



INSTITUTO FEDERAL  
GOIÁS  
Câmpus Anápolis

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA**  
**MOBILIDADE**

**ESTUDO COMPARATIVO: PAVIMENTO FLEXÍVEL X PAVIMENTO RÍGIDO**

**ANDRÉ LUIZ ANDRADE SOARES CALIXTO**

**ORIENTADOR: Prof. D.Sc. ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES QUEIROZ**

**PUBLICAÇÃO:**

**ANÁPOLIS**

**2025**

**ANDRÉ LUIZ ANDRADE SOARES CALIXTO**

**ESTUDO COMPARATIVO: PAVIMENTO FLEXÍVEL X  
PAVIMENTO RÍGIDO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da  
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito  
parcial para conclusão de curso.

Orientador: Prof. D.Sc. Angela Custódia Guimarães  
Queiroz

**ANÁPOLIS, 2025**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Calixto, André Luiz Andrade Soares

C154e      Estudo comparativo: pavimento flexível x pavimento rígido. / André Luiz Andrade Soares Calixto. – Anápolis: IFG, 2025.  
52 f. il. color.

Orientadora: Prof. Dra. Angela Custódia Guimarães Queiroz.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Anápolis – Bacharelado em Ciência da Computação, 2025.

1. Engenharia rodoviária. 2. Custo. 3. Implantação. 4. Manutenção.

I. QUEIROZ, Angela Custódia Guimarães (orient.).

II. Título.

CDD 625.8

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTUDO COMPARATIVO: PAVIMENTO FLEXÍVEL X PAVIMENTO RÍGIDO**, sob orientação de Angela Custodia Guimaraes Queiroz, apresentado pelo aluno **André Luiz Andrade Soares Calixto (20211060130110)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade (Câmpus Anápolis)**. Os trabalhos foram iniciados às **14:00** do dia **13/02/2026** pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Angela Custodia Guimaraes Queiroz** (Presidente)
- **Frederico de Souza Aleixo** (Examinador Interno)
- **Robson de Oliveira Félix** (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 9,0

**Observação / Apreciações:**

TCC2

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Angela Custodia Guimaraes Queiroz** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Frederico de Souza Aleixo**, em 13/02/2026 15:03:37 com chave 51cc595e090611f187ce005056a537a4.
- **Angela Custodia Guimaraes Queiroz**, em 13/02/2026 14:56:42 com chave 5a8a17bc090511f1b28f005056a537a4.
- **Robson de Oliveira Félix**, em 13/02/2026 17:19:51 com chave 59d845dc091911f187ce005056a537a4.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse [https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Ata de Projeto Final

**Data da Emissão:** 13/02/2026

**Código de Autenticação:** 735c44



### **TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

#### **Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |                                                                      |                                                         |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Tese                                        | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                                 | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação                  | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |                                                         |

Nome Completo do Autor: André Luiz Andrade Soares Calixto.

Matrícula: 20211060130110

Título do Trabalho: Estudo Comparativo: Pavimento Flexível X Pavimento Rígido.

#### **Autorização - Marque uma das opções**

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.  
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.  
☐ Outra justificativa: \_\_\_\_\_

#### **DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 26/02/2026.

## RESUMO

A escolha entre pavimentos flexíveis e rígidos representa uma decisão estratégica na engenharia rodoviária brasileira, especialmente em um contexto de crescimento da frota e elevada demanda por desempenho estrutural e redução de custos ao longo da vida útil das vias. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica fundamentada em manuais do DNIT, literatura técnica especializada e métodos consolidados de dimensionamento, como o método empírico tradicional, o MeDiNa e o PCA/84, abordando critérios estruturais, materiais empregados, técnicas executivas, durabilidade e custos associados. A metodologia adotada consistiu em pesquisa bibliográfica e aplicação comparativa dos métodos de dimensionamento a um estudo de caso referente a um trecho da BR-153, nas proximidades de Pirenópolis-GO, considerando parâmetros de tráfego, características do subleito e período de projeto. A partir do dimensionamento estrutural e da estimativa de custos de implantação e manutenção, foram analisadas as diferenças de desempenho mecânico, espessuras resultantes e impactos econômicos ao longo da vida útil. Os resultados indicam que, embora o pavimento rígido apresente maior custo inicial de implantação, sua menor frequência de intervenções e maior durabilidade podem torná-lo mais vantajoso sob condições de tráfego pesado e longo período de projeto. Conclui-se que a escolha do tipo de pavimento deve considerar não apenas o investimento inicial, mas principalmente a análise de desempenho estrutural e custo global ao longo do ciclo de vida da rodovia.

**Palavras-chave:** Engenharia rodoviária, custo, implantação, manutenção.

## **ABSTRACT**

The choice between flexible and rigid pavements represents a strategic decision in Brazilian highway engineering, especially in the context of continuous fleet growth and the increasing demand for structural performance and cost optimization throughout the service life of roadways. This study presents a literature review based on manuals from the National Department of Transport Infrastructure (DNIT), specialized technical literature, and consolidated design methods such as the traditional empirical method, MeDiNa, and PCA/84, addressing structural criteria, materials used, construction techniques, durability, and associated costs. The adopted methodology consisted of a bibliographic review and the comparative application of pavement design methods to a case study involving a section of BR-153 highway, near Pirenópolis, Goiás State, considering traffic parameters, subgrade characteristics, and design period. Based on the structural design and the estimation of construction and maintenance costs, differences in mechanical performance, resulting thicknesses, and economic impacts over the service life were analyzed. The results indicate that, although rigid pavement presents a higher initial construction cost, its lower frequency of interventions and greater durability may make it more advantageous under conditions of heavy traffic and long design periods. It is concluded that the choice of pavement type should consider not only the initial investment, but primarily the integrated analysis of structural performance and life-cycle cost throughout the highway's service life.

**Keywords:.** Highway engineering, cost, implementation, maintenance.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| SNV     | Sistema Nacional de Viação                                           |
| CNT     | Confederação Nacional do Transporte                                  |
| DNIT    | Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes              |
| AASHTO  | American Association of State Highway and Transportation Officials   |
| CBR     | California Bearing Ratio                                             |
| CBUQ    | Concreto Betuminoso Usinado à Quente                                 |
| PMQ     | Pré-misturado à Quente                                               |
| PMF     | Pré-misturado à Frio                                                 |
| PCA     | Portland Cement Association                                          |
| FSC     | Fator de Segurança para Carga                                        |
| DNER    | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem                         |
| DER     | Departamento de Estradas de Rodagem                                  |
| SICRO   | Sistema de Custos Rodoviários                                        |
| SINAPI  | Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                          |
| LCCA    | Life Cycle Cost Analysis                                             |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabela 1 - Espessura dos Pavimentos Dimensionados.....</b>        | <b>29</b> |
| <b>Tabela 2 - Custo por metro.....</b>                               | <b>29</b> |
| <b>Tabela 3 - Custos médios gerenciais.....</b>                      | <b>30</b> |
| <b>Tabela 4 - Custos de restauração de pavimento flexível.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>Tabela 5 - Custos de substituição de placas de concreto. ....</b> | <b>32</b> |
| <b>Tabela 6 - Custos de implantação dos pavimentos. ....</b>         | <b>34</b> |
| <b>Tabela 7 - Custos de manutenção dos pavimentos ano a ano.....</b> | <b>34</b> |
| <b>Tabela 13 - Custo do pavimento rígido. ....</b>                   | <b>43</b> |
| <b>Tabela 14 - Custo do Pavimento Flexível. ....</b>                 | <b>44</b> |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Quadro 1 - Espessura dos Revestimentos.....</b>                                         | <b>12</b> |
| <b>Quadro 2 - Determinação do coeficiente K por Composição do Pavimento.....</b>           | <b>14</b> |
| <b>Quadro 3 – Determinação do coeficiente K por composição de camadas granulares. ....</b> | <b>14</b> |
| <b>Quadro 4 - Fatores de segurança para as cargas.....</b>                                 | <b>20</b> |
| <b>Quadro 5 - Teores dos Componentes (% em massa). ....</b>                                | <b>23</b> |
| <b>Quadro 6 - Exigências Químicas (% em massa). ....</b>                                   | <b>23</b> |
| <b>Quadro 7 - Exigências Físicas e Mecânicas.....</b>                                      | <b>24</b> |
| <b>Quadro 8 - Comparativo dos Pavimentos. ....</b>                                         | <b>28</b> |
| <b>Quadro 9 - Dimensionamento PCA-84 Eixos Simples. ....</b>                               | <b>38</b> |
| <b>Quadro 10 - Dimensionamento PCA-84 Eixos Tandem Duplos.....</b>                         | <b>39</b> |
| <b>Quadro 11 - Dimensionamento PCA-84 Eixos Tandem Triplos. ....</b>                       | <b>39</b> |
| <b>Quadro 12 - Estruturação do Pavimento Dimensionado.....</b>                             | <b>41</b> |
| <b>Quadro 13 - Estrutura do novo Pavimento Dimensionado. ....</b>                          | <b>42</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 1 – Rede rodoviária federal pavimentada em 2021.....</b>                   | <b>6</b>  |
| <b>Figura 2 – Esquema de Seção Transversal do pavimento. ....</b>                    | <b>10</b> |
| <b>Figura 3 – Esquema de Seção Longitudinal do Pavimento. ....</b>                   | <b>10</b> |
| <b>Figura 4 – Dimensionamento do Pavimento. ....</b>                                 | <b>12</b> |
| <b>Figura 5 – Determinação da espessura do Pavimento. ....</b>                       | <b>13</b> |
| <b>Figura 6 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>Figura 7 – Classificação dos revestimentos. ....</b>                              | <b>17</b> |
| <b>Figura 8 - Relação CBR x Coeficiente de recalque.....</b>                         | <b>19</b> |
| <b>Figura 9 – Distribuição das cargas nos pavimentos.....</b>                        | <b>26</b> |
| <b>Figura 10 – Custos de manutenção no período de 20 anos.....</b>                   | <b>31</b> |
| <b>Figura 11 - Relação entre o CBR do subleito e o coeficiente de recalque. ....</b> | <b>37</b> |
| <b>Figura 12 - Resultados do dimensionamento do MeDiNa. ....</b>                     | <b>41</b> |
| <b>Figura 13 - Resultados do novo dimensionamento do MeDiNa.....</b>                 | <b>42</b> |

## SUMÁRIO

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                        | <b>6</b>  |
| 1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA.....                                   | 7         |
| 1.2. OBJETIVO GERAL .....                                         | 8         |
| 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                  | 8         |
| 1.4. METODOLOGIA GERAL DO ESTUDO .....                            | 8         |
| 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                  | 9         |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                             | <b>9</b>  |
| 2.1. CONCEITOS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL.....                         | 9         |
| 2.2. CONCEITOS DE PAVIMENTO RÍGIDO.....                           | 10        |
| 2.3. MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO E EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS.....   | 11        |
| 2.3.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL.....                  | 11        |
| 2.3.2 MATERIAIS E TÉCNICAS EXECUTIVAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS ... | 15        |
| 2.3.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO .....                   | 19        |
| 2.3.4 MATERIAIS E TÉCNICAS EXECUTIVAS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS ..... | 21        |
| <b>3. ANÁLISE COMPARATIVA .....</b>                               | <b>25</b> |
| 3.1. COMPARATIVO TÉCNICO .....                                    | 25        |
| 3.1.1 COMPOSIÇÃO .....                                            | 25        |
| 3.1.2 CONSTRUÇÃO.....                                             | 26        |
| 3.1.3 MANUTENÇÃO .....                                            | 26        |
| 3.1.4 DURABILIDADE.....                                           | 27        |
| 3.2. COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO .....                         | 28        |
| 3.3. COMPARATIVO DE CUSTOS .....                                  | 28        |
| 3.3.1 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO.....                                  | 28        |
| 3.3.2 CUSTOS DE MANUTENÇÃO .....                                  | 31        |
| 3.3.3 CUSTOS ANALISANDO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MEDINA .....    | 32        |
| <b>4. ESTUDO PRÁTICO: CONCEPÇÃO DOS PAVIMENTOS .....</b>          | <b>35</b> |
| 4.1. ESTUDO DE TRÁFEGO .....                                      | 35        |
| 4.2. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO RÍGIDO.....                     | 36        |
| 4.3. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL.....                   | 40        |
| 4.4. COMPARATIVO ORÇAMENTÁRIO .....                               | 43        |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                               | <b>45</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS.....</b>                                        | <b>46</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

A escolha do tipo de pavimento adequado é fundamental para garantir a durabilidade, segurança e eficiência das obras de infraestrutura viária. Entre as principais alternativas, destacam-se os pavimentos rígidos e os pavimentos flexíveis, cada um com suas características, vantagens e limitações específicas. A compreensão das diferenças e aplicações de cada sistema é essencial para otimizar recursos e promover soluções sustentáveis e duradouras para o transporte rodoviário.

No Brasil, o modal rodoviário é o principal meio de transporte de cargas pelo país. Segundo o SNV (Sistema Nacional de Viação), em 2025 a malha rodoviária sob jurisdição federal do país, excluindo-se os trechos sobrepostos/coincidentes com outras rodovias federais possui uma extensão de 66.611,18 quilômetros, sem incluir as rodovias estaduais, destacando e evidenciando a importância deste meio de transporte ainda mais pela observação da figura 1 a seguir, que mostra a rede rodoviária federal brasileira pavimentada até o ano de 2021.

**Rede rodoviária - 2021**



**Figura 1 – Rede rodoviária federal pavimentada em 2021.**

Fonte: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bitmodosmapas>.

Segundo dados do CNT (Confederação Nacional do Transporte), apenas 12,4% da malha rodoviária total é pavimentada, enquanto a frota, aumentou cerca de 63,6% no período de 2009 a 2017. Presumivelmente, por ter um menor custo de implantação em detrimento do

pavimento rígido, a maior parte do pavimento executado no Brasil é flexível, sendo a modalidade rígida ainda pouco empregada.

Os dois tipos de pavimentos apresentam, além da diferença de custo inicial de implantação, diferenças no dimensionamento, na forma como distribuem as cargas no solo, nos métodos construtivos, entre outras.

Em função da melhor adequabilidade e desempenho dos tipos de pavimentação, a engenharia está sempre em busca de novos estudos para ampliação do conhecimento acerca dos métodos de dimensionamento, materiais utilizados, dosagem dos mesmos e métodos executivos. Diante disso, faz-se necessário que aqueles que optem por atuar nesta área sejam conhecedores dos métodos tradicionais e estejam atentos às novas descobertas e possibilidades da pavimentação, tendo assim capacidade de avaliar de forma coesa a execução e implantação de cada alternativa.

A busca por esta capacidade de avaliação por meio dos profissionais inseridos, leva ao aumento de estudos na área, como este trabalho, que busca apresentar as melhores condições para implantação de cada pavimento, suas principais características executivas, custos, restrições e limitações. Assim, será obtida uma relação entre as duas alternativas de pavimentação permitindo avaliar qual possui os melhores cenários para as diferentes ocasiões encontradas no cotidiano dos profissionais.

## 1.1.JUSTIFICATIVA DO TEMA

Em um país onde predomina a utilização do modal rodoviário tanto para cargas quanto para transporte de pessoas, onde a malha rodoviária apresenta apenas cerca de 12,4% de sua extensão pavimentada, enquanto a frota e a demanda por melhores condições de locomoção e conforto crescem, faz-se urgente a busca por novos estudos de viabilidade técnica e financeira de novas implantações e novos investimentos para que este índice possa crescer cada vez mais, acompanhando o desenvolvimento das demais áreas do país.

A análise de custo/benefício é extremamente importante para a concepção de um projeto de infraestrutura como o de uma via pavimentada, e a escolha equivocada de algum método de pavimentação em um projeto pode acarretar em uma inviabilidade financeira antes mesmo da implantação ou uma futura quantidade exorbitante de custos de manutenção, o que não é desejável na engenharia. Deste modo, um estudo que apresenta as principais características executivas, de custo, de desempenho e de aplicabilidade de pavimentos é de suma importância para aumento do conhecimento acerca do tema.

## 1.2.OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem o objetivo geral de analisar comparativamente os pavimentos flexível e rígido, sob os aspectos estrutural, metodológico e econômico, por meio de revisão bibliográfica e aplicação de métodos de dimensionamento a um estudo de caso na BR-153, visando avaliar o desempenho e a viabilidade de cada alternativa ao longo do período do projeto.

## 1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos do estudo, têm-se:

- Caracterizar tecnicamente os pavimentos rígido, e flexível;
- Aplicar os métodos de dimensionamento MeDiNa para o pavimento flexível e PCA/84 para o pavimento rígido;
- Comparar as estruturas dimensionadas;
- Estimar e avaliar custos de implantação e manutenção;
- Avaliar tecnicamente a viabilidade estrutural e econômica dos pavimentos flexível e rígido;

## 1.4.METODOLOGIA GERAL DO ESTUDO

Para realizar este estudo, foi adotada uma abordagem baseada na pesquisa bibliográfica, selecionando artigos acadêmicos, pesquisas, teses, dissertações e documentos relacionados ao tema de pavimentos. Essa metodologia permitiu reunir informações relevantes, além de analisar diferentes perspectivas e resultados de estudos anteriores.

Estão dispostos neste trabalho estudos de caso, abordagens e resultados de ensaios realizados anteriormente em pesquisas, visando apresentar resultados que atendam aos objetivos e tragam mais ainda informações acerca do comportamento mecânico de cada material e suas propriedades.

Foi realizado também um estudo de caso a partir dos dados de tráfego da BR-153, tendo como resultado dois dimensionamentos, por meio do software MeDiNa e do método PCA/84. Um pavimento flexível e um pavimento rígido, que após terem suas estruturas concebidas, foram precificados a partir das tabelas de composição de custos SINAPI (Caixa) e SICRO (DNIT).

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O estudo em questão, está organizado em 6 capítulos, sendo o primeiro capítulo introdutório sobre o tema abordado, nos capítulos dois a cinco, apresentação dos critérios técnicos e análises realizadas, e por fim, no sexto e último capítulo, o referencial bibliográfico utilizado.

No primeiro capítulo, é apresentada uma introdução sobre a pavimentação e sua importância, a justificativa da escolha do tema, os objetivos gerais e específicos a serem alcançados nesta pesquisa e a estrutura em que foi dividida a pesquisa.

Já no capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos da engenharia de pavimentação, metodologias de dimensionamento e execução, os materiais utilizados para cada método de pavimentação e abordar as principais normativas consideradas no Brasil para a regulamentação e controle de dimensionamento e execução das obras de pavimentos.

O capítulo 3 aborda o comparativo entre o pavimento rígido e o pavimento flexível, levando em consideração todos os conceitos e métodos anteriormente apresentados e utilizando como referência pesquisas, ensaios e estudos de caso realizados para abordar as principais características e peculiaridades de cada tipo de obra.

O quarto capítulo, traz o estudo de caso realizado acerca do trecho do Km 405,2 da BR-153, onde foi feito um dimensionamento a partir de dados de tráfego obtidos no Programa Nacional de Contagem de Tráfego do DNIT (PNCT).

A apresentação das considerações finais e conclusão sobre o que foi discutido anteriormente, ficará no capítulo 5, onde os resultados obtidos e os objetivos serão alcançados.

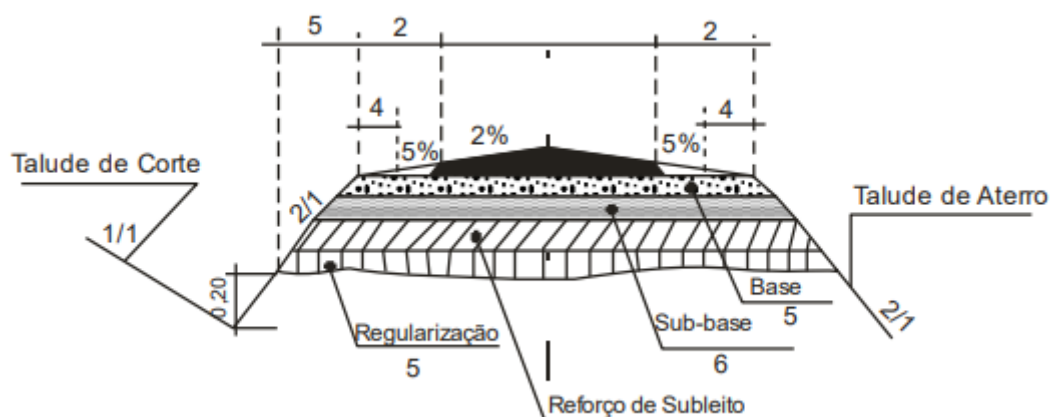
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONCEITOS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. (Manual de Pavimentação – DNIT, 2006)

Para Bernucci *et al.* (2008), os pavimentos flexíveis, ou pavimentos asfálticos, podem ser denominados como aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

A Figura 2 ilustra a estruturação básica de um pavimento flexível.



**Figura 2 – Esquema de Seção Transversal do pavimento.**

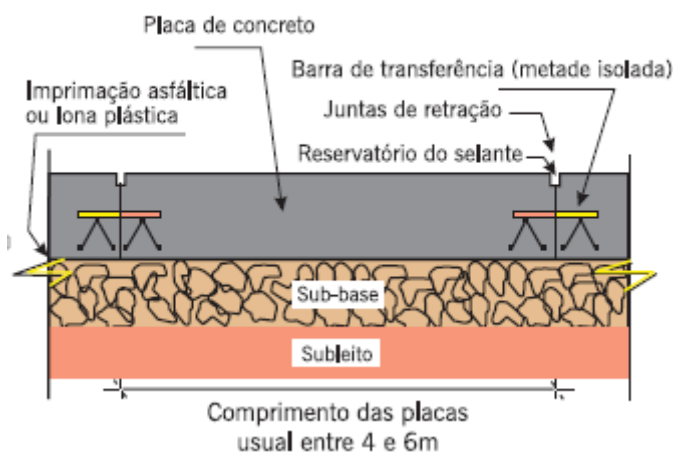
Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

## 2.2.CONCEITOS DE PAVIMENTO RÍGIDO

Os pavimentos rígidos, ou pavimentos de concreto-cimento, são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço (Bernucci *et al.* 2008).

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

Abaixo, a Figura 3 ilustra a estruturação básica de um pavimento rígido.



**Figura 3 – Esquema de Seção Longitudinal do Pavimento.**

Fonte: Bernucci *et al.*, (2010).

## 2.3. MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO E EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS

### 2.3.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

Para Senço (2007), o dimensionamento do pavimento é realizado para obter as camadas existentes e suas respectivas espessuras, para fins de resistência, transmissão e distribuição das cargas exercidas pelo tráfego, de modo que o pavimento não sofra ruptura ou deformações e desgastes excessivos.

Em se tratando de pavimentos flexíveis, o método de dimensionamento mais utilizado é o método empírico, tratado no Manual de Pavimentação do DNIT. Método este, que é baseado na experiência do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América do Norte, e conclusões obtidas da pista experimental da AASHTO (American Association of State Highway Officials) (Costa, 2013).

O método empírico se baseia no suporte do subleito, sendo este, e o suporte dos demais materiais e camadas determinados pelo ensaio Califórnia Bearing Ratio (CBR). Em função do CBR das camadas presentes no pavimento, e do tráfego, é possível determinar uma espessura mínima a ser adotada para o pavimento (Greco, 2012).

No dimensionamento de um pavimento flexível, estão associados:

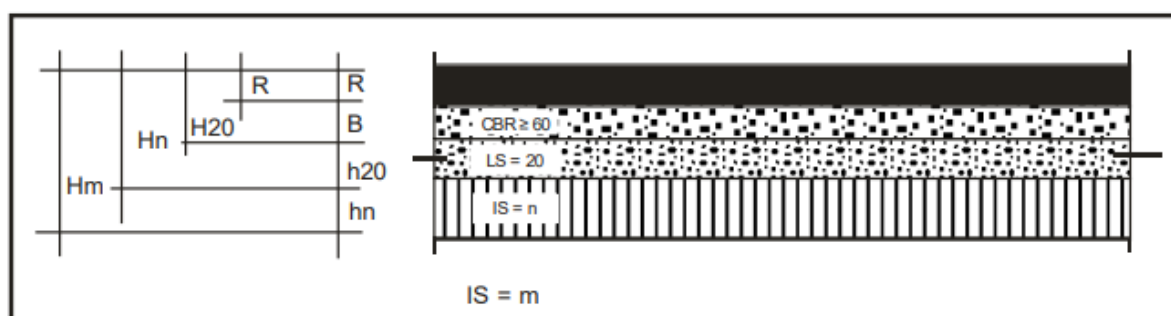
- Fator de eixo (FE), que consiste em um valor representativo para a quantidade total de eixos dos veículos previstos que irão trafegar pela via (Marques, 2013).
- Fator de carga (FC), um coeficiente que, multiplicado pela quantidade de eixos que solicitam o pavimento, fornece o número equivalente de operações do eixo simples padrão (Marques, 2013).
- Fator climático regional (FR), coeficiente que possibilita considerar as variações de umidade nos materiais de acordo com as variações climáticas ocorridas durante as estações do ano (Marques, 2013).
- Fator de veículo (FV), valor que transforma o volume real de tráfego em um equivalente de tráfego do eixo padrão no mesmo período de tempo (Marques, 2013).
- Número N, coeficiente que consiste no número equivalente de operações do eixo padrão rodoviário (Marques, 2013).

A obtenção do número N é produto dos demais parâmetros citados com o Volume Total ( $V_t$ ), assim como está disposto nas Equações 1 e 2:

$$N = Vt * FV \quad (1)$$

$$FV = FE * FC * FR \quad (2)$$

Após obtido o número N, passa-se à segunda parte do dimensionamento, que consiste na estimativa das camadas de revestimento (R), base (B), sub-base (h20) e reforço de subleito (hn), assim como descrito na Figura 4, abaixo:



**Figura 4 – Dimensionamento do Pavimento.**

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

De acordo com o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), cada espessura descrita na Figura 4 é determinada a partir da resolução das Equações 3, 4 e 5 e pelo Quadro 1:

**Quadro 1 - Espessura dos Revestimentos**

| N                             | Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso       |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| $N \leq 10^6$                 | Tratamentos superficiais betuminosos              |
| $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ | Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura |
| $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$ | Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura       |
| $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ | Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura      |
| $N > 5 \times 10^7$           | Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura      |

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

$$R * Kr + B * Kb \geq H20 \quad (3)$$

$$R * Kr + B * Kb + h20 * Ks \geq Hn \quad (4)$$

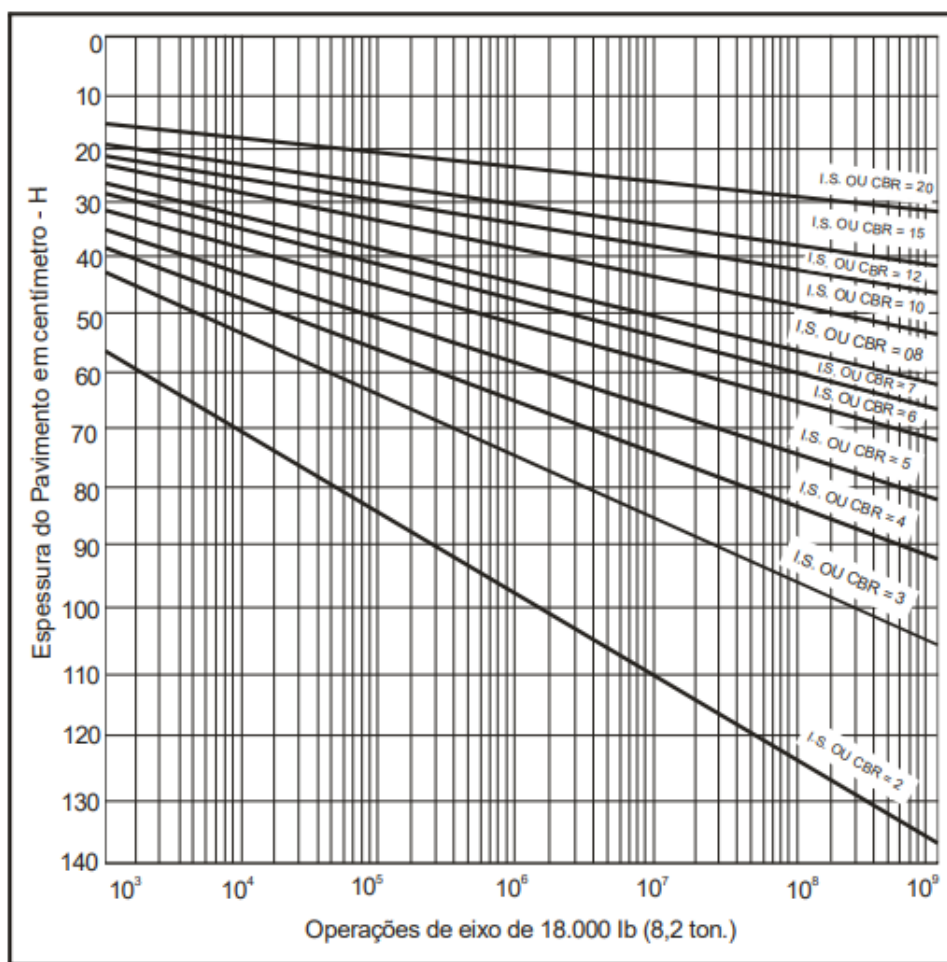
$$R * Kr + B * Kb + h20 * Ks + hn * Kref \geq Hm \quad (5)$$

Para obtenção da espessura do Pavimento referente à espessura de todas as camadas (Sub-base, base e revestimento), em função do número N e do CBR, em conformidade com o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), é utilizado o ábaco presente na Figura 5.

Para obtenção da espessura desejada (Hm), entra-se com o valor de N no eixo horizontal, levando uma linha reta, na vertical, do valor de N até a curva referente ao Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) do subleito em questão.

Em seguida, a partir da curva de CBR encontrada, traça-se uma linha horizontal até que essa se encontre com o eixo vertical, onde estão em disposição, os valores, em centímetros, da espessura do pavimento.

A seguir, está disposto, na Figura 5, o ábaco do Manual de Pavimentação – DNIT (2006), citado nos parágrafos anteriores:



$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

**Figura 5 – Determinação da espessura do Pavimento.**

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

Para a resolução das equações 3, 4 e 5, é necessário a obtenção do coeficiente K, presente em todas as equações citadas. Conforme o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), o coeficiente K, é determinado a partir do material empregado no revestimento, e do material empregado na construção das camadas granulares, de acordo com os Quadros 2 e 3:

**Quadro 2 - Determinação do coeficiente K por Composição do Pavimento.**

| <b>Componentes do Pavimento</b>                                 | <b>Coeficiente K</b> |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Base ou revestimento de concreto betuminoso                     | 2,00                 |
| Base ou revestimento pré-misturado à quente, de graduação densa | 1,70                 |
| Base ou revestimento pré-misturado à frio, de graduação densa   | 1,40                 |
| Base ou revestimento betuminoso por penetração                  | 1,20                 |

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

**Quadro 3 – Determinação do coeficiente K por composição de camadas granulares.**

| <b>Camadas granulares</b>                                              | <b>Coeficiente K</b> |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias superior à 45 kg/cm | 1,70                 |
| Idem, com resistência à compressão a 7 dias entre 45 Kg/cm e 28 Kg/cm  | 1,40                 |
| Idem, com resistência à compressão a 7 dias entre 28 Kg/cm e 21 Kg/cm  | 1,20                 |

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

Sendo obtidos todos os valores, são resolvidas as inequações, podendo ser arredondados os valores para maior adequabilidade da espessura do pavimento, afim de se conceber a estrutura com a melhor condição de execução.

Além deste, outro método indispensável a ser tratado é o MeDiNa (Método Nacional de dimensionamento de Pavimentos). De acordo com Souto (2024), a aplicação do método de dimensionamento DNIT (citado anteriormente), levou à conclusão de que o método apresenta imperfeições, já que as soluções obtidas pelo método, quando submetidas à solicitação, apresentam defeitos prematuros como afundamento nas trilhas de roda dos veículos e trincas no revestimento asfáltico adotado.

“Ante esses fatos, pesquisadores de diversos países, dentre eles o Brasil, realizaram estudos sobre o comportamento de materiais e desempenho de pavimentos ao longo de sua vida útil, para aperfeiçoar a metodologia de dimensionamento vigente.” (Souto, 2024, p. 6).

Para isto, o programa de estudo teve como objeto o monitoramento de alguns trechos experimentais implantados no Brasil, para criar um banco de dados destinado ao desenvolvimento de um método mecânico empírico de dimensionamento. Com isto, foi proposto um novo método de dimensionamento que consegue avaliar as trincas por fadiga e os

afundamentos de trilha de roda no revestimento asfáltico, contrapondo o até então utilizado método DNIT, que apenas avalia a deformação permanente do subleito e camadas granulares do pavimento. (Souto, 2024).

No dimensionamento pelo MeDiNa, um novo parâmetro é inserido, o Módulo de Resiliência, que de acordo com IPR; DNIT (2020), se relaciona com a elasticidade linear ou não linear (a depender da opção escolhida no programa) das camadas do pavimento.

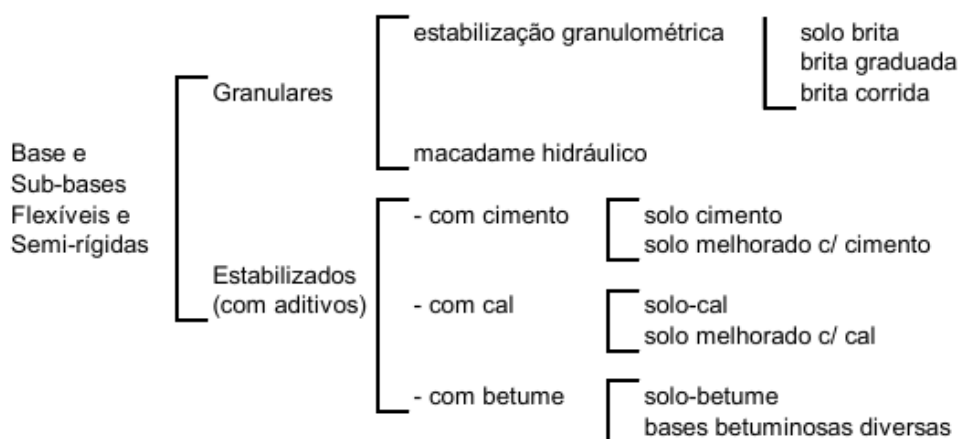
De acordo com Souto (2024), os modelos de previsão de desempenho e cálculo de tensões e deformações para o MeDiNa, levam em consideração as propriedades elásticas dos materiais, como os módulos de resiliência.

A análise mecânica dos pavimentos pretende avaliar tensões, deformações e deslocamentos causados pela solicitação do tráfego ao pavimento, considerando a deformação das camadas e os danos causados pela fadiga, observando a influência da variação das condições climáticas. Dessa forma, os problemas que atingiriam a estrutura podem ser previstos e corrigidos, levando a uma maior durabilidade (Barbosa *et al.*, 2021).

### 2.3.2 MATERIAIS E TÉCNICAS EXECUTIVAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Inicialmente, para bases e sub-bases flexíveis são utilizados os métodos Granulares ou estabilizados com aditivos.

A Figura 6 apresenta a disposição e classificação dos métodos citados acima.



**Figura 6 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.**

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

Em bases granulares, o método pode ser o de Estabilização Granulométrica (Solo Brita, Brita Graduada e Brita Corrida).

“São as camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação (...). ” (Manual de Pavimentação – DNIT, 2006, p.96).

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os Macadames Hidráulicos e secos são descritos da seguinte forma:

Consiste de uma camada de brita de graduação aberta de tipo especial (ou brita tipo macadame), que, após compressão, tem os vazios preenchidos pelo material de enchimento, constituído por finos de britagem (pó de pedra) ou mesmo por solos de granulometria e plasticidade apropriadas; a penetração do material de enchimento é promovida pelo espalhamento na superfície, seguido de varredura, compressão (sem ou com vibração) e irrigação, no caso de macadame hidráulico. O macadame seco ou macadame a seco, ao dispensar a irrigação, além de simplificar o processo de construção evita o encharcamento, sempre indesejável, do subleito (DNIT, 2006, p.96).

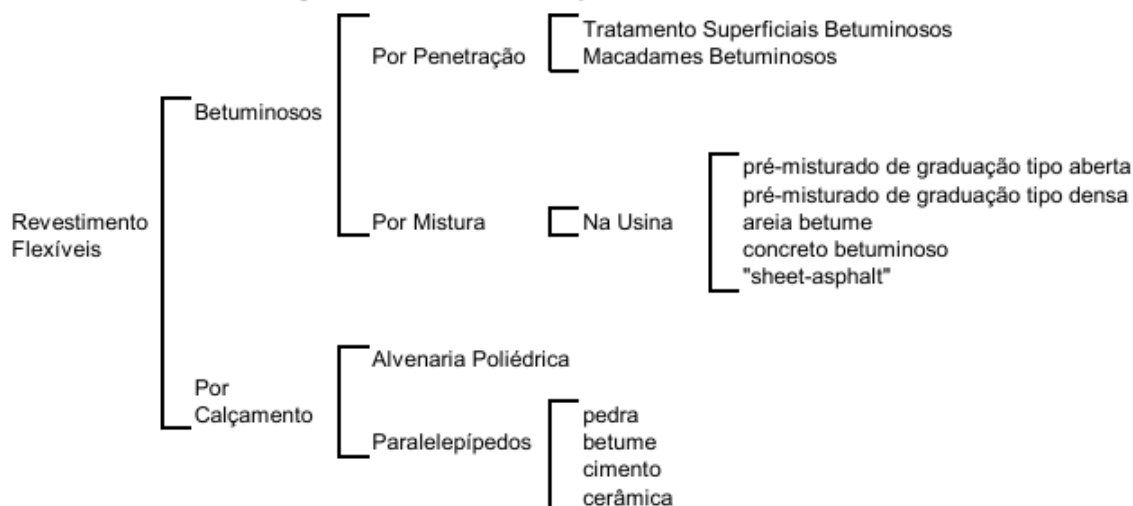
De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o método de solo-cimento consiste na mistura e compactação de solo, cimento Portland e água, visando a obtenção de um material com alta rigidez à flexão, tendo como base um teor de cimento entre 6 e 10%, enquanto que o método de solo melhorado com cimento é descrito da seguinte forma:

“Esta modalidade é obtida mediante a adição de pequenos teores de cimento (2% a 4%), visando primordialmente à modificação do solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água (...). ” (Manual de Pavimentação –DNIT, 2006, p.97).

A estabilização pela técnica de solo com cal procura obter os mesmos resultados da mistura com cimento, o enrijecimento, a trabalhabilidade e redução da expansão. Além da Cal, outros materiais podem ser utilizados, como cinza volante ou pozolana artificial. O processo ocorre por transformação das características do solo, pozolanização e carbonatação. (Bernucci *et al.*, 2008)

“É uma mistura de materiais betuminosos (emulsão, asfaltos líquidos, alcatrões) e solos argilo-siltosos ou argilo-arenosos para trabalharem como material estabilizado para base ou sub-base, impermeabilizando o solo e aumentando o seu suporte. ” (Marques, 2013, p.83).

Os materiais e técnicas mais utilizados para a execução dos revestimentos flexíveis e suas classificações por método de execução e materiais utilizados, de acordo com o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), estão descritos na Figura 7:



**Figura 7 – Classificação dos revestimentos.**

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT (2006).

Inicialmente, em se tratando de pavimentos de alvenaria poliédrica, que, segundo Marques (2013), consiste de um revestimento de pedras irregulares/paralelepípedos, assentadas por processo manual, rejuntadas com areia, betume e assentes sobre um colchão de areia ou de solo estabilizado.

Segundo o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), após a intensificação do uso de pavimentos de concreto e asfalto, a utilização de revestimentos por calçamento caiu consideravelmente, sendo usado apenas par áreas como pátios e estacionamentos.

Dentre os métodos que utilizam materiais betuminosos, existem duas modalidades, sendo elas por penetração ou por mistura. Quando por penetração, esta pode ser invertida ou direta, sendo a invertida aquela que consiste na aplicação de camada de material betuminoso seguida por aplicação e compactação de camada de materiais granulares (agregados). Seguindo o número de operações realizadas (camada de betume seguida de camada de agregado) têm-se a nomenclatura dada ao tipo de revestimento, sendo Tratamento superficial simples, duplo ou triplo (Manual de Pavimentação – DNIT 2006).

Já a metodologia por penetração direta, de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), são os revestimentos executados através do espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria apropriada, sendo cada camada, após compressão,

submetida a uma aplicação de material betuminoso e recebendo, ainda, a última camada, uma aplicação final de agregado miúdo.

Citados os métodos por penetração, existem ainda as técnicas por mistura, onde os agregados são pré-envolvidos com o betume, anteriormente a compressão (Manual de Pavimentação – DNIT, 2006). Dentre as principais técnicas que utilizam do método por mistura, estão:

- Concreto Asfáltico (CBUQ);
- Pré-misturado à quente ou à frio (PMQ/PMF)
- Areia asfalto à quente;
- Areia asfalto à frio;
- Pré-misturado na pista ou Road mixes;

Tais métodos estão descritos nos tópicos abaixo, na mesma ordem citada acima.

- *Concreto Asfáltico (CBUQ)*

O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente), ou concreto asfáltico, consiste na mistura de agregado mineral graduado, material de enchimento e material betuminoso, à quente em usina apropriada, sendo espalhado e comprimido também à quente (Marques, 2013). É o método mais comum na pavimentação rodoviária Brasileira.

- *Pré-misturado à quente ou à frio (PMQ/PMF)*

Consiste na mistura de material betuminoso, emulsão asfáltica ou asfalto diluído devidamente dosado e agregado mineral, podendo ser misturado, aplicado e comprimido à frio ou à quente (Marques, 2013).

- *Areia asfalto à quente*

De acordo com Marques (2013), este método consiste na mistura, à quente, de material betuminoso e areia (geralmente passante na # 10). Podem ser misturadas duas ou três areias para obtenção da granulometria desejada.

- *Areia asfalto à frio*

“É a mistura de asfalto diluído ou emulsão asfáltica e agregado miúdo, na presença ou não de material de enchimento, em equipamento apropriado. O produto é espalhado e comprimido a frio.” (Marques, 2013, p.151).

- *Pré-misturado na pista ou Road mixes*

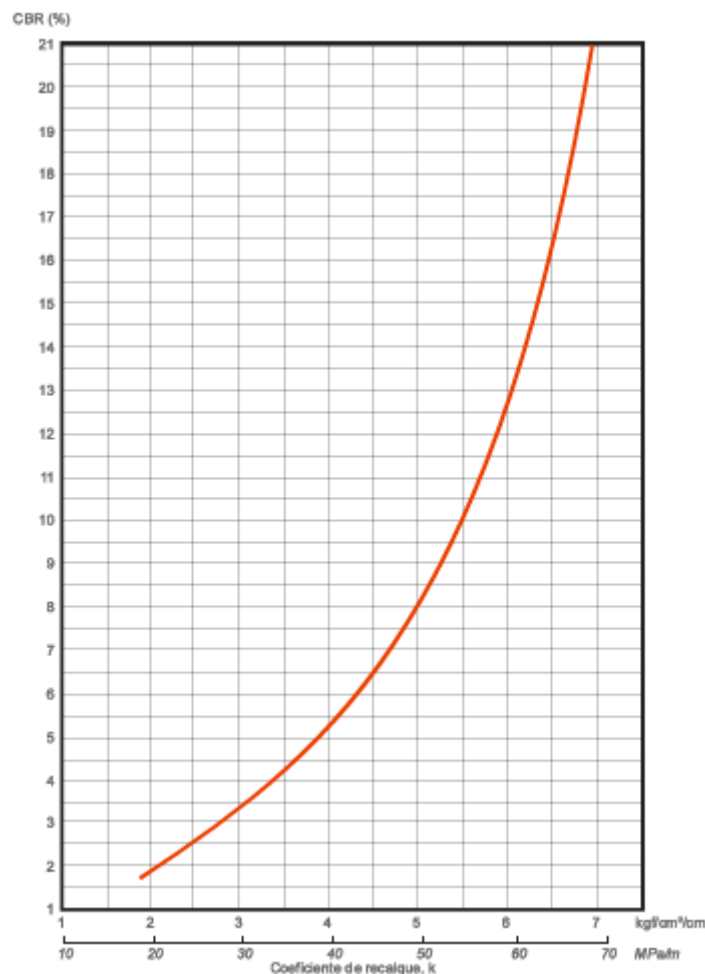
Consiste nas misturas realizadas em campo, ou seja, já na própria pista, de agregados de granulometria definida e emulsões ou asfalto diluído (Marques, 2013).

### 2.3.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO

Para este método, são considerados dois parâmetros inicialmente, o coeficiente de recalque ( $k$ ), e o módulo de reação, sendo este coeficiente de recalque, de acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

Coeficiente este, que é obtido por uma prova de carga descrita na normativa DNIT 055/2004-ME. Neste ensaio, são relacionadas as pressões verticais propagadas ao subleito por meio de uma placa rígida que possui, no mínimo, 76 centímetros de diâmetro, com os deslocamentos verticais (Costa, 2013).

A Figura 8, traz o ábaco citado no parágrafo anterior:



**Figura 8 - Relação CBR x Coeficiente de recalque.**

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

No método de dimensionamento PCA/84, para obtenção da espessura das placas de concreto do pavimento, são considerados FSC's (Fatores de Segurança para as Cargas), de acordo com a dimensão do tráfego para o qual está sendo dimensionado o pavimento em questão, explicitados no Quadro 4:

**Quadro 4 - Fatores de segurança para as cargas.**

| Tipo de pavimento                                                                                                                     | FSC     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos por exemplo). | 1,0     |
| Para estradas e vias com moderada frequência de caminhões                                                                             | 1,1     |
| Para altos volumes de caminhões                                                                                                       | 1,2     |
| Pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal                                                                            | Até 1,5 |

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

Para o dimensionamento pelo método PCA/84, os parâmetros iniciais são:

- Escolha do tipo de acostamento;
- Definição da presença ou não das barras de transferência;
- Resistência do concreto aos 28 dias;
- Coeficiente de recalque (k);
- Os Fatores de Segurança das Cargas;
- Tráfego esperado para cada nível de carga de acordo com a vida de projeto;
- Espessura aleatória para início;

Inicialmente, são determinadas as tensões equivalentes para eixos simples, tandem duplos e triplos, o fator de erosão de acordo com o tipo de junta e acostamento escolhidos e, logo após, o cálculo dos fatores de fadiga para cada tipo de eixo (simples, tandem duplo ou tandem triplo) (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

Com estes valores em mãos, determinam-se as repetições admissíveis utilizando o fator de fadiga e as cargas por eixo, e com o fator de erosão e as cargas por eixo. Dividindo as repetições esperadas pelas respectivas repetições admissíveis, obtém-se o dano por erosão e as porcentagens de resistência à fadiga (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

Ao somar os resultados dos efeitos de fadiga e os resultados dos efeitos de erosão, verifica-se se o resultado ultrapassa o valor de 100%. As duas colunas devem se aproximar ao máximo do valor de 100%, o que se resulta em uma placa bem aproveitada e bem dimensionada (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

As tabelas e ábacos utilizados para a obtenção dos valores citados acima podem ser encontradas no Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

#### 2.3.4 MATERIAIS E TÉCNICAS EXECUTIVAS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

No que se refere a pavimentos rígidos ou pavimentos de concreto de cimento, os principais materiais utilizados são o cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, água, materiais selantes de junta e aditivos (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

Para produção do concreto de cimento Portland para pavimentos, é essencial que a dosagem e o controle dos materiais sejam realizados de forma rigorosa e precisa.

- *Agregados*

Conforme o Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005), para obras de pavimentação rígida, os agregados utilizados na composição do concreto de cimento Portland passam por exigências específicas diferentes das daquelas que existem para o concreto de edificações e outros tipos de estruturas. Isto, por que o concreto destinado a pavimentação deve ter maior resistência a tração, menor variação volumétrica e elevada resistência às ações solicitantes (meio ambiente e tráfego), fadiga e fissuração.

Os principais aspectos observados diante da seleção dos agregados para concreto de pavimentação, ainda segundo o Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005), são a influência na resistência mecânica do concreto (principalmente à tração na flexão), e a presença ou não de materiais deletérios que possam vir a provocar variações volumétricas ou degradação ao longo do tempo.

Na fase de anteprojeto, a caracterização tecnológica realizada nestes materiais envolve diversificados ensaios que lhes conferem, ou não, a aptidão para compor o concreto em questão, dentre eles:

- Absorção e Massa específica (NBR 9937);
- Abrasão Los Angeles (NBR 6465);
- Índice de forma (NBR 7809);
- Teor de material pulverulento (NBR 7219);
- Esmagamento (NBR 9938);
- Teor de partículas leves (NBR 9936);
- Teor de impurezas orgânicas húmicas (NBR 7220);
- Teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR 7218);

- Granulometria dimensão máxima característica e módulo de finura (NBR 7217);
- 10% de finos (DNER-ME)

Além destes, ainda outros podem ser necessários a depender do tipo do agregado. (Manual de Pavimentos Rígidos- DNIT, 2006).

- *Cimento Portland*

O cimento Portland é o material responsável pela aglutinação dos demais materiais presentes no concreto, agindo como aglomerante hidráulico.

Segundo o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), não são feitas exigências quanto ao tipo de cimento ou quanto aos seus índices físicos e químicos em se tratando de pavimentação com concreto. Porém, é recomendado o uso de Cimento Portland comum (NBR 5732), Cimento Portland composto (NBR 11578), Cimento Portland de Alto Forno (NBR 5735) ou Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736). Já no caso de reparos, pode-se usar o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (NBR 5733).

Para a escolha do cimento a se utilizar, deve ser levado em consideração que ele é um material que possui suas propriedades dentro de limites bastante variáveis, a depender das formulações do produtor (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

“Certas propriedades específicas dos cimentos, conferem às argamassas e concretos variações de desempenho, que podem vir a ser técnica e economicamente significativas. ” (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2006, p.28).

Devido à sensibilidade das características físicas e químicas do material, apesar de não ser exigida nenhuma especificação acerca do cimento a ser utilizado na pavimentação, é preciso ser feito um estudo das principais características que estão sendo buscadas na obra, para que desta forma seja escolhido o material mais econômico, e mais viável tecnicamente para a situação.

O cimento escolhido para a obra, passará por uma análise de exigências normativas estabelecidas pela Norma DNIT 050/2004-EM. Tais exigências, referentes aos quesitos de teores de componentes, exigências químicas do material e exigências físicas e mecânicas, estão de acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005), descritas nos Quadros 5, 6 e 7, a seguir:

**Quadro 5 - Teores dos Componentes (% em massa).**

| TIPO                            | SIGLA  | CLASSE DE RESISTÊNCIA | Clínquer + Sulfato de cálcio (gesso) | Escória granulada de alto-forno | Material Pozolânico | Material Carbonático |
|---------------------------------|--------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| Cimento Portland Comum          | CPI    | 25-32-40              | 100                                  | -                               | -                   | -                    |
|                                 | CPI-S  | 25-32-40              | 99 - 95                              | -                               | -                   | 1 - 5                |
| Cimento Portland Composto       | CPII-E | 25-32-40              | 94 - 56                              | 6 - 34                          | -                   | 0 - 10               |
|                                 | CPII-Z | 25-32-40              | 94 - 76                              | -                               | 6 - 14              | 0 - 10               |
|                                 | CPII-F | 25-32-40              | 94 - 90                              | -                               | -                   | 6 - 10               |
| Cim. Port. Alta resist. Inicial | CP-ARI | -                     | 100 - 95                             | -                               | -                   | 0 - 5                |
| Cim. Port. De Alto Forno        | CPIII  | 25-32-40              | 65 - 25                              | 35 - 70                         | -                   | 0 - 5                |
| Cimento Portland Pozolânico     | CPIV   | 25-32                 | 85 - 45                              | -                               | 15 - 50             | 0 - 5                |

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

**Quadro 6 - Exigências Químicas (% em massa).**

| Tipo de cimento Portland | Resíduo insolúvel | Perda ao fogo | MgO   | SO <sub>3</sub> | CO <sub>2</sub> | S     |
|--------------------------|-------------------|---------------|-------|-----------------|-----------------|-------|
| CPI                      | ≤ 1,0             | ≤ 2,0         | ≤ 6,5 | ≤ 4,0           | ≤ 1,0           | -     |
| CPI-S                    | ≤ 5,0             | ≤ 4,5         |       |                 | ≤ 3,0           | -     |
| CPII-E                   | ≤ 2,5             | ≤ 6,5         | ≤ 6,5 | ≤ 4,0           | ≤ 5,0           | -     |
| CPII-Z                   | ≤ 16,0            |               |       |                 |                 | -     |
| CPII-F                   | ≤ 2,5             |               |       |                 |                 | -     |
| CPIII                    | ≤ 1,5             | ≤ 4,5         | -     | ≤ 4,0           | ≤ 3,0           | ≤ 1,0 |
| CPIV                     | (1)               | ≤ 4,5         | ≤ 6,5 | ≤ 4,0           | ≤ 3,0           | -     |
| CPV-ARI                  | ≤ 1,0             | ≤ 4,5         | ≤ 6,5 | ≤ 3,5 (2)       | ≤ 3,0           | -     |
|                          |                   |               |       | ≤ 4,5 (2)       |                 |       |

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005)

**Quadro 7 - Exigências Físicas e Mecânicas.**

| Tipo     | Classe De Resistência | Finura                |                       | Tempo de pega (h) |          | Expansibilidade (mm) |          | Resistência à compressão (Mpa) |        |        |         |         |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------|----------------------|----------|--------------------------------|--------|--------|---------|---------|
|          |                       | Resíduo Peneira 75µ % | Área específica m²/kg | Início            | Fim      | A frio               | A quente | 1 dia                          | 3 dias | 7 dias | 28 dias | 91 dias |
| CPI      | 25                    | ≤12,0                 | ≥240                  | ≥1                | ≤ 10     | ≤5                   | ≤5       | -                              | ≥8     | ≥15    | ≥25     | -       |
| 32       |                       | ≤12,0                 | ≥260                  |                   | (1)      | (1)                  |          |                                | ≥10    | ≥20    | ≥32     |         |
| CPIS 40  |                       | ≤10,0                 | ≥280                  |                   |          |                      |          |                                | ≥15    | ≥25    | ≥40     |         |
| CPIIE    | 25                    | ≤12,0                 | ≥240                  | ≥1                | ≤ 10     | ≤5                   | ≤5       | -                              | ≥8     | ≥15    | ≥25     | -       |
| CPIIZ    | 32                    | ≤12,0                 | ≥260                  |                   | (1)      | (1)                  |          |                                | ≥10    | ≥20    | ≥32     |         |
| CPIIF 40 |                       | ≤10,0                 | ≥280                  |                   |          |                      |          |                                | ≥15    | ≥25    | ≥40     |         |
| CPIII    | 25                    | ≤8,0                  | -                     | ≥1                | ≤ 12     | ≤5                   | ≤5       | -                              | ≥8     | ≥15    | ≥25     | ≥32     |
| 32       |                       |                       |                       |                   | (1)      | (1)                  |          |                                | ≥10    | ≥20    | ≥32     | ≥40     |
| 40       |                       |                       |                       |                   |          |                      |          |                                | ≥12    | ≥23    | ≥40     | ≥48     |
| CPIV     | 25                    | ≤8,0                  | -                     | ≥1                | ≤ 12     | ≤5                   | ≤5       | -                              | ≥8     | ≥15    | ≥25     | ≥32     |
| 32       |                       |                       |                       |                   | (1)      | (1)                  |          |                                | ≥10    | ≥20    | ≥32     | ≥40     |
| CPV-ARI  |                       | ≤ 6,0                 | ≥300                  | ≥1                | ≤ 10 (1) | ≤5 (1)               | ≤5       | ≥14                            | ≥24    | ≥34    | -       | -       |

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

• **Aditivos**

Os aditivos são materiais não indispensáveis à composição ou finalidade do concreto, mas que quando adicionados, reforçam ou proporcionam certas características do concreto, seja no estado plástico ou no estado endurecido (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

“É possível classificar os aditivos com base em seus efeitos, o que, apesar do menor rigor científico se comparado com a classificação fundada nas ações químicas ou físico-químicas, é de maior interesse prático.” (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005, p.39).

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), os aditivos podem ser classificados em:

- Redutores de água (plastificantes e superplastificantes);
- Incorporadores de ar;
- Aceleradores de pega;
- Retardadores de pega;
- Aceleradores de endurecimento;
- Impermeabilizantes;

- Expansores;
- Anticorrosivos, fungicidas, germicidas e inseticidas;

- *Selantes*

Os selantes de juntas têm por objetivo impedir a infiltração de água, e materiais sólidos (areia e outros) através delas (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005).

“A infiltração de água, mesmo quando no projeto consta a execução de uma sub-base adequada, não-bombeável, traz consequências danosas à durabilidade do pavimento como um todo (...)” (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005, p.48).

“Já a presença de materiais sólidos impede que a junta se movimente livremente, fato que, em tempo quente, quando a abertura da junta se estreita, desenvolverá tensões de compressão imprevistas, estas [...] podem atingir valores seriamente prejudiciais (...)” (Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT, 2005, p.48).

A vedação das juntas proporciona maior segurança à integridade das placas de concreto de pavimentação, já que protegendo as juntas, estas não formarão desgastes mais sérios posteriormente à utilização brusca do pavimento.

### **3.ANÁLISE COMPARATIVA**

#### **3.1.COMPARATIVO TÉCNICO**

Para se escolher um tipo de pavimento a ser utilizado em alguma obra de pavimentação urbana ou rodoviária, é necessário levar em consideração alguns parâmetros técnicos de cada tipo de pavimento, como composição, durabilidade, manutenção e desempenho (Petronio *et al.*, 2024).

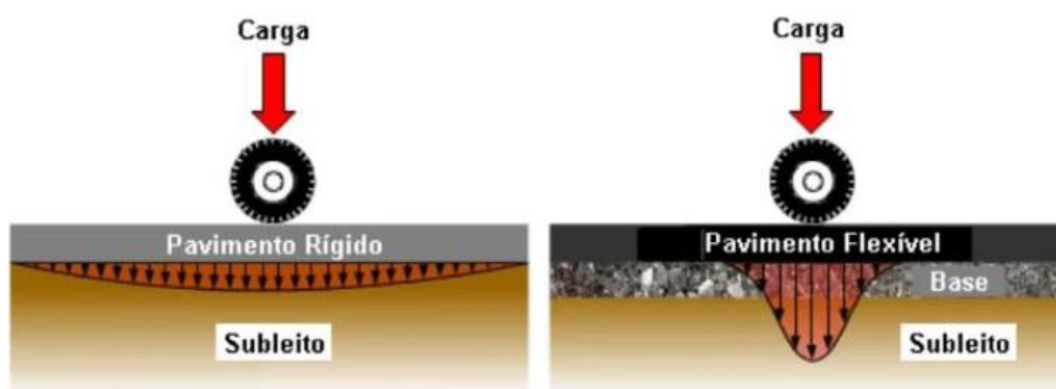
##### **3.1.1 COMPOSIÇÃO**

Quanto a composição, o pavimento rígido é descrito pelo DER (2006), como formado por placas de concreto de cimento Portland, sendo sustentadas pelas suas camadas de bases, compostas por materiais granulares ou estabilizados com cimento. Concomitantemente, Bernucci *et al.* (2022) caracteriza o pavimento flexível como sendo composto por certas camadas de material asfáltico que possuem características elásticas que dissipam as cargas de forma gradativa pelas camadas.

Tais diferenças na composição de cada pavimento, confere a cada um, características únicas que se adaptam ou não à certas situações de projeto como condições ambientais (relevo, clima, entre outras) e tipos de cargas.

### 3.1.2 CONSTRUÇÃO

A construção de cada tipo de pavimento leva em conta diferentes tipos de mão de obra e diferentes métodos executivos, sendo, de acordo com Guimarães Neto (2011), a estrutura do pavimento rígido mais simples que a estrutura do pavimento flexível, em razão da forma como as cargas são absorvidas por cada um. Isto pode ser observado na Figura 9:



**Figura 9 – Distribuição das cargas nos pavimentos.**

Fonte: Araújo (2016).

Em conformidade com Araújo (2016), o pavimento rígido possui estrutura mais simples em comparação ao flexível, onde a camada de base e revestimento são uma só, agindo como as camadas de base do pavimento de asfalto, tendo necessidade apenas de mais uma camada de sub-base e regularização do subleito.

A pavimentação rígida, por não ser muito empregada nas rodovias do país, leva uma certa desvantagem em relação à flexível, a falta de obras deste cunho no meio da engenharia rodoviária faz com que haja uma deficiência na quantidade de empresas e mão-de-obra especializadas na área, o que resulta em falhas no controle tecnológico e falhas construtivas (Mendonça Filho, 2018 apud Petronio, *et al.* 2024).

### 3.1.3 MANUTENÇÃO

Se tratando de manutenção, nos pavimentos flexíveis, há reparos frequentes devido à sua vulnerabilidade a fissuras e deformações ocasionadas pelo tráfego e solicitações causadas por variações climáticas. Em épocas quentes, podem ser feitos reparos associados às trilhas de

rodas e ondulações, já em climas mais frios, o ciclo de congelamento e descongelamento pode causar problemas como fissuras e buracos (Petronio, *et al.* 2024).

Já no pavimento de concreto, estes tipos de problemas são menos recorrentes, já que o material é dotado de maior resistência ao desgaste, e por ser rígido, não possui a característica da deformação plástica como o pavimento flexível. Por tais motivos, o pavimento de concreto de cimento Portland possui uma menor necessidade de reparos recorrentes (Mendonça Filho, 2018 apud Petronio, *et al.* 2024).

Por outro lado, de acordo com Ribas (2017), os reparos realizados em pavimentos flexíveis são obras mais rápidas, em que o tráfego é permitido logo após a finalização dos trabalhos, o que não é possível em pavimentos de concreto de cimento, já que é necessário aguardar pelo tempo de cura do material.

### 3.1.4 DURABILIDADE

De acordo com Araújo *et al.* (2016), o pavimento rígido pode se manter em boas condições entre 25 e 30 anos, recebendo os cuidados necessários. Já o pavimento flexível, no Brasil, é construído para resistir cerca de 10 anos, porém, com a ausência de manutenção, dura, na maioria das vezes, até 6 anos.

“Defeitos no pavimento de concreto provêm, na maioria das vezes, de falhas executivas ou dos materiais empregados, criando uma necessidade, além do rigoroso controle de qualidade na construção, de realização de manutenções rotineiras. ” (Araújo *et al.*, 2016, p.193).

“Variando de oito a 12 anos de duração, a espessura do revestimento pode ser de 5, 15 ou 20 centímetros, também de acordo com o fluxo de veículos. O excesso de peso dos caminhões, assim como chuva em demasia, pode diminuir o tempo de vida do material. ” (Araújo *et al.*, 2016, p.193).

Algumas características referentes aos quesitos anteriormente discutidos no item 3.1. Comparativo técnico (Composição, construção, manutenção, durabilidade, entre outros) referentes aos pavimentos de concreto de cimento Portland (rígidos) e aos pavimentos de concreto asfáltico usinado (flexíveis), dispostos de forma comparativa, estão listadas de forma ordenada no Quadro 8:

**Quadro 8 - Comparativo dos Pavimentos.**

| <b>Pavimentos Rígidos</b>                                                                           | <b>Pavimentos Flexíveis</b>                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estruturas mais delgadas de pavimento.                                                              | Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas.                                |
| Resiste à ataques químicos (óleos, graxas, combustíveis).                                           | É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleos, graxas, combustíveis).                                                |
| Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança.                         | A visibilidade é bastante afetada durante a noite ou em condições climáticas adversas.                                     |
| 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 à 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).                                                                              |

Fonte: Araújo (2016).

### 3.2.COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, o método vigente, segundo o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), é o método empírico, que se baseia apenas no CBR da camada de subleito do pavimento, enquanto que, para pavimentos rígidos, um dos métodos mais visados é o método PCA – 84, conforme o manual de pavimentos rígidos do DNIT (2005), este método toma como base o desgaste do pavimento por erosão e fadiga para obtenção dos valores das espessuras das placas de concreto.

Tem-se ainda, o Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos (MeDiNa) para pavimentos flexíveis, que, segundo Souto (2024), é um software que, através da rotina de cálculo de análise de camadas de múltiplas camadas, realiza a verificação do dimensionamento de estruturas de pavimentos.

### 3.3.COMPARATIVO DE CUSTOS

#### 3.3.1 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Para realizar a avaliação dos custos de implantação dos dois tipos de pavimento, inicialmente o presente trabalho se sustenta na experiência de Costa (2013), que utilizou em sua pesquisa dois dimensionamentos de pavimentos fictícios para fins de estudo.

Costa utilizou os parâmetros de projeto: Período de projeto (P), Volume de tráfego (Vf) e um subleito fictício, com os mesmos valores para um dimensionamento de pavimento flexível e um dimensionamento de um pavimento rígido.

Os valores considerados por Costa (2013) foram:

- Vf = 2500 veículos (VDM);
- Subleito CBR = 13%;
- P = 20 anos;

Aplicando os métodos de dimensionamento, Costa (2013) obteve os valores descritos na Tabela 1:

**Tabela 1 - Espessura dos Pavimentos Dimensionados.**

| Espessura total dos pavimentos (cm) |        |
|-------------------------------------|--------|
| Flexível                            | Rígido |
| 38                                  | 23     |

Fonte: Costa (2013).

Em seu dimensionamento, Costa (2013) obteve no pavimento rígido, 13 cm de placa de concreto de 4,5 MPa, e sub-base de 10 cm de concreto rolado. Já para o flexível, foram considerados 15 cm de sub-base de solo granulometricamente estabilizado, 13 cm de base granular, e 10 cm de revestimento em CBUQ (5 cm de binder + 5 cm de capa de rolamento).

Para determinar os valores de implantação de cada pavimento dimensionado, Costa utilizou a Tabela SICRO2 – DNIT, obtendo os resultados dispostos na Tabela 2:

**Tabela 2 - Custo por metro.**

| Custos associados à 1 metro de pavimento flexível – e = 38 cm; L = 3,5 m. |                                                                      |             |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Item                                                                      | Serviço                                                              | Custo (R\$) |
| 1                                                                         | Sub-base de solo estabilizado granul. sem mistura [15 cm]            | 5,10        |
| 2                                                                         | Base de brita graduada [13 cm]                                       | 28,31       |
| 3                                                                         | Imprimação                                                           | 0,70        |
| 4                                                                         | Pintura de Ligação                                                   | 0,49        |
| 5                                                                         | CBUQ – binder [5 cm]                                                 | 9,06        |
| 6                                                                         | CBUQ – Capa de rolamento [5 cm]                                      | 13,31       |
| <b>TOTAL</b>                                                              |                                                                      | 56,96       |
| Custos associados à 1 metro de pavimento rígido – e = 23 cm; L = 3,5 m.   |                                                                      |             |
| 1                                                                         | Sub-base de concreto rolado [10cm]                                   | 39,17       |
| 2                                                                         | Placa de conc. simples 4,5 MPa aplic. Com formas deslizantes [13 cm] | 52,01       |
| <b>TOTAL</b>                                                              |                                                                      | 91,18       |

Fonte: Costa (2013).

Inicialmente, os valores obtidos por Costa (2013), mostram que o pavimento rígido possui um custo de implantação cerca de 60% maior em relação ao pavimento flexível, porém, isto não quer dizer que ele será o mais oneroso no decorrer da vida de projeto.

Em uma segunda análise, outro estudo levado em consideração foi o realizado por Ramos *et al.* (2024), baseado na visita e análise das rodovias BR-163, no trecho entre os quilômetros 126 até 198, executada em pavimento flexível, com um tráfego diário médio anual de 10.260 veículos em 2014 responsável pelo escoamento de boa parte da produção agrícola do oeste do estado, e a rodovia que liga a fábrica de cimentos Itambé até a jazida de calcário Rio Bonito (23 quilômetros), localizada no município de Campo Largo – PR, executada em pavimento rígido e com tráfego predominante de carretas carregadas com minério de calcário, podendo chegar a 55 toneladas de peso.

“Durante as visitas, foram aplicados checklists técnicos. [...] incluíram itens como o tipo de pavimento, características visuais de desgaste, presença de trincas ou buracos, condições da camada de rolamento, e eficiência das intervenções de manutenção previamente realizadas. ” (Ramos *et al.*, 2024, p. 2).

Na etapa seguinte, Ramos *et al.* (2024) realizou uma análise quantitativa dos custos de implantação e manutenção dos pavimentos, levantando dados de orçamentos reais para obras de pavimentos, englobando custos de materiais, mão-de-obra e maquinário.

A seguir, na Tabela 3, é possível examinar os valores obtidos por Ramos *et al.* (2024) em sua pesquisa referentes aos custos médios gerenciais de implantação das pistas.

**Tabela 3 - Custos médios gerenciais.**

| CUSTOS MÉDIOS GERENCIAIS – DNIT Mês base: jan./14                                                                                                                         |                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES; DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT                                                                                 |                |
| Valores obtidos utilizando-se os Manuais de Soluções Técnicas Gerenciais - CGPLAN/COVIDE                                                                                  |                |
| OBRA/SERVIÇO                                                                                                                                                              | MÉDIA R\$ / KM |
| CONSTRUÇÃO P/ os casos específicos de TRÁFEGO PESADO                                                                                                                      |                |
| CBUQ com 12 centímetros na pista e CBUQ 7 centímetros no acostamento                                                                                                      | 4.399.259,03   |
| Implantação de revestimento em CBUQ com 18 centímetros na pista e acostamento, utilizando método de pavimento invertido com base em BGTC com espessura de 17 centímetros. | 5.770.902,10   |
| Implantação de revestimento em placa de Concreto de Cimento Portland com espessura de 18 centímetros na pista e acostamento.                                              | 3.507.481,41   |
| Implantação de revestimento em placa de Concreto de Cimento Portland com espessura de 24 centímetros na pista e acostamento.                                              | 5.212.451,49   |

Fonte: Ramos *et al.* (2024)

De acordo com Ramos *et al.* (2024), o custo inicial do pavimento rígido é maior devido ao alto custo do concreto de cimento Portland e da necessidade de mão-de-obra especializada para sua implantação. Porém, essa diferença no custo inicial de implantação é compensada ao longo do tempo pela diferença nos custos de manutenção.

### 3.3.2 CUSTOS DE MANUTENÇÃO

“Os custos de manutenção são um fator crucial na avaliação econômica dos pavimentos, pois afetam significativamente o custo total ao longo da vida útil de uma estrada.” (Petronio *et al.*, 2024, p.12).

Abaixo, a Figura 10, mostra a diferença entre os custos de manutenção realizados na estrada BR-408, situada na região nordeste do Brasil, durante um período de 20 anos, onde o pavimento flexível possui custos com manutenção desde o primeiro ano de sua operação, deixando ainda em evidência, o fato agravante de que, a alternativa flexível é dimensionada para uma vida útil de 10 anos, enquanto que, o pavimento rígido analisado, que é dimensionado/projetado para um ciclo de vida de 20 anos, somente vai estar submetido a tais despesas, após o período referente à quase metade de sua vida de projeto.



**Figura 10 – Custos de manutenção no período de 20 anos.**

Fonte: Silva Filho (2011), apud Petronio *et al.* (2024).

Analisando o gráfico, é possível observar que o pavimento flexível, por ser mais suscetível à problemas como fissuras e fadiga (o que se deve à sua característica de deformação plástica), e por ser mais afetado por variações climáticas, possui uma maior recorrência de serviços de manutenção, o que gera um maior custo de conservação em relação ao pavimento

rígido que, por sua vez, possui maior resistência e sofre menos com problemas como fadiga, fissuras e desgaste.

Confirmando o que foi exposto acima, a pesquisa de Ramos *et al.* (2024) explicita os custos de manutenção das duas rodovias (BR-163, executada em pavimento flexível, e a rodovia que liga Fábrica de cimentos Itambé até a jazida de calcário Rio Bonito, executada em pavimento rígido) nas Tabelas 4 e 5:

**Tabela 4 - Custos de restauração de pavimento flexível.**

| Custos de Restauração                                                                                                                               |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Serviço                                                                                                                                             | R\$ / Km     |
| Solução composta por fresagem de 5 centímetros, aplicação de 5 centímetros de CBUQ e recapeamento com 5 centímetros de CBUQ na pista e acostamento. | 1.122.805,14 |

Fonte: Ramos *et al.* (2024)

**Tabela 5 - Custos de substituição de placas de concreto.**

| Código TCPO  | Componentes do Serviço                                                                                                                | Valor p/m² | Valor p/km     |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|
| 022752.8.4.3 | PAVIMENTAÇÃO de concreto armado fck = 25 MPa, e= 22 cm sobre lastro de brita graduada e = 10 cm, capacidade para cargas de até 6 t/m² |            |                |
| 01270.025.1  | Armador                                                                                                                               | R\$ 0,51   | R\$ 3.691,44   |
| 01270.0.40.1 | Pedreiro                                                                                                                              | R\$ 3,78   | R\$ 27.200,16  |
| 01270.0.45.1 | Servente                                                                                                                              | R\$ 8,36   | R\$ 60.192,00  |
| 02720.8.6.1  | Lastro de brita 3 e 4 apiloado manualmente com maço de até 30 kg                                                                      | R\$ 18,03  | R\$ 129.805,20 |
| 033103.1.6   | Concreto dosado em central convencional brita 1 e2 (resistência: 25,0 MPa)                                                            | R\$ 62,40  | R\$ 449.258,40 |
| 051203.14.4  | Barra de aço de transferência (bitola:25,0 mm / massa linear da barra: 1,93 kg/m)                                                     | R\$ 2,35   | R\$ 16.909,20  |
| -            | Vibro-acabadora sobre esteiras, diesel, potência 77 HP (57 kW) - vida útil 20.000 h                                                   | R\$ 29,05  | R\$ 209.149,20 |
| 07920.3.4.1  | Selante a base de poliuretano                                                                                                         | R\$ 1,30   | R\$ 9.327,17   |
| 22500.9.10.1 | Serra para corte de pavimento, elétrica, potência7,5 HP (5,6 kW) - vida útil 8.000 h                                                  | R\$ 0,23   | R\$ 1651,10    |
| Custo Total  |                                                                                                                                       | R\$ 126,00 | R\$ 907.183,87 |

Fonte: Ramos *et al.* (2024)

### 3.3.3 CUSTOS ANALISANDO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MEDINA

Levando em consideração a experiência de Cavalet *et al.* (2019), que utilizou um trecho da rodovia SC-114 entre Otacílio Costa e a BR-282, como base de dados disponibilizados pela

empresa responsável pelo projeto da via (SOTEPa), para o dimensionamento de um pavimento flexível pelo método MeDiNa, e um pavimento rígido pelo método PCA/84.

“Para a análise comparativa entre os pavimentos adotou-se extensão de 1.000 m. Considerou-se no dimensionamento a pista com duas faixas de rolamento de 3,50 m e acostamento nas duas margens de 2,50 m.” (Cavalet *et al.*, 2019, p. 1249).

Em sua pesquisa, Cavalet *et al.* (2019) estipulou para os dimensionamentos propostos, um período de análise de 20 anos após o ano de abertura para o tráfego, que foi definido como sendo 2020, onde foram observados todos os custos, e foram definidas intervenções de manutenção para manter a qualidade e serventia dos pavimentos até o fim do prazo.

Para o dimensionamento do pavimento flexível utilizando o método MeDiNa, foi informado um período de projeto de 10 anos, geralmente adotado para pavimentos flexíveis, um CBR do subleito de 8%, e um tráfego N da ordem de  $5,63 \times 10^7$  (Cavalet *et al.*, 2019).

O resultado obtido por Cavalet *et al.* (2019) foi um pavimento com 15 cm de sub-base em macadame seco, base de brita graduada também em 15 cm, e revestimento com duas camadas, com 6,1 cm e 10 cm de concreto asfáltico com polímeros, pois as misturas convencionais não atenderiam às solicitações aplicadas durante o período de projeto.

No dimensionamento do pavimento rígido pelo método PCA/84, considerou-se um período de projeto de 20 anos, indicado pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), CBR também de 8% e, para eixos simples (6 t), um N de  $1,49 \times 10^7$ , para eixos simples (10 ton.) N de  $5,90 \times 10^6$ , eixos duplos (17 t) N igual a  $1,2 \times 10^7$  e para eixos triplos (25,5 t) N de  $5,83 \times 10^6$ . Admitiu-se também, um FSC (Fator de segurança para as cargas) de 1,2, utilizado para tráfegos intensos, também foram admitidas barras de transferência e ligação, e acostamento de concreto (Cavalet *et al.*, 2019).

O resultado obtido foi de 20 cm de espessura para placa de concreto de 3,50x5,00 metros, e 10 cm de sub-base em CCR (Concreto Compactado com Rolo). Barras de transferência em aço CA-25, de diâmetro de 25 mm e comprimento de 46 cm, dispostas a cada 30 cm, e barras de ligação em aço CA-50, com diâmetro de 10 mm, comprimento de 75 cm, dispostas a cada 100 cm (Cavalet *et al.*, 2019).

A seguir, a Tabela 6 apresenta os custos de construção das duas vias, e a Tabela 7 apresenta os custos de manutenção nos anos estipulados para os serviços. Para a composição dos custos, Cavalet *et al.* (2019) utilizou o relatório analítico da composição de custos do Sistema de Custos Rodoviários (SICRO), do DNIT.

**Tabela 6 - Custos de implantação dos pavimentos.**

| Pavimento Flexível             |              | Pavimento Rígido          |              |
|--------------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| Serviços e Materiais           | Custo (R\$)  | Serviços                  | Custo (R\$)  |
| Regularização do subleito      | 9.231,78     | Regularização do subleito | 9.231,78     |
| Sub-base em macadame seco      | 146.275,62   | Sub-base de CCR           | 171.813,99   |
| Base em brita graduada         | 180.870,01   | Placa de CCP              | 1.024.191,63 |
| Imprimação                     | 2.790,30     |                           |              |
| Pintura de ligação             | 3.602,82     |                           |              |
| Revest. CAUQ polímero          | 413.600,93   |                           |              |
| Asfalto diluído CM-30          | 77.377,05    |                           |              |
| Emulsão asfáltica RR-1C        | 16.661,92    |                           |              |
| CAP modificado c/ polímero     | 851.837,13   |                           |              |
| Transp. De líquidos asfálticos | 40.028,18    |                           |              |
| TOTAL (R\$)                    | 1.742.275,73 | TOTAL (R\$)               | 1.205.237,40 |

Fonte: Cavalet *et al.* (2019).

**Tabela 7 - Custos de manutenção dos pavimentos ano a ano.**

| ANO     | Flexível (R\$/ANO) | Rígido (R\$/ANO) |
|---------|--------------------|------------------|
| 1       |                    |                  |
| 2       | 1.877,44           | 1.362,45         |
| 3       | 3.754,87           | 2.043,68         |
| 4       | 5.632,31           | 2.724,90         |
| 5       | 125.494,88         | 3.406,13         |
| 6 a 9   | 37.548,70          | 16.349,40        |
| 10      | 334.693,37         | 25.160,53        |
| 11 a 14 | 37.548,70          | 16.349,40        |
| 15      | 126.898,16         | 81.812,59        |
| 16 a 19 | 37.548,70          | 16.349,40        |
| 20      | 334.693,37         | 81.812,59        |
| Total   | 1.045.690,50       | 247.371,07       |

Fonte: Cavalet *et al.* (2019)

Os resultados obtidos por Cavalet *et al.* (2019) mostram que, partindo de um método de dimensionamento mais rigoroso e complexo para o pavimento flexível, o pavimento rígido se mostra mais viável desde a fase de implantação, já que para atender ao tráfego, foi necessário um revestimento flexível com um Cimento Asfáltico de Petróleo modificado por polímero, o que elevou o custo do pavimento flexível em cerca de quase 70% em relação ao valor do pavimento rígido.

Na fase de manutenção, Cavalet *et al.* (2019), conclui que, na fase de manutenção, o pavimento rígido apresenta uma vantagem de quase R\$ 800.000,00 em relação ao pavimento flexível.

## **4. ESTUDO PRÁTICO: CONCEPÇÃO DOS PAVIMENTOS**

Neste capítulo, foram concebidos dois pavimentos para fins didáticos, sendo um flexível, dimensionado através do programa MeDiNa, e outro rígido, dimensionado através do método vigente, o PCA – 84. Obtendo os resultados, os dois pavimentos terão seus custos avaliados através de valores de cotação atuais, tendo como objetivo apresentar valores atualizados para dois dimensionamentos práticos de pavimentos rígido e flexível.

### **4.1. ESTUDO DE TRÁFEGO**

Inicialmente, os dados de tráfego para cálculo do número N, foram obtidos através do PNCT (Programa Nacional de Contagem de Tráfego), do DNIT, tomando como base, os dados da rodovia BR-153, no Km 405,2 localizado no município de Pirenópolis, Goiás.

De acordo com o PNCT de 2024, os veículos considerados na contagem, com seus respectivos VMDMs (Volumes Médios Diários Mensais) e porcentagens em relação ao VMD total no ano, são os seguintes:

- Veículo A – Caminhão/Ônibus de 2 eixos (veículo tipo 2CC), com VMDM de 474, sendo 30,38% do total.
- Veículo B – Caminhão/Ônibus de 3 eixos (veículo tipo 3C), com VMDM de 341, sendo 21,86% do total.
- Veículo C – Caminhão de 4 eixos (veículo tipo 4C) com VMDM de 171, sendo 10,99% do total.
- Veículo D – Caminhão de 5 eixos (veículo tipo 2I1) com VMDM de 117, sendo 7,52% do total.
- Veículo E – Caminhão de 6 eixos (veículo tipo 3S3) com VMDM de 236, sendo 15,15% do total.
- Veículo F – Caminhão de 7 eixos (veículo tipo 3D4) com VMDM de 84, sendo 5,41% do total.
- Veículo G – Caminhão de 8 eixos (veículo tipo 3J5) com VMDM de 4, sendo 0,24% do total.
- Veículo H – Caminhão de 9 eixos (veículo tipo 3T6) com VMDM de 132, sendo 8,44% do total.

A tabela contendo a descrição dos tipos de veículos acima consta no documento “Quadro de fabricantes de veículos”, que pode ser acessado no site do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

De acordo com o PNCT de 2024, o VMDA (Volume médio diário anual) para o trecho escolhido, é de aproximadamente 5386. Para prever uma taxa anual de crescimento do tráfego, foram analisados os dados dos anos de 2022 e 2023, que apresentaram, respectivamente, os valores de 4708 e 4960. Logo, de 2022 para 2023, houve um crescimento de 5,08% ao ano, e, de 2023 para 2024, um crescimento de 7,91% ao ano, logo, para uma previsão futura, é possível adotar uma taxa média de crescimento anual de aproximadamente 6,5%, levando em consideração o crescimento histórico dos últimos 2 anos.

Com os dados coletados descritos acima, o software Medina, obteve um número N de tráfego para período de projeto de 10 anos (referente ao pavimento flexível),  $N=8,78 \times 10^7$ , enquanto que, para período de projeto de 20 anos (referente ao pavimento rígido),  $N = 2,53 \times 10^8$

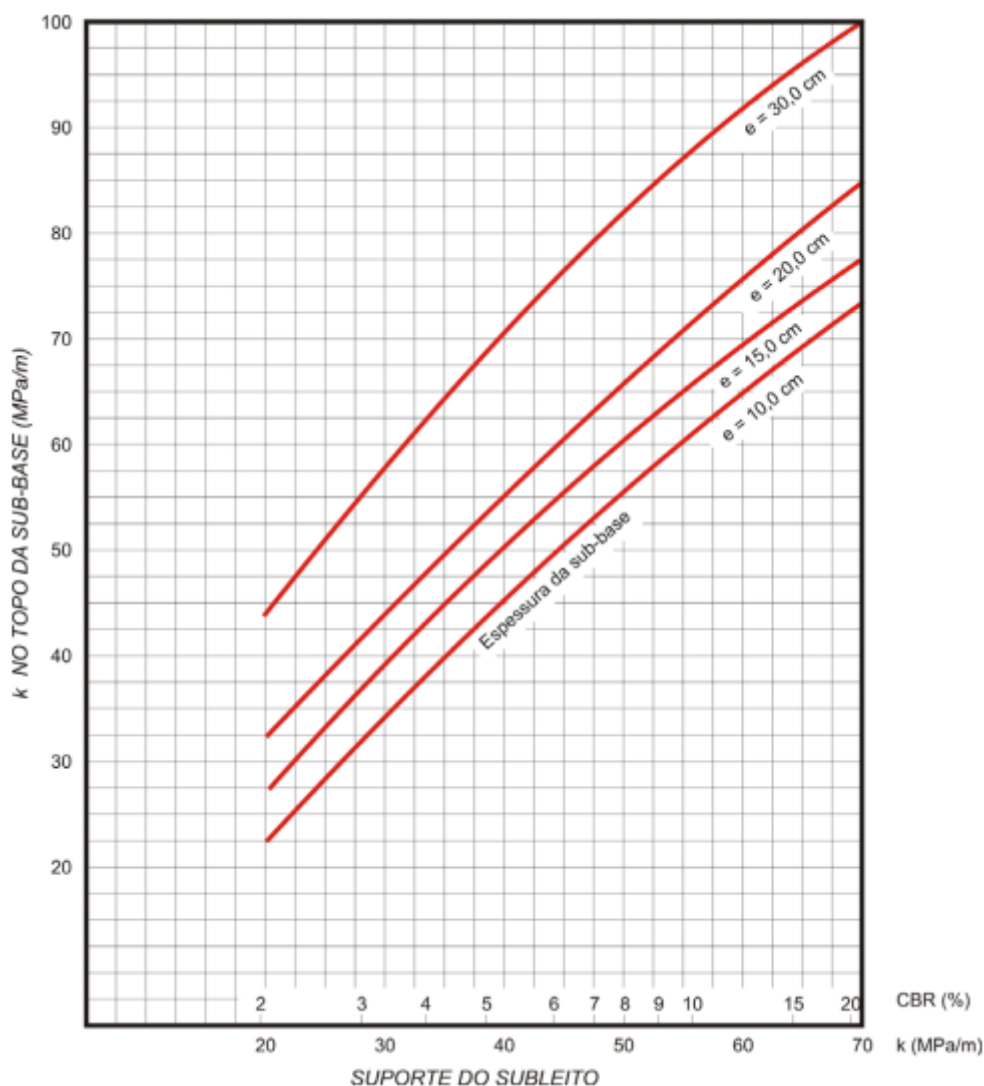
## 4.2.DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO RÍGIDO

Inicialmente, foi considerado um pavimento rígido contendo acostamento em concreto de cimento Portland, a adoção de barras de transferência nas juntas, e um concreto com uma resistência à tração na flexão aos 28 dias de 4,8 MPa. O Fator de segurança para as cargas considerado é de 1,2, que configura um pavimento para altos volumes de caminhões, de acordo com a Tabela 3.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), os Latossolos são predominantes nas regiões equatoriais e tropicais do país, cobrindo cerca de 39% da área do Brasil, e distribuídos por cerca de quase todo o território.

A sub-base escolhida para o projeto é de caráter granular, com compactação. A partir do ábaco na Figura 11, em conformidade com o Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005), é possível encontrar o valor do coeficiente de recalque “k”, para a espessura inicial da camada de sub-base de 20 cm.

Para encontrar o coeficiente em questão, insere-se o valor do CBR no eixo das abscissas, ligando, em linha reta, até a curva referente a espessura de 20 cm. Após encontrado o ponto referente na curva, rebate-se outra linha reta, perpendicular à primeira, em direção ao eixo das ordenadas, onde estão descritos os valores do coeficiente de recalque. A Figura 11, citada acima, contém o ábaco para obtenção de “K”.



**Figura 11 - Relação entre o CBR do subleito e o coeficiente de recalque.**

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

Adotando um CBR característico médio para os latossolos de 8%, obtém-se um coeficiente  $K$  de aproximadamente 65 MPa/m, para uma espessura de 23,5 cm.

Após a obtenção do coeficiente  $K$  e a espessura da placa, é possível obter a tensão equivalente para eixos simples e tandem duplos, através do Quadro 14 do manual de pavimentos rígidos do DNIT, que retornou um valor de 1,118 MPa para eixos simples, e 0,963 MPa para eixos tandem duplos. Para os eixos tandem triplos, a tensão equivalente é obtida pelo quadro 15 do manual de pavimentos rígidos do DNIT, que retornou um valor de 0,726 MPa de tensão equivalente. Os valores dos fatores de erosão são obtidos de forma similar, nos quadros 22 e 23 do manual de pavimentos rígidos do DNIT, onde os valores foram de 2,178 e 2,285 para eixos simples e eixos tandem duplos, respectivamente, enquanto que para eixos tandem triplos, o valor encontrado foi de 2,37.

Todas as tabelas citadas no parágrafo acima estão disponíveis no Anexo 1.

Com estes valores em mãos, é possível obter os fatores de fadiga, através da divisão da tensão equivalente pela resistência característica do concreto, chegando aos seguintes valores:

- Fator de fadiga para eixos simples: 0,233;
- Fator de fadiga para eixos tandem duplos: 0,201;
- Fator de fadiga para eixos tandem triplos: 0,151;

Com isto, é possível, através dos ábacos das Figuras 27 e 29 do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT, encontrar as repetições admissíveis para cada eixo por cada quantidade de carga. Dividindo as repetições previstas pelas repetições admissíveis, chega-se ao valor, em porcentagem, do consumo por fadiga, e do consumo por erosão, de acordo com os Quadros 9, 10 e 11 abaixo:

**Quadro 9 - Dimensionamento PCA-84 Eixos Simples.**

| EIXOS<br>SIMPLES | Cargas por<br>eixo X FSC | Nº de repetições<br>previstas | ANÁLISE DE<br>FADIGA               |                              | ANÁLISE DE<br>EROSÃO               |                              |
|------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
|                  |                          |                               | Nº de<br>repetições<br>admissíveis | Cons.<br>De<br>Fadiga<br>(%) | Nº de<br>repetições<br>admissíveis | Cons.<br>De<br>Fadiga<br>(%) |
| <5               | 6                        | 1890700                       | ilimitado                          | 0,00                         | ilimitado                          | 0,00                         |
| 5 a 6            | 7,20                     | 1890700                       | ilimitado                          | 0,00                         | ilimitado                          | 0,00                         |
| 6 a 7            | 8,4                      | 1321300                       | ilimitado                          | 0,00                         | ilimitado                          | 0,00                         |
| 7 a 8            | 9,6                      | 1241000                       | ilimitado                          | 0,00                         | ilimitado                          | 0,00                         |
| 8 a 9            | 10,8                     | 1138800                       | ilimitado                          | 0,00                         | ilimitado                          | 0,00                         |
| 9 a 10           | 12                       | 1598700                       | ilimitado                          | 0,00                         | ilimitado                          | 0,00                         |
| 10 a 11          | 13,2                     | 1314000                       | ilimitado                          | 0,00                         | 50000000                           | 2,63                         |
| 11 a 12          | 14,4                     | 1168000                       | ilimitado                          | 0,00                         | 9000000                            | 12,98                        |
| 12 a 13          | 15,6                     | 730000                        | ilimitado                          | 0,00                         | 2900000                            | 25,17                        |
| 13 a 14          | 16,8                     | 219000                        | 10000000                           | 2,19                         | 1800000                            | 12,17                        |
| 14 a 15          | 18                       | 146000                        | 9000000                            | 1,62                         | 850000                             | 17,18                        |
| 15 a 16          | 19,2                     | 73000                         | 250000                             | 29,20                        | 600000                             | 12,17                        |
| -                | -                        | -                             | TOTAL ->                           | 33,01                        | TOTAL->                            | 82,29                        |

Fonte: Autor.

**Quadro 10 - Dimensionamento PCA-84 Eixos Tandem Duplos.**

| EIXOS TANDEM DUPLOS | Cargas por eixo X FSC | Nº de repetições previstas | ANÁLISE DE FADIGA            |                     | ANÁLISE DE EROSÃO            |                     |
|---------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Cargas por eixo     |                       |                            | Nº de repetições admissíveis | Cons. De Fadiga (%) | Nº de repetições admissíveis | Cons. De Fadiga (%) |
| <13                 | 15,6                  | 876000                     | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 13 a 14             | 16,8                  | 766500                     | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 14 a 15             | 18                    | 1022000                    | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 15 a 16             | 19,2                  | 795700                     | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 16 a 17             | 20,4                  | 1065800                    | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 17 a 18             | 21,6                  | 1357800                    | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 18 a 19             | 22,8                  | 1226400                    | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 19 a 20             | 24                    | 584000                     | ilimitado                    | 0,00                | 50000000                     | 1,17                |
| 20 a 21             | 25,2                  | 365000                     | ilimitado                    | 0,00                | 20000000                     | 1,83                |
| 21 a 22             | 26,4                  | 219000                     | ilimitado                    | 0,00                | 8500000                      | 2,58                |
| 22 a 23             | 27,6                  | 146000                     | ilimitado                    | 0,00                | 6000000                      | 2,43                |
| 23 a 24             | 28,8                  | 94900                      | ilimitado                    | 0,00                | 2100000                      | 4,52                |
| -                   | -                     | -                          | TOTAL ->                     | 0,00                | TOTAL->                      | 12,52               |

Fonte: Autor.

**Quadro 11 - Dimensionamento PCA-84 Eixos Tandem Triplos.**

| EIXOS TANDEM TRIPLOS       | Cargas por eixo X FSC | Nº de repetições previstas | ANÁLISE DE FADIGA            |                     | ANÁLISE DE EROSÃO            |                     |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Cargas por eixo            |                       |                            | Nº de repetições admissíveis | Cons. De Fadiga (%) | Nº de repetições admissíveis | Cons. De Fadiga (%) |
| <24                        | 9,6                   | 511000                     | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 24 a 26                    | 10,4                  | 876000                     | ilimitado                    | 0,00                | ilimitado                    | 0,00                |
| 26 a 28                    | 11,2                  | 803000                     | ilimitado                    | 0,00                | 40000000                     | 2,01                |
| 28 a 30                    | 12                    | 255500                     | ilimitado                    | 0,00                | 10000000                     | 2,56                |
| -                          | -                     | -                          | TOTAL ->                     | 0,00                | TOTAL ->                     | 4,56                |
| Consumos Totais Somados -> |                       |                            | Cons. Total de fadiga        | 33,01               | Cons. Total de erosão        | 99,37               |

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos, o pavimento resiste aos 20 anos estimados de projeto, pois nenhum dos consumos calculados excedeu a quantidade de 100%. O pavimento também está em uma faixa econômica de projeto, já que o consumo estimado em

dimensionamento se aproxima ao máximo no tempo de projeto estimado, sendo dimensionado com exata precisão.

Por fim, o pavimento será concebido com 11 metros de largura, sendo duas faixas de 3,5 metros, mais 2 acostamentos de 2 metros cada. As barras de transferência, em aço CA-25, estarão dispostas a cada 30 centímetros, com diâmetro de 32 milímetros, e comprimento de 460 centímetros, resultando em 37 barras por junta.

#### 4.3.DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

O Pavimento flexível, exposto às mesmas condições de tráfego e localidade (materiais de subleito), foi dimensionado no programa MeDiNa, do DNIT. Programa este que dimensiona o pavimento flexível partindo de uma análise mecanicista, utilizando parâmetros diferentes do método usual, por exemplo, Módulo de Resiliência.

Os materiais utilizados nesta pesquisa são materiais catalogados no programa MeDiNa, e, portanto, possuem valores já definidos para os parâmetros de dimensionamento, isso se deve a indisponibilidade para ensaios dos materiais anteriormente ao dimensionamento. Vale ressaltar que todo material que for introduzido no programa para efeito de dimensionamento deve ser ensaiado antes da inserção dos dados no programa, exceto o material de revestimento, onde o projetista pode exigir para a camada as propriedades necessárias para suportar o carregamento, já que o material usado geralmente é produzido em usina.

O tipo de via escolhido é o de “sistema arterial primário”, cujos critérios de dimensionamento são: 30% de área trincada e 13 milímetros de deformação permanente, apresentando confiabilidade de 85%.

Inicialmente, adotou-se para subleito, características de um latossolo argilo-arenoso, que, como citado anteriormente é o solo com maior ocorrência na região em questão.

A sub-base escolhida foi solo fino, de caráter argiloso, com 15 cm de espessura, tendo as seguintes características: Módulo de resiliência de 250 MPa, coeficiente de Poisson de 0,45, massa específica de 1,665 g/cm<sup>3</sup>, umidade ótima de 24%, e energia de compactação normal.

Para a camada de base, o material adotado foi a brita graduada, também com 15 cm de espessura, sendo as seguintes características do material: Módulo de resiliência de 381 MPa, coeficiente de Poisson de 0,35, massa específica de 2,223 g/cm<sup>3</sup>, umidade ótima em 5%, energia de compactação modificada e ensaio de abrasão Los Angeles de 43%.

Como revestimento, devido à alta solicitação do tráfego, foram adotadas duas camadas de concreto asfáltico, a primeira, com 15 cm, e a segunda com 12 cm, ou, simplificada, uma única camada com 27 cm.

Dentre as características do material, estão:

- CAP 30/45;
- Teor de asfalto de 6,0%;
- Volume de vazios de 5,0%;
- Massa específica de 2,40 g/cm<sup>3</sup>;
- Faixa granulométrica #12,5mm;
- Resistência à tração CD de 2,08 MPa;
- Módulo de resiliência de 9000 MPa;
- Coeficiente de Poisson de 0,30;

Após a escolha dos materiais e a avaliação do software, a estrutura do pavimento ficou exposta de acordo com o Quadro 12:

**Quadro 12 - Estruturação do Pavimento Dimensionado.**

|                                                    |
|----------------------------------------------------|
| Camada de Revestimento: 27 cm, concreto asfáltico. |
| Camada de Base: 15 cm, brita graduada.             |
| Camada de Sub-base: 15 cm, solo argiloso fino.     |
| Subleito em solo argilo-arenoso.                   |

Fonte: Autor.

A Figura 12, mostra os resultados do dimensionamento de acordo com os critérios anteriormente citados:

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---  
 Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.  
 Nível de confiabilidade da análise: 85%  
 Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 29,3%  
 Afundamento de Trilha de Roda: 1,2mm

**Figura 12 - Resultados do dimensionamento do MeDiNa.**

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o pavimento atende aos critérios exigidos, visto que a área trincada estimada no fim do período foi menor do que os 30%, ficando

em 29,3%, e o afundamento de trilha de roda, ou deformação permanente, não atingiu o limite de 13 milímetros, ficando em apenas 1,2 milímetros.

Após a realização deste dimensionamento, foi realizado outro, utilizando um material diferente para a camada de revestimento, devido à espessura elevada do revestimento no primeiro dimensionamento.

As características do novo material testado são as seguintes:

- CAP 35/45;
- Teor de asfalto de 5,7%;
- Volume de vazios de 4,0%
- Massa específica de 2,454 g/cm<sup>3</sup>;
- Faixa granulométrica #19mm;
- Resistência à tração CD 2,10 MPa;
- Módulo de resiliência de 13587 MPa;
- Coeficiente de Poisson de 0,30;

Com estes parâmetros, e as camadas de base e sub-base iguais às citadas acima, foi dimensionada uma apenas uma camada de revestimento de 13,9 cm, tendo o pavimento uma nova estrutura, descrita no Quadro 13:

**Quadro 13 - Estrutura do novo Pavimento Dimensionado.**

|                                                    |
|----------------------------------------------------|
| Camada de Revestimento: 14 cm, concreto asfáltico. |
| Camada de Base: 15 cm, brita graduada.             |
| Camada de Sub-base: 15 cm, solo argiloso fino.     |
| Subleito em solo argilo-arenoso.                   |

Fonte: Autor.

A Figura 13, explicita o resultado do dimensionamento de acordo com os critérios do software:

**Figura 13 - Resultados do novo dimensionamento do MeDiNa.**

```

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,7%
Afundamento de Trilha de Roda: 2,5mm
  
```

Fonte: Autor.

A partir destes resultados, verifica-se que este dimensionamento também atende aos critérios do programa, tendo uma área trincada no fim do período de projeto de 28,7%, menor

do que o máximo, que é 30%, e uma deformação permanente de 2,5 mm, que também atende ao critério do programa, que possui um limite de 13 mm para este critério.

Com isso, pode-se concluir que, o software é um método avançado e de qualidade para o dimensionamento dos pavimentos, porém, o conhecimento do projetista irá definir um dimensionamento adequado e econômico, visto que, adotando um material mais adequado, é possível que este atenda às mesmas exigências que o outro, porém com uma espessura mais branda, o que significa maior economia e facilidade no projeto.

#### 4.4.COMPARATIVO ORÇAMENTÁRIO

Inicialmente, foi calculado o preço de 1 metro linear de pista para cada tipo de pavimento, tendo os dois 11 metros de largura.

Como referência de preços no mercado, foram utilizadas as tabelas da Caixa Econômica Federal, o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), que se trata de uma pesquisa realizada para obtenção de custos médios de serviços e insumos da construção civil por unidade federativa, e a tabela de composição de custos do DNIT, denominada Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), que, semelhante à SINAPI, também é uma tabela feita com base em pesquisas realizadas para obtenção de composições de custos de obras (insumos e mão-de-obra).

Todos os valores obtidos pela tabela SINAPI, são referentes ao período do mês de novembro de 2025, e os obtidos pela tabela SICRO, ao mês de outubro de 2025. A localidade de referência para ambas tabelas é Goiás.

Partindo do pavimento rígido, os preços orçados estão dispostos na Tabela 13:

**Tabela 8 - Custo do pavimento rígido.**

| Referência | Código | Item/Serviço                                                                              | Unidade        | Qtde. | Preço/metro (R\$) |
|------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------------------|
| SINAPI     | 97119  | Barras de transferência, aço ca-25 de 32,0 mm, para execução de pavimento.                | kg             | 6,31  | 82,03             |
| SINAPI     | 97107  | Execução de pavimento de concreto simples (pcs), fck = 40 mpa, e = 23,5 cm.               | m <sup>2</sup> | 11,00 | 2350,70           |
| SINAPI     | 101767 | Construção de base e sub-base para pavimentação de solo estabilizado granulometricamente. | m <sup>3</sup> | 2,20  | 63,10             |
| SINAPI     | 97114  | Execução de juntas de contração para pavimentos de concreto.                              | m              | 12    | 4,92              |
| Total      |        |                                                                                           |                |       | 2500,75           |

Fonte: Autor.

Já para o pavimento flexível, os preços estão dispostos na Tabela 14:

**Tabela 9 - Custo do Pavimento Flexível.**

| Referência | Código  | Item/Serviço                                                                                                                                                             | Unidade        | Qtde. | Preço/metro (R\$) |
|------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------------------|
| SICRO      | 4011353 | Pintura de ligação                                                                                                                                                       | m <sup>2</sup> | 11,00 | 5,17              |
| SICRO      | 4011351 | Imprimação com asfalto diluído                                                                                                                                           | m <sup>2</sup> | 11,00 | 6,93              |
| SINAPI     | 101767  | Construção de base e sub-base para pavimentação de solo estabilizado granulometricamente com mistura de solos em pista.                                                  | m <sup>3</sup> | 1,65  | 47,32             |
| SINAPI     | 100572  | Construção de base e sub-base para pavimentação de solo (predominantemente argiloso) brita – 40%-60%, mistura em pista, com espessura de 15 cm.                          | m <sup>3</sup> | 1,65  | 224,86            |
| SICRO      | 6416143 | Usinagem de concreto asfáltico – faixa B-19 – areia e brita comerciais                                                                                                   | t              | 3,70  | 701,71            |
| SICRO      | 5914643 | Carga, manobra e descarga de mistura betuminosa a quente em caminhão basculante de 6 m <sup>3</sup> - carga em usina de asfalto 100/140 t/h e descarga em vibroacabadora | t              | 3,70  | 22,13             |
| Total      |         |                                                                                                                                                                          |                |       | 1008,12           |

Fonte: Autor.

Após o cálculo das quantidades e dos preços por serviço, os valores obtidos apontam para uma diferença inicial de custo de aproximadamente 150% entre o pavimento flexível e o pavimento rígido, constatando-se a vantagem inicial do pavimento flexível, na fase de implantação, que demonstrou um investimento inicial 59,6% menor que a alternativa rígida.

Porém, tendo em vista o que foi discutido anteriormente no capítulo 3, no subtópico 3.1.3, de manutenção, conclui-se que o pavimento rígido apresenta uma vantagem sobre o pavimento flexível, devido à menor necessidade de serviços de manutenção, reduzindo assim o custo total do modo de pavimentação rígida ao longo de sua vida útil.

Devido ao alto tráfego da rodovia em questão, em se tratando de manutenção, é possível que o pavimento rígido obtenha uma posição mais vantajosa a longo prazo, apresentando menor deformação permanente, e maior resistência ao tráfego ao longo de seu período de projeto, visto

que o seu custo inicial, pode ser diluído ao longo de sua vida útil projetada, de 20 anos (o dobro do pavimento flexível), com possíveis menores custos de manutenção.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Após a análise feita, é possível concluir que os pavimentos rígidos, por sua mecânica de distribuição de esforços, são indicados para solos de menor capacidade de suporte, já que quase todos os esforços provindos do tráfego são absorvidos pelas placas, enquanto que nos pavimentos flexíveis, o subleito é uma camada de extrema importância para absorção e distribuição das solicitações, sendo mais indicadas para áreas com solos com maior capacidade de suporte.

Quanto às análises qualitativas de cada pavimento, é possível extrair as melhores qualidades de cada um, podendo ser adotadas soluções interessantes para os dois métodos, a depender da situação de disponibilidade de materiais, mão-de-obra, condições climáticas e condições de suporte do solo em questão.

Analisando os resultados obtidos para a análise econômica de cada pavimento, foi constatado que a durabilidade superior do pavimento rígido está condicionada ao rigoroso controle tecnológico na execução, exigindo assim, menor necessidade de reparos e manutenções em comparação ao pavimento flexível. Apesar de seu custo inicial elevado, o pavimento rígido apresentou um custo total final menor do que o custo do pavimento flexível, sendo este dimensionado pelo método DNIT, ou pelo MeDiNa.

Considerando os resultados obtidos, os objetivos foram atingidos, demonstrando os principais critérios para escolha de qual pavimento utilizar, obtendo resultados acerca dos custos gerais dos dois métodos, e, por meio do estudo das características intrínsecas de cada pavimento, constatou-se que a alternativa que apresenta maior vida útil é a de pavimento rígido.

Após a realização do estudo de caso, foram adquiridos resultados atuais de cada método, apresentando os custos iniciais de implantação para um pavimento rígido e para um pavimento flexível. Inicialmente, ficou constatado que a alternativa flexível, apresenta necessidade de um menor investimento inicial, enquanto que o pavimento rígido, apesar do elevado custo de implantação, tem a vantagem de possuir uma carga de serviços de manutenção inferior em comparação com a outra opção, tendo assim, a possibilidade de um menor custo total ao longo de todo seu período de projeto.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se um estudo de análise de custo do ciclo de vida (LCCA), trazendo assim, resultados palpáveis acerca dos custos de manutenção

ao longo do ciclo de vida de projeto de cada alternativa de pavimentação, podendo assim, obter uma conclusão precisa acerca dos custos totais (implantação e manutenção) inseridos na vida de projeto das opções de pavimentação em análise.

## 6.REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Marcelo Almeida; et. al. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento. Ano 01, Edição 11, Vol. 10, pp. 187-196, novembro de 2016. ISSN: 2448-0959

BARBOSA Diego Souza; DA SILVA, Daniel Cardoso; AGUIAR, Marcelo Figueiredo Massulo. **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA E O MÉTODO DNIT**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte – ANPET, 2021, Online. Anais... online. Editora ANPET, 2021.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2. Ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras – ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

CAIXA. **SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**: Relatório de Preços de Insumos. Localidade: Goiânia - GO. Mês de referência: 11/2025. Goiânia: CAIXA, 22 dez. 2025. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 05/01/2026.

CAVALET, V. N. et al. **ANÁLISE COMPARATIVA DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM CONCRETO ASFÁLTICO E PAVIMENTOS RÍGIDOS EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADO EM RODOVIA DE ALTO TRÁFEGO**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte – ANPET, 2019, Balneário Camboriú, SC. Anais... Balneário Camboriú. Editora ANPET, 2019.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do Transporte 2018**. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/>>. Acesso em 16/06/2025.

COSTA, J. S. **Análise comparativa de alternativas para pavimentação de rodovias: Pavimento Flexível x Pavimento Rígido**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM –DER. **Projeto de Pavimentação**. Instruções de Projeto. São Paulo: DER, 2006.

DNIT – Coordenação Geral de Custos de Infraestrutura. **SICRO - Sistema de Custos Referenciais de Obras**: Relatório Sintético de Composições de Custos. Localidade: Goiás – GO. Mês de referência: 10/2025. Goiás: DNIT, out. 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-referenciais/sistemas-de-custos/sicro/relatorios/relatorios-sicro/centro-oeste/goias/2025/outubro-2025/outubro-2025>. Acesso em 05/01/2026.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. 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**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes. **Evolução da Malha Rodoviária Pavimentada sob Jurisdição Federal**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv/evolucaomalhapav-patrimonio.pdf>>. Acesso em 16/06/2025.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos do Brasil**. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 18 dez. 2025.

GRECO, J. A. S. **Cargas Rodoviárias e Tráfego**. Notas de Aula – Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

GUIMARÃES NETO, G. L. **Estudo Comparativo entre a Pavimentação Flexível e Rígida**, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) - Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. **Manual de Utilização do programa MeDiNa**. COPPE/UFRJ. 2020.

MARQUES, G. L. O. **Pavimentação. Notas de Aula** – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013.

PETRONIO, Maicon. RODGHER, Sandra. FLORIAN, Fabiana. **COMPARAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE PAVIMENTAÇÕES RODOVIÁRIAS RÍGIDAS E FLEXÍVEIS**. RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar – ISSN 2675-6218, [S.I.], v. 5, n. 11, p. e5115877, 2024.

RAMOS, Bernardo; COREIA, Candido; FRAGA, Yuri; SOUZA, Fernando. **ANÁLISE TÉCNICA E DE CUSTOS ENTRE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E RÍGIDOS**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2024, Salvador. Anais... Salvador. Editora CONFEA, 2024.

RIBAS, L. C. **Custo-Benefício na Execução de Pavimentos Rígidos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2017.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimento**. São Paulo: Pini, 1997. Acesso em: 31 jul. 2025.

SILVA FILHO, A. L. **Estudo comparativo de viabilidade técnica e econômica entre pavimentos rígido e flexível aplicados a rodovia BR-408/PE**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade Vale do Ipojuca, Caruaru, 2011.

SOUTO, Ana Beatriz Souza. **Inovações na metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis de rodovias: O método MeDiNa**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2024.

**ANEXO 1 – TABELAS E QUADROS PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO ATRAVÉS DO MÉTODO PCA – 84.**

**QUADRO 14**  
**Tensão Equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (Mpa)**  
**PCAC (pavimento com acostamento de concreto)**

| Espessura da Placa (cm) | k - Coeficiente de recalque (MPa/m) |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                                  |      | 40   |      | 60   |       | 80   |      | 100  |      | 150  |      |
|                         | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD   | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                      | 3,36                                | 2,82 | 2,95 | 2,46 | 2,74 | 2,31  | 2,60 | 2,22 | 2,49 | 2,16 | 2,31 | 2,08 |
| 13                      | 3,02                                | 2,56 | 2,66 | 2,22 | 2,47 | 2,08  | 2,34 | 1,99 | 2,25 | 1,94 | 2,09 | 1,86 |
| 14                      | 2,74                                | 2,34 | 2,41 | 2,02 | 2,24 | 1,89  | 2,13 | 1,80 | 2,05 | 1,75 | 1,91 | 1,67 |
| 15                      | 2,50                                | 2,15 | 2,20 | 1,85 | 2,05 | 1,72  | 1,95 | 1,64 | 1,88 | 1,59 | 1,75 | 1,51 |
| 16                      | 2,29                                | 1,99 | 2,02 | 1,71 | 1,88 | 1,58  | 1,80 | 1,51 | 1,73 | 1,46 | 1,61 | 1,38 |
| 17                      | 2,11                                | 1,85 | 1,86 | 1,58 | 1,74 | 1,46  | 1,66 | 1,39 | 1,60 | 1,34 | 1,49 | 1,26 |
| 18                      | 1,96                                | 1,72 | 1,73 | 1,47 | 1,61 | 1,35  | 1,54 | 1,29 | 1,48 | 1,24 | 1,39 | 1,16 |
| 19                      | 1,82                                | 1,62 | 1,61 | 1,38 | 1,50 | 1,27  | 1,43 | 1,20 | 1,38 | 1,16 | 1,29 | 1,08 |
| 20                      | 1,70                                | 1,52 | 1,50 | 1,29 | 1,40 | 1,19  | 1,34 | 1,13 | 1,29 | 1,08 | 1,21 | 1,01 |
| 21                      | 1,59                                | 1,44 | 1,40 | 1,22 | 1,31 | 1,12  | 1,26 | 1,06 | 1,21 | 1,02 | 1,13 | 0,95 |
| 22                      | 1,49                                | 1,36 | 1,32 | 1,15 | 1,23 | 1,06  | 1,18 | 1,00 | 1,14 | 0,96 | 1,07 | 0,89 |
| 23                      | 1,40                                | 1,29 | 1,24 | 1,09 | 1,16 | 1,00  | 1,11 | 0,95 | 1,07 | 0,91 | 1,01 | 0,84 |
| 24                      | 1,32                                | 1,23 | 1,17 | 1,04 | 1,10 | 0,95  | 1,05 | 0,90 | 1,01 | 0,86 | 0,95 | 0,80 |
| 25                      | 1,25                                | 1,18 | 1,11 | 0,99 | 1,04 | 0,91  | 0,99 | 0,85 | 0,96 | 0,82 | 0,90 | 0,76 |
| 26                      | 1,19                                | 1,12 | 1,05 | 0,95 | 0,98 | 0,87  | 0,94 | 0,81 | 0,91 | 0,78 | 0,86 | 0,72 |
| 27                      | 1,13                                | 1,08 | 1,00 | 0,91 | 0,93 | 0,83  | 0,89 | 0,78 | 0,86 | 0,84 | 0,81 | 0,69 |
| 28                      | 1,07                                | 1,03 | 0,95 | 0,87 | 0,89 | 0,79  | 0,85 | 0,74 | 0,82 | 0,71 | 0,78 | 0,66 |
| 29                      | 1,02                                | 0,99 | 0,91 | 0,84 | 0,85 | 0,76  | 0,81 | 0,71 | 0,78 | 0,68 | 0,74 | 0,63 |
| 30                      | 0,98                                | 0,95 | 0,87 | 0,81 | 0,81 | 0,73  | 0,77 | 0,69 | 0,75 | 0,66 | 0,71 | 0,61 |
| 31                      | 0,93                                | 0,92 | 0,83 | 0,78 | 0,77 | 0,71  | 0,74 | 0,66 | 0,72 | 0,63 | 0,68 | 0,58 |
| 32                      | 0,90                                | 0,89 | 0,79 | 0,75 | 0,74 | 68,00 | 0,71 | 0,64 | 0,69 | 0,61 | 0,65 | 0,56 |
| 33                      | 0,86                                | 0,86 | 0,76 | 0,92 | 0,71 | 0,66  | 0,68 | 0,61 | 0,66 | 0,59 | 0,62 | 0,54 |
| 34                      | 0,83                                | 0,83 | 0,73 | 0,70 | 0,69 | 0,63  | 0,66 | 0,59 | 0,63 | 0,57 | 0,60 | 0,52 |

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

**QUADRO 15**  
**Tensão Equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa)**  
**PCAC (pavimento com acostamento de concreto)**

| Espessura da Placa (cm) | k - Coeficiente de recalque (Mpa/m) |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |      |
|                         | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                      | 2,60                                | 2,00 | 1,93 | 1,89 | 1,85 | 1,85 | 1,85 |
| 13                      | 1,97                                | 1,78 | 1,70 | 1,66 | 1,61 | 1,61 | 1,61 |
| 14                      | 1,78                                | 1,59 | 1,52 | 1,48 | 1,43 | 1,42 | 1,42 |
| 15                      | 1,62                                | 1,44 | 1,37 | 1,30 | 1,27 | 1,26 | 1,26 |
| 16                      | 1,49                                | 1,32 | 1,24 | 1,20 | 1,15 | 1,13 | 1,13 |
| 17                      | 1,38                                | 1,21 | 1,14 | 1,10 | 1,15 | 1,03 | 1,03 |
| 18                      | 1,28                                | 1,12 | 1,05 | 1,01 | 1,04 | 0,94 | 0,94 |
| 19                      | 1,19                                | 1,04 | 0,98 | 0,94 | 0,96 | 0,86 | 0,86 |
| 20                      | 1,12                                | 0,98 | 0,91 | 0,87 | 0,88 | 0,80 | 0,80 |
| 21                      | 1,05                                | 0,92 | 0,85 | 0,81 | 0,82 | 0,74 | 0,74 |
| 22                      | 0,99                                | 0,86 | 0,80 | 0,76 | 0,76 | 0,69 | 0,69 |
| 23                      | 0,93                                | 0,81 | 0,76 | 0,72 | 0,71 | 0,65 | 0,65 |
| 24                      | 0,88                                | 0,77 | 0,71 | 0,68 | 0,67 | 0,61 | 0,61 |
| 25                      | 0,84                                | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,63 | 0,57 | 0,57 |
| 26                      | 0,79                                | 0,70 | 0,64 | 0,61 | 0,59 | 0,54 | 0,54 |
| 27                      | 0,75                                | 0,66 | 0,61 | 0,58 | 0,56 | 0,52 | 0,52 |
| 28                      | 0,72                                | 0,63 | 0,59 | 0,56 | 0,53 | 0,49 | 0,49 |
| 29                      | 0,68                                | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,51 | 0,47 | 0,47 |
| 30                      | 0,65                                | 0,58 | 0,54 | 0,51 | 0,49 | 0,45 | 0,45 |
| 31                      | 0,62                                | 0,55 | 0,51 | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,43 |
| 32                      | 0,59                                | 0,53 | 0,49 | 0,47 | 0,44 | 0,41 | 0,41 |
| 33                      | 0,57                                | 0,51 | 0,47 | 0,45 | 0,41 | 0,39 | 0,39 |
| 34                      | 0,54                                | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,39 | 0,38 | 0,38 |

ETT: Eixos Tandem Triplos

**QUADRO 22**  
**Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC**  
**(Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)**

| Espessura da Placa (cm) | k - Coeficiente de recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 180  |      |
|                         | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                      | 3,07                                | 3,09 | 3,02 | 2,99 | 3,00 | 2,93 | 2,97 | 2,90 | 2,96 | 2,88 | 2,94 | 2,84 | 2,92 | 2,83 |
| 13                      | 2,97                                | 3,02 | 2,92 | 2,92 | 2,90 | 2,86 | 2,87 | 2,83 | 2,86 | 2,80 | 2,84 | 2,76 | 2,82 | 2,74 |
| 14                      | 2,88                                | 2,96 | 2,83 | 2,85 | 2,81 | 2,79 | 2,78 | 2,76 | 2,77 | 2,73 | 2,75 | 2,68 | 2,73 | 2,66 |
| 15                      | 2,80                                | 2,89 | 2,75 | 2,79 | 2,73 | 2,72 | 2,70 | 2,69 | 2,69 | 2,66 | 2,67 | 2,61 | 2,65 | 2,59 |
| 16                      | 2,72                                | 2,84 | 2,67 | 2,73 | 2,65 | 2,66 | 2,62 | 2,63 | 2,61 | 2,60 | 2,59 | 2,55 | 2,57 | 2,52 |
| 17                      | 2,64                                | 2,78 | 2,60 | 2,68 | 2,58 | 2,60 | 2,55 | 2,57 | 2,54 | 2,54 | 2,52 | 2,48 | 2,49 | 2,45 |
| 18                      | 2,57                                | 2,73 | 2,53 | 2,62 | 2,51 | 2,55 | 2,48 | 2,51 | 2,47 | 2,48 | 2,45 | 2,42 | 2,42 | 2,39 |
| 19                      | 2,51                                | 2,69 | 2,47 | 2,57 | 2,44 | 2,50 | 2,41 | 2,46 | 2,40 | 2,43 | 2,38 | 2,73 | 2,36 | 2,33 |
| 20                      | 2,44                                | 2,64 | 2,41 | 2,53 | 2,38 | 2,45 | 2,35 | 2,41 | 2,34 | 2,38 | 2,32 | 2,31 | 2,29 | 2,28 |
| 21                      | 2,38                                | 2,60 | 2,35 | 2,48 | 2,32 | 2,40 | 2,29 | 2,36 | 2,28 | 2,33 | 2,26 | 2,26 | 2,23 | 2,22 |
| 22                      | 2,33                                | 2,56 | 2,30 | 2,44 | 2,27 | 2,36 | 2,24 | 2,32 | 2,23 | 2,29 | 2,21 | 2,21 | 2,18 | 2,17 |
| 23                      | 2,27                                | 2,52 | 2,24 | 2,40 | 2,21 | 2,31 | 2,18 | 2,27 | 2,17 | 2,24 | 2,15 | 2,17 | 2,12 | 2,12 |
| 24                      | 2,23                                | 2,48 | 2,10 | 2,36 | 2,16 | 2,28 | 2,13 | 2,24 | 2,12 | 2,20 | 2,10 | 2,13 | 2,07 | 2,08 |
| 25                      | 2,18                                | 2,43 | 2,14 | 2,33 | 2,11 | 2,24 | 2,09 | 2,20 | 2,08 | 2,17 | 2,05 | 2,09 | 2,02 | 2,03 |
| 26                      | 2,14                                | 2,39 | 2,09 | 2,29 | 2,06 | 2,21 | 2,04 | 2,17 | 2,03 | 2,13 | 2,01 | 2,06 | 1,97 | 1,99 |
| 27                      | 2,19                                | 2,35 | 2,05 | 2,26 | 2,02 | 2,17 | 2,00 | 2,13 | 1,99 | 2,10 | 1,96 | 2,03 | 1,93 | 1,95 |
| 28                      | 2,06                                | 2,32 | 2,01 | 2,23 | 1,98 | 2,14 | 1,95 | 2,10 | 1,94 | 2,07 | 1,92 | 1,99 | 1,98 | 1,94 |
| 29                      | 2,03                                | 2,28 | 1,97 | 2,19 | 1,94 | 2,11 | 1,91 | 2,07 | 1,90 | 2,04 | 1,88 | 1,93 | 1,85 | 1,87 |
| 30                      | 1,99                                | 2,25 | 1,93 | 2,16 | 1,90 | 2,08 | 1,87 | 2,04 | 1,86 | 2,01 | 1,83 | 1,93 | 1,81 | 1,83 |
| 31                      | 1,96                                | 2,21 | 1,89 | 2,13 | 1,86 | 2,05 | 1,83 | 2,01 | 1,82 | 1,98 | 1,80 | 1,90 | 1,77 | 1,80 |
| 32                      | 1,92                                | 2,18 | 1,86 | 2,11 | 1,83 | 2,03 | 1,80 | 1,99 | 1,79 | 1,95 | 1,76 | 1,87 | 1,74 | 1,76 |
| 33                      | 1,89                                | 2,15 | 1,82 | 2,08 | 1,79 | 2,00 | 1,76 | 1,96 | 1,75 | 1,92 | 1,72 | 1,85 | 1,70 | 1,73 |
| 34                      | 1,86                                | 2,12 | 1,79 | 2,05 | 1,76 | 1,97 | 1,73 | 1,93 | 1,72 | 1,90 | 1,69 | 1,82 | 1,67 | 1,70 |

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

**QUADRO 23**  
**Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PCAC**  
**(Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)**

| Espessura da Placa (cm) | k - Coeficiente de recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                         | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                      | 3,12                                | 2,99 | 2,93 | 2,90 | 2,85 | 2,82 |
| 13                      | 3,06                                | 2,92 | 2,85 | 2,81 | 2,76 | 2,73 |
| 14                      | 3,00                                | 2,86 | 2,78 | 2,74 | 2,67 | 2,64 |
| 15                      | 2,95                                | 2,80 | 2,73 | 2,67 | 2,59 | 2,56 |
| 16                      | 2,91                                | 2,76 | 2,67 | 2,62 | 2,52 | 2,49 |
| 17                      | 2,86                                | 2,71 | 2,62 | 2,57 | 2,47 | 2,43 |
| 18                      | 2,82                                | 2,67 | 2,58 | 2,52 | 2,41 | 2,37 |
| 19                      | 2,79                                | 2,63 | 2,54 | 2,48 | 2,37 | 2,32 |
| 20                      | 2,75                                | 2,59 | 2,50 | 2,44 | 2,32 | 2,28 |
| 21                      | 2,72                                | 2,56 | 2,47 | 2,40 | 2,28 | 2,23 |
| 22                      | 2,68                                | 2,53 | 2,43 | 2,37 | 2,25 | 2,20 |
| 23                      | 2,65                                | 2,49 | 2,40 | 2,34 | 2,21 | 2,16 |
| 24                      | 2,62                                | 2,46 | 2,37 | 2,31 | 2,18 | 2,13 |
| 25                      | 2,59                                | 2,44 | 2,34 | 2,28 | 2,15 | 2,10 |
| 26                      | 2,57                                | 2,41 | 2,32 | 2,25 | 2,12 | 2,07 |
| 27                      | 2,54                                | 2,38 | 2,29 | 2,22 | 2,10 | 2,04 |
| 28                      | 2,51                                | 2,36 | 2,26 | 2,20 | 2,07 | 2,01 |
| 29                      | 2,49                                | 2,33 | 2,24 | 2,17 | 2,04 | 1,99 |
| 30                      | 2,47                                | 2,31 | 2,22 | 2,15 | 2,02 | 1,96 |
| 31                      | 2,44                                | 2,29 | 2,19 | 2,13 | 2,00 | 1,94 |
| 32                      | 2,42                                | 2,26 | 2,17 | 2,10 | 1,97 | 1,92 |
| 33                      | 2,44                                | 2,24 | 2,15 | 2,08 | 1,95 | 1,89 |
| 34                      | 2,38                                | 2,22 | 2,13 | 2,06 | 1,93 | 1,87 |

ETT: Eixos Tandem Triplos