relação à produção de aço, resultando em uma redução substancial na pegada de carbono associada ao material. Em comparação com os pavimentos flexíveis, que geralmente exigem maiores volumes de materiais derivados de petróleo, como o asfalto, os pavimentos com GFRP oferecem uma alternativa mais sustentável, já que o asfalto é um recurso não renovável e sua produção é mais intensiva em energia. Assim, ao longo do tempo, os pavimentos com GFRP contribuem para a redução do consumo de recursos naturais e da geração de resíduos de construção.

No entanto, é essencial considerar o impacto ambiental do descarte das barras de GFRP ao final de sua vida útil, uma vez que esse material não é biodegradável. Diferente dos pavimentos flexíveis, que podem ser reciclados até certo ponto, o GFRP apresenta desafios no que diz respeito à sua reciclagem, sendo um dos principais obstáculos para a sua consolidação como uma solução plenamente sustentável. Atualmente, algumas pesquisas vêm explorando métodos para reciclagem e reaproveitamento desse material, como a trituração para incorporação em novos produtos compósitos ou o uso em aplicações secundárias. No entanto, essas tecnologias ainda não estão amplamente implementadas na indústria.

Dessa forma, para avaliar com mais precisão os impactos ambientais do GFRP em comparação com outras soluções, seria fundamental a realização de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV), considerando todas as etapas, desde a produção até o descarte. A aplicação dessa metodologia poderia fornecer dados mais concretos sobre os reais benefícios ambientais desse material e identificar estratégias para otimizar sua sustentabilidade. Além disso, essa questão pode ser um direcionamento para pesquisas futuras, incentivando o desenvolvimento de técnicas mais eficientes para a reciclagem do GFRP e a viabilização de sua reutilização em larga escala.

## 8. CONCLUSÕES

O estudo comparativo entre pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos convencionais e pavimentos rígidos reforçados com barras de fibra de vidro (GFRP) permitiu identificar as vantagens e desvantagens de cada alternativa, considerando aspectos estruturais, econômicos e ambientais.

O pavimento flexível apresentou o menor custo inicial (R\$139.839,47), sendo uma solução amplamente utilizada no Brasil devido à sua facilidade de execução e menor investimento inicial. No entanto, seu desempenho estrutural pode ser impactado por fatores como volume de tráfego e características do subleito.

O pavimento rígido convencional, embora tenha um custo inicial mais elevado (R\$176.913,90), demonstrou maior resistência e capacidade de distribuição de cargas, sendo uma alternativa eficiente para determinadas condições de tráfego. Já o pavimento rígido reforçado com GFRP, apesar de apresentar um custo significativamente maior (R\$275.696,90), se destacou pela redução da espessura da placa de concreto e pela elevada resistência à corrosão, características que contribuem para sua eficiência estrutural.

Do ponto de vista ambiental, a utilização de barras de fibra de vidro pode representar uma alternativa mais sustentável em relação às armaduras de aço, pois elimina os efeitos da corrosão e permite otimizar o consumo de materiais. No entanto, desafios relacionados à regulamentação e à viabilidade econômica desse material no Brasil ainda precisam ser superados para sua ampla aplicação.

Portanto, a escolha entre os diferentes tipos de pavimento deve considerar não apenas o custo inicial, mas também critérios estruturais e ambientais. O pavimento rígido reforçado com GFRP surge como uma solução inovadora e promissora, especialmente para vias de tráfego intenso, mas sua adoção depende de maior desenvolvimento tecnológico e regulamentação no país.

Para pesquisas futuras recomenda-se:

- 1 - Aprofundar a análise da aplicação de barras de fibra de vidro (GFRP) em pavimentos rígidos, considerando diferentes cenários de tráfego e condições climáticas.
- 2 - Investigar a manutenção dos pavimentos analisados, considerando a durabilidade dos materiais e a frequência de intervenções necessárias ao longo do tempo.

3 - Realizar uma Análise do Ciclo de Vida (ACV), considerando todas as etapas, desde a produção até o descarte das barras de fibra de vidro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 440.1R - 48, A.C.I. **Guide for the Design and Construction Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars**. [S.1] (2015).

AASHTO. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Pavimento de Concreto**. 2009. Disponível em: <https://abcp.org.br/pavimento-de-concreto/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projetos e restauração**. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de Concreto**. São Paulo, Oficina de Textos, 2009.

BATISTA, E. R. **Pavimentos de concreto com e sem armadura estrutural: Cotejamento de atributos relativos a projeto, dimensionamento, construção e custos de implantação**. Universidade Federal de Sergipe. 2021. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/14662>. Acesso em: 10 dez 2024.

BIANCHI, F. R; BRITO, I. R. T; CASTRO, V. A. B. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste. 2008. Disponível em: [https://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav\\_apresentacoes/isis\\_raquel.pdf](https://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf)  
Acesso em: 18/12/2024.

CAVA, Felipe. **Conceitos sobre pavimentos de concreto protendido**. Além da Inércia. 2014. Disponível em: <https://alemdainercia.com/2018/05/14/conceitos-sobre-pavimentos-de-concreto-protendido/>. Acesso em: 23 fev. 2025.

CNT, Confederação nacional do transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2024**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em: 09 jan. 2025.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Transporte Rodoviário - Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** - Brasília, 2017. Disponível em:

<https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>. Acesso em: 09 abril 2024.

COLIM, G. M. **Estudo dos fatores que afetam a transferência de carga em juntas de pavimentos de concreto simples**. Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-01042009-184655/publico/GLENDA.pdf>. Acesso em: 29 jul 2024.

COUTO, I. A. **Análise Teórica e Experimental do Comportamento da Aderência entre o Concreto e Barras de Fibra de Vidro Impregnadas por Polímeros**. Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, (2007).

Disponível em:

[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-01102007-085339/publico/2007ME\\_laraAndradeCouto.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-01102007-085339/publico/2007ME_laraAndradeCouto.pdf). Acesso em: 14 dez 2024.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2005.

MASTER PLATE. O que é pavimento semi-rígido? Master Plate. Disponível em: <https://masterplate.com.br/o-que-e-pavimento-semi-rigido/>. Acesso em: 23 fev. 2025.

NETO, G. **Estudo Comparativo entre a Pavimentação Flexível e Rígida**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade da Amazônia, Belém, 2011. Disponível em: <http://livrozilla.com/doc/794724/estudo-comparativo-entre-a-pavimentacao-flexivel>. Acesso em: 06 maio 2024.

PORTELA, Enson. **6 desvantagens do uso de barras de fibra de vidro**. Blog do Podcast Aprenda Engenharia. 2018. Disponível em:

<https://blog.aprendaengenharia.com.br/18/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RODRIGUES, L. F. **Juntas em Pavimento de Concreto: Dispositivos de Transferência de Cargas**. Tese, Engenharia Civil, USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em:

[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06052008-104105/publico/2008DO\\_LezzirRodrigues.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06052008-104105/publico/2008DO_LezzirRodrigues.pdf). Acesso em: 25 jul 2024.

RODRIGUES, A. S *et al.* **Barras de Fibra de Vidro (GFRP) como uma alternativa inovadora**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, CBPAT 2022.

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/361964359\\_BARRAS\\_DE\\_FIBRA\\_DE\\_VIDRO\\_GFRP\\_COMO\\_UMA\\_ALTERNATIVA\\_INOVADORA](https://www.researchgate.net/publication/361964359_BARRAS_DE_FIBRA_DE_VIDRO_GFRP_COMO_UMA_ALTERNATIVA_INOVADORA). Acesso em: 24 jul 2024.

SILVA, R. C. C; CARDOSO, S. G. P; BARBOSA, I. L. S. **Estudo do concreto reforçado com fibras de vidro**. Trabalho de Conclusão de Curso, UniEvangélica, Anápolis, 2018. Disponível em:

<https://anais.unievangelica.edu.br/index.php/reciec/article/view/3355>. Acesso em: 08 jul 2024.

SILVA, A. C. A; SILVA, M. V. A. **A diferença entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Qual melhor custo benefício?**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 66p. 2021.

SILVA, A. L. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e pavimento flexível**. Trabalho de Conclusão de Curso, Unicesumar - Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2019. Disponível em:

<http://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/5277/1/TRABALHO%20DE%20CONCLUS%c3%83O%20DE%20CURSO.pdf>. Acesso em: 04 jun 2024.

VERGALIGHT. **Cases pelo mundo - 3º Ponte de Concessão**. 2008. Disponível em <https://vergalight.com.br/cases-pelo-mundo/#single/0>. Acesso em: 5 jan. 2025.

VERGALIGHT. **Cases pelo mundo - Estacionamento interno de um shopping**. 2006. Disponível em

<https://vergalight.com.br/cases-pelo-mundo/#single/0>. Acesso em: 5 jan. 2025.