

CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR DE INHUMAS  
FACULDADE DE INHUMAS - FACMAIS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GEOVANA DE SOUSA BANDEIRA  
WILQUER DOMINGOS SIGUIM

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEUS RECICLADOS  
NO DESEMPENHO MECÂNICO DOS PAVIMENTOS

INHUMAS – GO  
2021

GEOVANA DE SOUSA BANDEIRA

WILQUER DOMINGOS SIGUIM

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEUS RECICLADOS  
NO DESEMPENHO MECÂNICO DOS PAVIMENTOS

Trabalho de conclusão de curso para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil apresentado  
à Faculdade de Inhumas - Facmais.

Orientador: Me. Jeferson Barbosa de Freitas

INHUMAS – GO  
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**BIBLIOTECA FACMAIS**

**B214i**

BANDEIRA, Geovana de Sousa.

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEUS  
RECICLADOS NO DESEMPENHO MECÂNICO DOS PAVIMENTOS/** Geovana  
de Sousa Bandeira; Wilquer Domingos Sigum. – Inhumas: FacMais, 2021.

Orientadora: Jeferson Barbosa de Freitas

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Educação Superior de  
Inhumas - FacMais, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Asfalto-Borracha; 2. Resistência Mecânica; 3. Análise Elástica de Múltiplas  
Camadas. I. Título.

**CDU:624**

## RESUMO

Em virtude do crescimento acelerado do número de veículos, o Brasil vem enfrentando diversos problemas como o aumento do tráfego que, conseqüentemente, gera um aumento do desgaste e descarte de pneus inservíveis, ocasionando também uma maior deterioração das vias do país. Desta forma, visando solucionar o problema da má qualidade dos pavimentos e do descarte incorreto desses resíduos, o presente trabalho fará um estudo acerca da incorporação da borracha de pneus inservíveis às misturas asfálticas de forma a aumentar a resistência mecânica dos pavimentos e sua durabilidade. Para tal, foi feito um levantamento bibliográfico relacionado ao tema, onde foram selecionados alguns trabalhos com o intuito de comparar as misturas convencionais com as misturas com adição de borracha e submetê-las ao programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas, a fim de analisar a viabilidade mecânica do concreto asfáltico com a adição de asfalto-borracha em rodovias de alto volume de tráfego. Os resultados obtidos na análise não foram satisfatórios para o cenário estudado, pois a adição da borracha influenciou negativamente no comportamento das misturas. Isso, por sua vez, não teve relação somente com a adição da borracha, mas também com os materiais utilizados, o volume de tráfego, etc.

**PALAVRAS-CHAVES:** Asfalto-Borracha, Resistência Mecânica, Análise Elástica de Múltiplas Camadas.

## **ABSTRACT**

Due to the accelerated growth in the number of vehicles, Brazil has been facing several problems such as the increase in traffic, which, consequently, generates an increase in wear and tear of waste tires, also causing a greater deterioration of the country's roads. Thus, in order to solve the problem of poor pavement quality and incorrect disposal of these residues, this work will study the incorporation of rubber from useless tires to asphalt mixtures in order to increase the mechanical resistance of pavements and their durability. To this end, a bibliographic survey related to the topic was carried out, where some works were selected in order to compare conventional mixtures with those with added rubber and submit them to the MultilayerElastic Analysis program, in order to analyze the feasibility mechanics of asphalt concrete with the addition of rubber asphalt on high-traffic roads. The results obtained in the analysis were not satisfactory for the studied scenario, as the addition of rubber negatively influenced the behavior of the mixtures. This, in turn, was not only related to the addition of rubber, but also to the materials used, the volume of traffic, etc.

**KEYWORDS:** Asphalt-Rubber, Mechanical Strength, Multilayer Elastic Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Camadas de um pavimento rígido.....	14
<b>Figura 2</b> - Camadas de um pavimento flexível.....	15
<b>Figura 3</b> - Representação das solicitações de um pavimento flexível.....	21
<b>Figura 4</b> - Corpo de prova após ruptura.....	23
<b>Figura 5</b> - Gráfico do ensaio de <i>Flow Number</i> .....	26
<b>Figura 6</b> - Esquema de reutilização de pneus inservíveis.....	29
<b>Figura 7</b> - Processo de fabricação do asfalto-borracha via úmida.....	32
<b>Figura 8</b> - Etapas de desenvolvimento da pesquisa.....	34
<b>Figura 9</b> - Lista de eixos do programa AEMC.....	36
<b>Figura 10</b> - Interface do programa AEMC.....	38
<b>Figura 11</b> - Módulo de Resiliência x teor de borracha.....	45
<b>Figura 12</b> - Módulo de Resiliência x porcentagem de redução.....	46
<b>Figura 13</b> - Resistência à Tração x teor de borracha.....	47
<b>Figura 14</b> - Resistência à Tração x porcentagem de redução.....	48
<b>Figura 15</b> - Estrutura do pavimento tipo.....	50
<b>Figura 16</b> - Afundamento de trilha de roda do pavimento tipo.....	52
<b>Figura 17</b> - Detalhamento do afundamento de trilha de roda.....	53
<b>Figura 18</b> - Porcentagem de área trincada.....	54
<b>Figura 19</b> - Porcentagem de área trincada x tempo (meses).....	55
<b>Figura 20</b> - Porcentagem de vida útil x redução de vida útil do pavimento.....	56
<b>Figura 21</b> - Sistema de coordenadas do AEMC.....	57
<b>Figura 22</b> - <i>Grid</i> de pontos analisados para os seis pavimentos-tipo.....	58
<b>Figura 23</b> - Tensões no plano X ( $S_x$ ).....	60
<b>Figura 24</b> - Deslocamentos no eixo X ( $U_x$ ).....	61
<b>Figura 25</b> - Tensões no plano Z ( $S_z$ ).....	62
<b>Figura 26</b> - Deslocamentos no eixo Z ( $S_z$ ).....	63
<b>Figura 27</b> - Diagrama tensão-deformação.....	64



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dados retirados para análise Neves Filho (2004).....	40
<b>Tabela 2</b> - Dados retirados para análise Patriota (2004).....	41
<b>Tabela 3</b> - Dados retirados para análise Specht (2004).....	42
<b>Tabela 4</b> - Variáveis retiradas dos trabalhos.....	44
<b>Tabela 5</b> - Materiais utilizados no pavimento tipo.....	49
<b>Tabela 6</b> - Dados do tráfego da GO-070.....	50
<b>Tabela 7</b> - Números de eixos.....	51
<b>Tabela 8</b> - Porcentagem área trincada x tempo (meses).....	54
<b>Tabela 9</b> - Redução da vida útil do pavimento.....	55
<b>Tabela 10</b> - Dados do AEMC para análise do comportamento dos pavimentos- tipo.....	58



## SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO	8
1.1-	JUSTIFICATIVA	9
1.2-	OBJETIVOS	9
1.2.2-	Objetivos específicos	10
2-	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1-	Pavimento	11
2.1.1-	Tipos de pavimento	12
2.1.2-	Ligantes asfálticos	13
2.1.2.1-	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	13
2.1.2.2-	Ligantes asfálticos modificados	14
2.1.2.2.1-	Asfalto Modificado por Polímero (AMP)	14
2.1.2.2.2-	Asfalto Modificado por Borracha (AMB)	15
2.2-	Misturas asfálticas	16
2.2.1-	Concreto asfáltico convencional (CA)	16
2.2.2-	Concreto asfáltico especial	17
2.3-	Comportamento mecânico das misturas asfálticas	17
2.3.1-	Principais variáveis do comportamento mecânico	19
2.3.2-	Principais ensaios do comportamento mecânico	19
2.3.3-	Novo Método de Dimensionamento (MEDINA)	23
2.4-	Asfalto-borracha (AB)	24
2.4.1-	Histórico do asfalto-borracha	25
2.4.2-	Processo de fabricação do asfalto-borracha	26
2.4.3-	Vantagens da incorporação da borracha ao CAP/MISTURA	28
3-	METODOLOGIA	30
3.1-	Etapa 1: Definição de Variáveis e Seleção de Dados	31
3.2-	Etapa 2: Análise mecânica	31
3.3-	Etapa 3: Definição do pavimento tipo e da variação de tráfego/eixos	32
3.4-	Etapa 4: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC)	32
4-	RESULTADOS	35
4.1-	Etapa 1: Definição de variáveis e Seleção de Dados	35
4.2-	Etapa 2: Análise mecânica	39

4.3- Etapa 3: Definição do pavimento tipo e da variação de tráfego/eixos43

4.4- Etapa 4: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC).50

5- CONCLUSÃO59

BIBLIOGRAFIA61

APÊNDICE A - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 166

APÊNDICE B - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 26

APÊNDICE C - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 37

APÊNDICE D - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 48

APÊNDICE E - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 57

APÊNDICE F - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 66

## 1- INTRODUÇÃO

Pode-se afirmar que o setor de transportes está diretamente ligado ao desenvolvimento de uma nação, dado que a ligação entre cidades, estados e países é de suma importância para a evolução de uma sociedade e de sua economia. Em virtude disto, ressalta-se a predominância do modal rodoviário na matriz de transportes brasileira, onde 61% da carga e 95% dos passageiros são transportados por estradas e rodovias (CNT, 2019).

No entanto, diante do cenário atual cabe destacar que, embora seja o principal modal de transportes, o setor rodoviário não se destaca em termos de qualidade e infraestrutura. Um dos motivos é o mau estado da rede viária do país que, na maioria das vezes, não proporciona segurança e conforto aos usuários.

Embora o país dependa quase inteiramente desse meio para o transporte, o Brasil apresenta uma proporção baixa de estradas pavimentadas. Aproximadamente 87,6% do total de vias, ou seja, cerca de 1,5 milhões de quilômetros, não possuem revestimento asfáltico. As que possuem revestimento (cerca de 12,4%), no entanto, nem sempre apresentam qualidades satisfatórias para o tráfego, uma vez que mais da metade desse percentual (cerca de 59%) encontram-se em estado regular a péssimo (CNT, 2019).

A má qualidade das malhas viárias brasileiras, por sua vez, é dada por diversos fatores, dentre eles ressalta-se, na presente pesquisa, o emprego de materiais que nem sempre alcançam o desempenho mecânico desejado, ocasionando na aparição precoce de problemas como deformações permanentes, fadiga, dentre outros.

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019), uma das causas que contribuem para o processo de deterioração das vias é o alto fluxo de veículos que, entre 2009 e 2019, sofreu um aumento de 80,8%.

O elevado fluxo de veículos aliado a má condição das superfícies de rolamento contribuiu para outro problema que gera impactos na esfera ambiental, ou seja, há uma redução da vida útil dos pneus, portanto, há um maior descarte desses. Dados apresentados pelo Serviço Social de Transporte (SEST SENAT, 2020) indicam que, no Brasil, o descarte de pneus alcança 450 mil toneladas por ano.

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2018), a coleta e descarte incorreto de pneus causa danos ao meio ambiente e traz riscos à saúde da população, uma vez que se descartados a céu aberto podem tornar-se criadouro do mosquito *Aedes Aegypti*, transmissor de doenças como dengue, zika e chikungunya. Dessa forma, há uma justificativa sanitária para dar atenção ao problema do descarte dos pneus que, por apresentarem baixa compressibilidade e lenta degradação (cerca de 600 anos), não devem ser descartados em locais como aterros sanitários e lixões.

Em virtude dos problemas acima levantados, diversos estudos foram realizados acerca da incorporação da borracha de pneus reciclados aos ligantes asfálticos convencionais, com o intuito de buscar melhorias nas propriedades mecânicas dos pavimentos e dar uma correta destinação a estes resíduos. Os resultados desses estudos, já publicados por diversos autores, evidenciam que a atribuição de algumas das características presentes na borracha ao pavimento pode ser uma solução viável para a redução de patologias precocemente.

Portanto, diante desta linha de pensamento baseada no aumento excessivo do tráfego e da busca de materiais que auxiliem na melhoria do desempenho mecânico dos pavimentos, chega-se ao seguinte problema da pesquisa: Será que o uso do concreto asfáltico com asfalto-borracha é viável em rodovias com alto volume de tráfego?

### **1.1- JUSTIFICATIVA**

Os estudos acerca da incorporação da borracha de pneus descartados nas misturas asfálticas têm apresentado sólidos avanços científicos na área da pavimentação, evidenciando cada vez mais que sua aplicabilidade é uma alternativa viável para a resolução de diversos problemas relacionados à má qualidade dos pavimentos. Nesse contexto, porém, ainda há muito a ser discutido sobre o assunto.

Desta forma, existem alguns interesses sociais que justifiquem esta pesquisa. Nos últimos anos, o número de empresas e transportadoras que necessitam do modal rodoviário para transporte vem aumentando cada vez mais, e é imprescindível que o pavimento esteja em perfeitas condições, livre de defeitos ou patologias que possam atrasar ou aumentar o custo da viagem.

Em virtude disto, a relevância científica do tema encontra-se na necessidade de compreender como a adição da borracha de pneus descartados auxilia no melhor desempenho dos pavimentos, aumentando sua durabilidade e resistência ao elevado fluxo de veículos.

Indubitavelmente, o grave problema causado pelo aumento do número de veículos é o aumento do desgaste dos pneus, causado pela má qualidade da rede viária. Isto, por sua vez, causa o crescimento cada vez maior do descarte destes resíduos. Posto isto, este trabalho vem, por meio dos conceitos de sustentabilidade, justificar como o uso da borracha destes pneus contribui não só para a melhoria dos pavimentos, comotambém auxilia em seu processo de descarte, dando a estes uma disposição ambientalmente correta.

### **1.2- OBJETIVOS**

### **1.2.1- Objetivo geral**

A presente pesquisa tem como objetivo principal analisar o comportamento físico e mecânico das misturas com adição de borracha e comparar seu desempenho com as misturas convencionais.

### **1.2.2- Objetivos específicos**

Além do objetivo geral, a pesquisa apresentará também objetivos específicos, sendo eles:

1. Definir as principais variáveis relacionadas ao comportamento mecânico das misturas asfálticas;
2. Comparar sistematicamente resultados de análises laboratoriais de diferentes pesquisas realizadas com asfalto-borracha e o asfalto convencional;
3. Simular e comparar cenários hipotéticos utilizando a análise elástica de múltiplas camadas com alto volume de tráfego.

## 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata-se de uma revisão bibliográfica e engloba os principais conceitos a respeito da pavimentação.

### 2.1- Pavimento

A criação de rotas alternativas de transporte, desde a antiguidade, é movida por fatores de cunho econômico e de integração regional. Mesmo nas antigas civilizações, a pavimentação tornou-se uma atividade indispensável para adaptar e preservar as vias mais estrategicamente significativas (BALBO, 2007).

Uma das mais antigas vias pavimentadas da história, localizada no Egito, não foi destinada, a princípio, aos veículos com rodas, ou seja, não visava o transporte de passageiros. Sua finalidade era facilitar o transporte de pedras e blocos para a construção de templos e pirâmides, através de trenós. De certa forma, as estradas pavimentadas pelos egípcios restringiam-se para fins religiosos e para desfiles militares e reais (BALBO, 2007).

Com o passar do tempo e com a evolução das rotas comerciais e militares, essas vias deixaram de ter somente fins religiosos e passaram a servir também para o transporte de mercadorias e pessoas (BERNUCCI, 2008).

Ao decorrer dos anos, com a evolução cada vez maior dos veículos auto-motores, já no início do século XX, as técnicas de construção de estradas foram se aprimorando, a necessidade de vias mais confortáveis e seguras fez com que surgissem novos métodos de pavimentação. Com o desenvolvimento dessas novas tecnologias, estradas que antes eram pavimentadas com pedras e possuíam superfícies irregulares passaram a ter superfícies mais niveladas e a usarem materiais adequados para este fim (ARAÚJO, 2016).

No Brasil, os investimentos acerca da pavimentação das vias só começaram a se consolidar após a chegada dos primeiros carros particulares, em 1903, sendo realizado, em 1916, o Primeiro Congresso Nacional de Estradas de Rodagem no Rio de Janeiro. Anos mais tarde, em 1928, foi inaugurada a primeira rodovia que simbolizou a nova política rodoviária do país, denominada Rodovia Rio-São Paulo, com 506 quilômetros de extensão (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Em 1937 foi criado, pelo então presidente Getúlio Vargas, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), responsável por gerenciar e coordenar o sistema rodoviário brasileiro. Houve, porém, em 2001, a extinção do DNER por parte do presidente Fernando Henrique Cardoso, sendo suas atribuições transferidas ao Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) (BERNUCCI *et al.*, 2008). Sendo assim, Bernucci *et al.* (2008) define pavimento como uma estrutura multicamada construída acima de uma

superfície final de terraplanagem. Técnica e economicamente, sua função é suportar os esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima e possibilitar que os usuários trafeguem com segurança, conforto e economia.

### 2.1.1- Tipos de pavimento

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006), os pavimentos são classificados em basicamente dois tipos:

- Rígidos: também conhecido por pavimento de concreto de cimento Portland (PCS), os pavimentos rígidos são aqueles em que a camada de rolamento é feita de placas de concreto, com ou sem armadura de aço, que possui função de revestimento e base da estrutura. Usualmente são fixadas sobre o subleito ou sub-base, absorvendo quase todas as tensões oriundas dos carregamentos nele aplicados;
- Flexíveis: também conhecidos como pavimentos asfálticos, os pavimentos flexíveis são aqueles em que a maior parte de sua composição é formada por agregados (cerca de 90% a 95%) e uma pequena parcela de material betuminoso (cerca de 5% a 10%). Sob carregamento, os pavimentos flexíveis sofrem deformações elásticas em todas as camadas, ou seja, as cargas distribuídas apresentam tensões mais concentradas e parcelas equivalentes. Os pavimentos flexíveis são os mais utilizados atualmente e, de acordo com

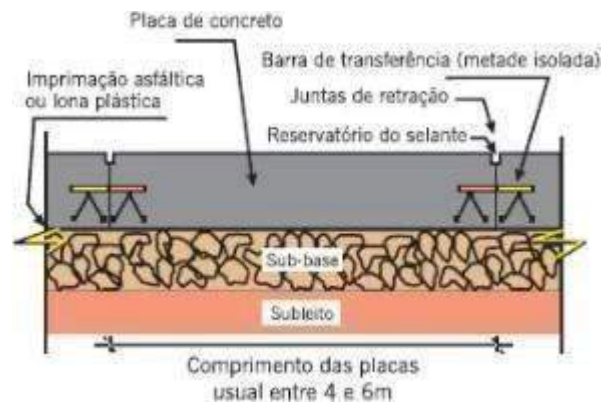
Senço (2007), as deformações por eles sofridas, até certo ponto, não causam a ruptura.

Segundo a NBR 7207/82, os pavimentos são compostos por três camadas principais: sub-base, base e revestimento. Dentre essas camadas, as de uso obrigatório são apenas o revestimento e a base. O subleito, antes considerado uma camada, atualmente exerce o papel de fundação da estrutura, na maioria dos casos; o reforço do subleito, por sua vez, só é recomendado quando o solo da região não atinge o comportamento adequado para a instalação da infraestrutura do pavimento. Enfim, cada uma das camadas do pavimento possui uma função específica, devendo ser realizadas de modo que ofereçam condições adequadas de rolamento.

O revestimento é a camada que recebe diretamente os esforços oriundos do tráfego e, por esta razão, é de suma importância a utilização de materiais que possam resistir a esse efeito e proporcionar maior durabilidade à estrutura. Diante disso, o foco principal deste estudo encontra-se na camada de revestimento.

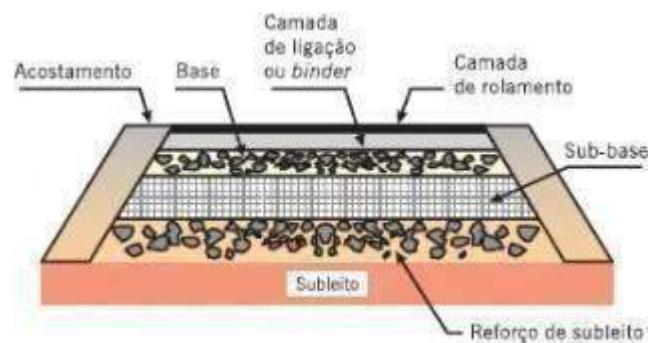
Nas figuras 1 e 2 são representados, respectivamente, o esquema estrutural de camadas dos pavimentos rígidos e flexíveis:

**Figura 1:** Camadas de um pavimento rígido.



**Fonte:** Bernucci *et al.* (2008).

**Figura 2:** Camadas de um pavimento flexível



**Fonte:** Bernucci *et al.* (2008).

## 2.1.2- Ligantes asfálticos

Neste tópico será abordado a definição de ligantes asfálticos, assim como os principais a serem utilizados na pavimentação.

### 2.1.2.1- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O asfalto, comumente denominado ligante asfáltico, é um material betuminoso advindo do processo de destilação do petróleo. Possui diversas aplicações na construção civil, dentre elas destaca-se o uso na pavimentação. No Brasil, utiliza-se a sigla CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) para designar o ligante asfáltico que encontra-se no estado semissólido (BERNUCCI, 2008).

As principais funções do ligante asfáltico são de aglutinação, responsável por promover a ligação entre os agregados, de modo que a mistura asfáltica seja capaz de resistir ao efeito de desagregação ocasionado pela ação do tráfego; e de impermeabilização, responsável por garantir que a água não penetre na estrutura e comprometa seu funcionamento (LEITE, 1999).



O ligante asfáltico possui um papel muito importante na pavimentação, pois é ele quem rege, através de suas características visco-elásticas (viscoso quando submetido a cargas lentas e pesadas e elástico quando submetido a cargas rápidas e leves), o comportamento mecânico das misturas asfálticas, visto que o desempenho dos pavimentos a altas e baixas temperaturas está relacionado com as características dos ligantes (BATISTA, 2017).

Segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), o CAP pode ser classificado em: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200. Esta classificação é feita através de um ensaio de penetração que mede o “grau de dureza” do asfalto, regido pela norma ABNT NBR 6576/98. Os mais utilizados no Brasil atualmente são o CAP 30-45 e o CAP 50-70.

### **2.1.2.2- Ligantes asfálticos modificados**

O aumento acelerado do volume de tráfego e das solicitações por ele impostas sobo pavimento acarreta o surgimento precoce de patologias na camada superficial da estrutura, fazendo com que os ligantes convencionais, em muitos casos, não suportem sozinhos toda esta solicitação. Desse modo, a busca por novos métodos e materiais tem sido essencial para a melhoria do desempenho das vias (LEAL, 2013).

Desta forma, visando a qualidade e o alto desempenho dos pavimentos, diversos pesquisadores (Oda, (2000); Specht, (2004); Pinheiro, (2004)) realizaram estudos acerca da incorporação de modificadores ao ligante asfáltico, de modo que estes possibilitem a melhoria de suas características técnicas e, de modo consequente, aumente sua vida útil (ARAÚJO, 2016).

Dentre estes modificadores, os que mais se destacam são os agentes rejuvenescedores, compostos por polímeros e borracha moída de pneus. No presente trabalho destaca-se o uso da borracha de pneus insensíveis que, quando corretamente processada e adicionada ao CAP, dá origem ao asfalto-borracha.

#### **2.1.2.2.1- Asfalto Modificado por Polímero (AMP)**

De acordo com Mano (1986), polímeros são elementos macro-moleculares que surgem através da união de várias moléculas pequenas que, após ligadas umas às outras adquirem características próprias e, quando adicionadas a outros elementos, passam a predominar. São materiais visco-elásticos que, dependendo do tempo e da temperatura, apresentam comportamentos diferentes.

Desta forma, a fim de prevenir manifestações patológicas precoces e aumentar a vida

útil dos pavimentos, tem se tornado altamente comum a combinação de polímeros com cimentos asfálticos, uma vez que os polímeros são responsáveis pela redução da suscetibilidade térmica e da consistência dos asfaltos que, conseqüentemente, gera um aumento na resistência à deformação permanente e à trincas por fadiga (AMARAL, 2000).

Porém, para que a modificação do CAP seja técnica e economicamente viável, é essencial que o polímero se misture corretamente ao asfalto e resista às altas temperaturas de usinagem, de modo que melhore a fluidez dos ligantes a altas temperaturas, sem torná-lo muito viscoso e que, em baixas temperaturas, ele não se torne muito rígido ou quebradiço (ANTOSCZEZEM JUNIOR, 2012).

Os estudos acerca da incorporação de polímeros aos cimentos asfálticos começaram no início da década 70, na Europa e nos Estados Unidos. No Brasil, a utilização em larga escala dos AMP iniciaram-se nos anos 90 e, com isso, foi criada uma especificação para o uso do asfalto-polímero, denominada Especificação Técnica para Asfalto Modificado por Polímero – DNER- EM 396/99 (RODRIGUES, 2006).

Dentre os diversos tipos de polímeros existentes, os que são mais utilizados na modificação dos cimentos asfálticos são: Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), Estireno-Butadieno-Rubber (SBR) e Etileno-n-Butil Acrilato-Glicidil Metacrilato (RET).

#### **2.1.2.2.2- Asfalto Modificado por Borracha (AMB)**

De acordo com Bernucci *et al* (2008), uma das maneiras mais eficazes de integrar os benefícios dos polímeros ao CAP e, ao mesmo tempo, reduzir os passivos ambientais, é incorporar a borracha de pneus inservíveis às misturas asfálticas.

Um dos primeiros polímeros a serem incorporados ao CAP foi a borracha que, segundo Oda (2000), possibilita o aumento da flexibilidade nas misturas, tornando-as mais resistentes às deformações e ao envelhecimento, além de aumentar a resistência à derrapagem e reduzir os níveis de ruído no pavimento.

O uso de pneus inservíveis na pavimentação tornou-se uma das tecnologias mais utilizadas no mundo, visto que seu uso reduz a suscetibilidade térmica e aumenta a ductilidade dos ligantes, ocasionando em uma maior resistência às deformações plásticas quando submetido a elevadas temperaturas e ao surgimento de fissuras por efeito da retração térmica e fadiga, além de retardar o envelhecimento dos pavimentos e aumentar sua adesividade, ao mesmo tempo em que reduz os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos pneus (SILVA *et al*, 2002).

Os estudos acerca da incorporação da borracha às misturas asfálticas datam da década de 60 e a primeira aplicação foi realizada nos Estados Unidos. No Brasil, a

primeira execução de um trecho, ainda em fase experimental, com asfalto-borracha foi realizada na cidade de Guaíba, no Rio Grande do Sul, em 2001 (BERNUCCI *et al*, 2008).

As primeiras normas que regulamentam o uso do asfalto-borracha na pavimentação foram criadas em 2009, sendo as principais: DNIT 111/2009 e DNIT 112/2009.

## **2.2- Misturas asfálticas**

Neste item será abordado o conceito de misturas asfálticas e os principais tipos utilizados na pavimentação das vias.

### **2.2.1- Concreto asfáltico convencional (CA)**

No Brasil, a maior parte das vias pavimentadas possui, na camada de rolamento, revestimentos compostos por misturas de ligantes asfálticos e agregados pétreos, ambos com características específicas para cada tipo de estrutura. A união desses materiais se deve às propriedades aglutinantes presentes nos ligantes asfálticos, originando as misturas asfálticas ou, mais comumente utilizado na pavimentação, concreto asfáltico (CA) (BERNUCCI *et al*, 2008).

Silva *et al* (2002) garante que, quando corretamente dosadas e processadas, estas misturas devem oferecer à estrutura requisitos indispensáveis para seu bom desempenho, tais como impermeabilidade, durabilidade, estabilidade, flexibilidade, resistência ao trincamento térmico, à fadiga e à derrapagem para as condições climáticas e de tráfego às quais foram projetadas.

No entanto, a maioria dos defeitos que surgem nos pavimentos, a curto ou longo prazo, tem relação direta com a mistura asfáltica nele empregada, visto que as patologias estão diretamente associadas aos materiais utilizados e ao comportamento mecânico da estrutura. Segundo Specht (2004), existem dois tipos de solicitações mecânicas responsáveis pelo surgimento de patologias nos pavimentos flexíveis: flexão repetida, que está relacionada ao trincamento do revestimento e é responsável pela fadiga, e a compressão simples, responsável pelo acúmulo de deformações permanentes nos pavimentos.

De acordo com Bernucci *et al*,(2008), as misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com sua temperatura de usinagem em: misturas a quente, morna, semi- morna e a frio. Neste estudo serão abordados os revestimentos oriundos do processo de usinagem a quente do concreto asfáltico.

Também conhecido como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), o

concreto asfáltico à quente é usinado em temperaturas bastante elevadas, variando entre 140 e 170 °C, e é o mais utilizado no Brasil, sendo indicado tanto para rodovias com alto volume de tráfego quanto para rodovias com baixo volume de tráfego, diferentemente das misturas usinadas a frio que só suportam baixos volumes de tráfego (BERNUCCI *et al*, 2008).

### **2.2.2- Concreto asfáltico especial**

A adição de agentes modificadores nos asfaltos é uma das soluções mais viáveis para a correção de problemas associados aos revestimentos, uma vez que modificam as propriedades dos asfaltos, tornando-os mais resistentes às tensões sob eles aplicadas e aumentando também a vida útil do pavimento.

O Concreto Asfáltico (CA) é uma das mais conhecidas misturas asfálticas produzidas e utilizadas no Brasil, podendo também ser preparada com a maioria dos asfaltos modificados existentes. Dentre os tipos de asfaltos modificados mais utilizados para a produção de concretos asfálticos especiais, encontram-se o Asfalto Modificado por Polímero e o Asfalto Modificado por Borracha de pneus inservíveis.

O objetivo da adição de modificadores às misturas asfálticas é criar estruturas capazes de atenuar as falhas estruturais e funcionais do pavimento, fazendo com que ele resista de forma melhor às solicitações impostas pelo tráfego e pelas intempéries, sendo seu uso mais recomendado em vias onde o fluxo de tráfego é maior (FLENGER, 2018).

### **2.3- Comportamento mecânico das misturas asfálticas**

As misturas asfálticas são comumente utilizadas na camada de revestimento dos pavimentos que, segundo Balbo (2007), deve ser executada com materiais de qualidade para que resista às solicitações impostas pelo tráfego e pelas intempéries.

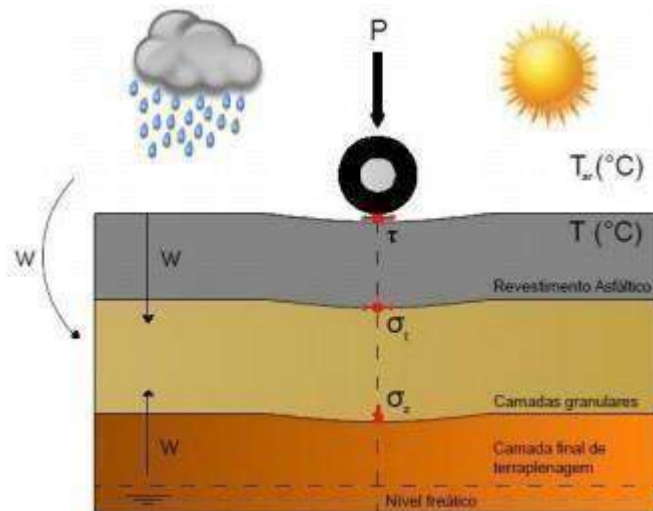
Durante sua vida útil, os pavimentos apresentam diversas manifestações patológicas, estruturais e funcionais que estão, de modo direto, relacionadas aos materiais empregados na estrutura. O material utilizado na base do pavimento tem grande influência no comportamento da estrutura e atribui à camada de revestimento tal comportamento (BALBO, 2007).

Segundo Otto (2009), o comportamento mecânico dos pavimentos está diretamente ligado ao tipo de material empregado e às solicitações impostas sobre ele, uma vez que todos os pavimentos estão suscetíveis a solicitações repetidas relacionadas à passagem

dos veículos sobre a estrutura.

A passagem dos veículos sobre o pavimento, por sua vez, gera uma determinada carga sobre a estrutura, a qual dá origem a tensões que acarretarão na redução da qualidade da via e conseqüentemente ao desgaste desta (OTTO, 2009). A figura 3 ilustra o processo de deterioração de uma via levando em consideração as solicitações do tráfego, as intempéries e as tensões resultantes da carga de roda:

**Figura 3:** Representação das solicitações em um pavimento flexível.



Fonte: Otto (2009).

Ao analisar a figura, é possível perceber a ação das intempéries sobre a estrutura, eventualmente levando ao aumento da temperatura do pavimento e à entrada de água nas camadas, comprometendo o funcionamento da estrutura. As solicitações oriundas do tráfego, por sua vez, sujeitam o revestimento à flexão, gerando, desta forma, os esforços de tração ( $\sigma_t$ ) nas fibras inferiores da camada, sendo assim responsável pelo trincamento do pavimento por fadiga (MELO, 2014).

Ainda segundo Melo (2014), a camada de revestimento também é submetida, em sua superfície, a tensões tangenciais ( $\tau$ ), esforços de compressão e cisalhamento e expansões e contrações térmicas, diretamente relacionadas à geração de deformação permanente.

De acordo com o Highway Research Board (HRB), para que uma mistura asfáltica tenha um bom desempenho são exigidas algumas propriedades mecânicas principais, sendo elas:

- **Trabalhabilidade:** refere-se à correta mistura e espalhamento da massa asfáltica;
- **Durabilidade:** refere-se à resistência das misturas às ações do tráfego e das intempéries;
- **Flexibilidade:** referente à capacidade das misturas em resistir às flexões

repetidas causadas pela passagem dos veículos (fadiga);

- Estabilidade: propriedade que a mistura asfáltica possui de resistir aos carregamentos provindos do tráfego, evitando as deformações permanentes oriundas deste;
- Resistência por aderência superficial: é a capacidade, adquirida através da correta utilização dos agregados nas misturas para geração de um atrito superficial conveniente, de resistir aos deslizamentos dos pneus.

### **2.3.1- Principais variáveis do comportamento mecânico**

O pavimento é definido na engenharia como um conjunto de múltiplas camadas, sendo cada uma composta por materiais diferentes, de modo que desempenhem funções específicas na estrutura e suportem as cargas aplicadas. Essas cargas, por sua vez, são geradas em função do tráfego, o que faz com que todo o sistema seja submetido a solicitações de carga repetidas, fazendo com que a estrutura apresente reações mecânicas (deformações permanentes e recuperáveis) devido ao carregamento cíclico (SANTOS *et al.*, 2019).

Ao ser feita a análise de um pavimento, considerando não só as camadas em particular, mas a estrutura como um todo, sabe-se que existem forças que atuam sobre esta estrutura, resultando em tensões que geram deformações. Ao realizar o dimensionamento de um pavimento, é imprescindível a consideração dessas deformações, uma vez que são elas que delimitam a vida útil da estrutura (MEDINA E MOTTA, 2015).

Para entender o comportamento mecânico de um pavimento, é indispensável a realização de ensaios, pois é através deles que encontram-se as variáveis mecânicas (deslocamentos, tensões de cisalhamento, profundidade, dentre outras) necessárias para o correto dimensionamento de um pavimento. Para realização deste trabalho, as variáveis principais a serem analisadas serão: Módulo de Resiliência (MR), Flow Number e Resistência à Tração (RT).

### **2.3.2- Principais ensaios do comportamento mecânico**

Para a determinação do comportamento mecânico dos pavimentos e das variáveis acima citadas, devem ser realizados alguns ensaios específicos, sendo eles:

- **Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)**

O Ensaio de Resistência à Tração é regido pela norma do DNIT 136/2018 - ME que, de acordo com Bernucci *et al.*, consiste na “aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro”.

Para realização do ensaio, deve-se primeiramente obter os corpos de prova (podendo ser retirado em campo por meio de sonda rotativa ou ser moldado em laboratório, devendo ter altura entre 35mm e 70mm e diâmetro de  $100\pm 2$ mm) e, em seguida, colocá-los em um compartimento quatro horas antes de realizar o ensaio, de modo que haja um controle da temperatura de  $25\pm 0,5$  °C (PAVEI *et al.*, 2014).

Logo após atingir a temperatura especificada em projeto, o corpo de prova deve ser posicionado horizontalmente no dispositivo centralizador da prensa e, dessa forma, deve-se iniciar a aplicação de carga de forma progressiva, com velocidade de deformação de  $0,8\pm 0,1$  mm/s até que haja a ruptura, separando o corpo de prova em duas metades, (BERNUCCI *et al.*, 2008). A figura 4 ilustra o momento da ruptura do corpo de prova:

**Figura 4:** corpo de prova após ruptura



Fonte: DNIT, 2018.

Através da ruptura do corpo de prova é obtido o valor da carga de ruptura e, com esse valor, é possível calcular a RT por meio da equação 1:

$$\sigma_r = 2F / \pi \cdot D \cdot H \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_r$ - resistência à tração, em MPa; F -

carga de ruptura, em N;

D - diâmetro do corpo de prova, em mm; H -

altura do corpo de prova, em mm.

- **Ensaio de Módulo de Resiliência**

Segundo Santos et al. (2019), o Módulo de Resiliência (MR) é uma das variáveis mais importantes na determinação do comportamento mecânico dos materiais de pavimentação, visto que é responsável pelo comportamento resiliente destes quando sujeitos aos carregamentos cíclicos. O principal ensaio para obtenção desta variável, no Brasil, é o ensaio de compressão diametral de cargas repetidas, normatizado pelo DNIT 135/2018.

Esse ensaio é realizado através da aplicação de cargas repetidas verticalmente no plano diametral de um corpo de prova cilíndrico (podendo ser retirado em campo por meio de sonda rotativa ou ser moldado em laboratório, devendo ter altura entre 35mm e 65mm e diâmetro de  $100 \pm 2$ mm).

Após a obtenção dos corpos de prova, estes devem ser colocados em uma câmara de temperatura para atingir o condicionamento térmico necessário para o ensaio ( $25 \pm 0,5$  °C) e, posteriormente, serem posicionados no dispositivo de carregamento, verificando o correto posicionamento dos sensores de deslocamento.

Inicia-se, então, o condicionamento do corpo de prova através da aplicação de 50 ciclos de carga, devendo sempre verificar se os registros de carga e deslocamentos estão compatíveis com o esperado. Em seguida, sem que haja interrupção, são aplicados mais 15 ciclos, registrando os sinais de deslocamento e carga com taxa mínima de 200 pontos por segundo. Logo após, aumenta-se em 5% a carga inicial e aplica-se mais 15 ciclos de carga, registrando os deslocamentos e, posteriormente, repetindo esta ação.

De acordo com o DNIT 135/18 (2018), O Módulo de Resiliência é “ a relação entre a tensão de tração e a deformação de tração geradas no ensaio de compressão diametral sob carga repetida” e, através dos valores obtidos no ensaio (carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis), pode ser calculado por meio da seguinte expressão:

$$MR = F \div \Delta H \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2)$$

Onde:

MR= Módulo de Resiliência, em MPa;

F= carga vertical repetida diretamente aplicada no corpo de prova, em N;

$\Delta$ = deslocamento elástico ou resiliente, em mm; H=

altura do corpo de prova, em mm;



$\Delta$ = coeficiente de Poisson.

### • Ensaio Uniaxial de Carga Repetida

O Ensaio Uniaxial de Carga Repetida, também conhecido como *Flow Number*, possibilita a avaliação da mistura asfáltica em relação à deformação permanente e é regido pela norma do DNIT 184/2018 – ME.

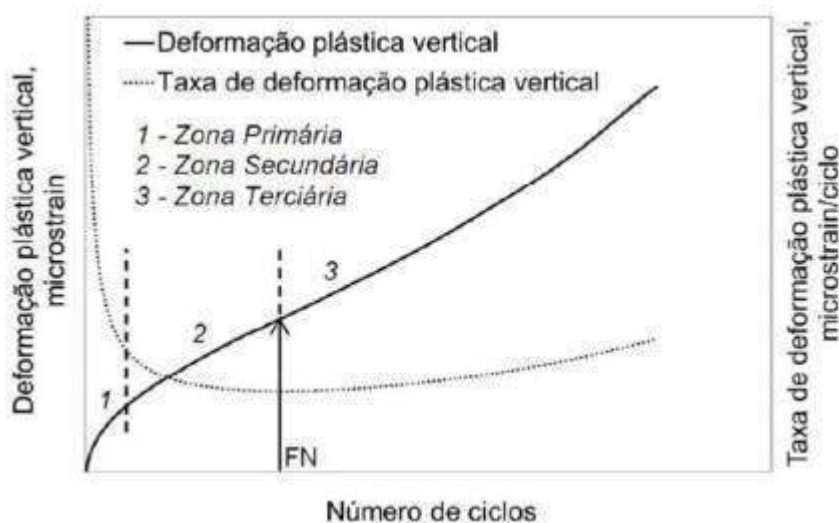
Segundo a ABNT NBR 16505/2016 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida, o ensaio corresponde à aplicação de uma carga repetidamente em um corpo de prova (moldado com altura de  $150 \pm 2,5$  mm e diâmetro  $102 \pm 2$  mm).

Para realização do ensaio, o corpo de prova deve estar em uma temperatura de 60 °C e ser submetido a uma carga de compressão inicial de 10,2 KPa (pré- carregamento) e, logo após, ser sujeito a um novo carregamento de 204 KPa durante 0,1 segundo, devendo ser executado um intervalo de 0,9 segundos, no qual deve ser mantida a carga de pré-carregamento.

A finalização do ensaio é feita quando um dos critérios determinados na norma é atendido, sendo eles: o corpo de prova atingir uma deformação de 5%, atingir 7200 ciclos de carga (cerca de duas horas de carregamento cíclico) ou atingir o *Flow Number* (KRAEMER, 2018).

Os resultados do ensaio são adquiridos através do gráfico apresentado na figura 5, que relaciona a deformação permanente com o número de ciclos de carga aplicados:

**Figura 5:** Gráfico do ensaio de *Flow Number*



**Fonte:** ABNT 16505/ 2016.

A curva de deformação permanente pode ser dividida em três zonas: zona

primária, onde a deformação no corpo de prova é elevada; zona secundária, onde a taxa de deformação torna-se constante e, quanto menor for a inclinação da reta, maior será a resistência da mistura à deformação; e zona terciária, onde a taxa de deformação aumenta e começa a haver cisalhamento constante do corpo de prova, indicando o valor do *Flow Number*.

### 2.3.3- Novo Método de Dimensionamento (MEDINA)

O dimensionamento de pavimentos, segundo Mota *et al.* (2018), é um dos fatores mais importantes para o bom desempenho dos pavimentos, uma vez que tem relação direta com a qualidade e capacidade do mesmo em suportar as cargas oriundas do tráfego, determinando, desta forma, as espessuras das camadas e materiais a serem utilizados para este fim.

Dentre os diversos métodos de dimensionamento de pavimentos existentes, encontra-se em vigência no Brasil o método MeDiNa, programa computacional baseado no Manual de Pavimentação do DNIT (2018) e inspirado no professor e engenheiro Jacques de Medina.

O software MeDiNa realiza o dimensionamento do pavimento através de um programa vinculado a ele, denominado AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas). Este programa, por sua vez, é responsável pelo cálculo das deformações e tensões na estrutura provenientes dos carregamentos (definidos no programa como Número de eixos - N) que, combinado a outros fatores (materiais disponíveis em jazidas naturais, materiais a serem produzidos, dados do tráfego, dentre outros), determinam o correto funcionamento do MeDiNa.

De acordo com o Manual de Ajuda do Programa MeDiNa, o correto funcionamento do software baseia-se em algumas hipóteses fundamentais:

- a. os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- b. a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c. as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d. todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- e. a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;

- f. na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- g. a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- h. a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- i. as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

#### **2.4- Asfalto-borracha (AB)**

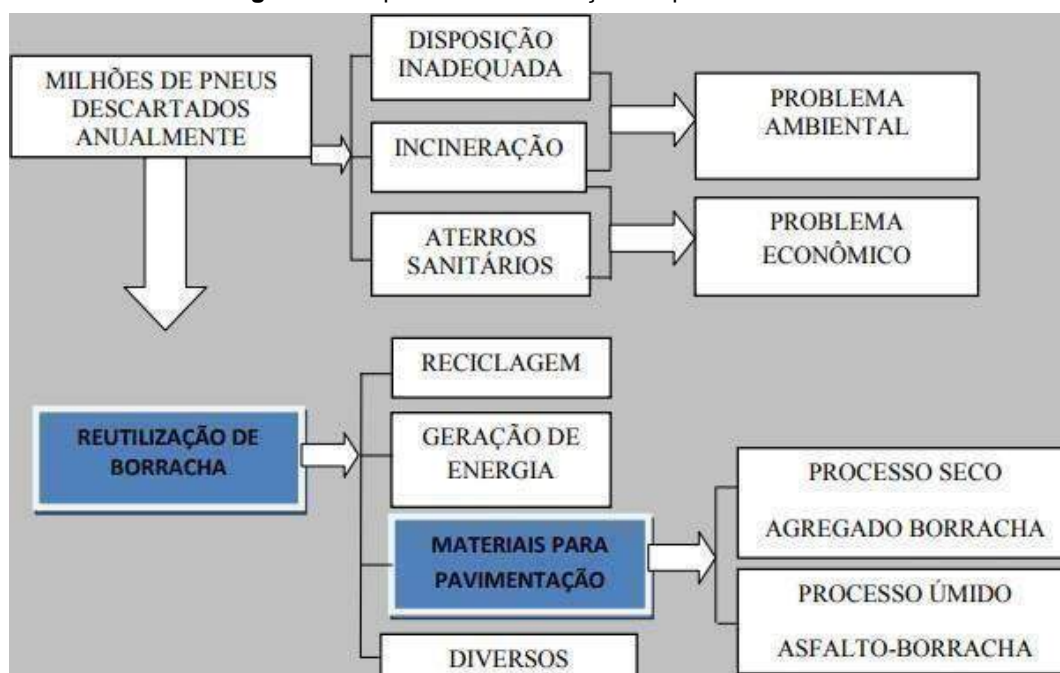
Paralelamente ao aumento do tráfego no país, houve o crescimento acelerado no descarte de pneus inservíveis. Estes resíduos, por sua vez, desempenham um papel importante nas discussões acerca dos impactos ambientais por eles gerados, pois representam um grave problema ao meio ambiente devido à sua lenta degradação e dificuldade de disposição final.

Os pneus são fabricados com a finalidade de terem longa vida útil e serem resistentes e, por esta razão, tornam-se objetos de difícil eliminação. De acordo com informações do Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem do Sistema da Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP) (2001), a produção de pneus no Brasil chega acerca de 40 milhões de unidades por ano e, neste mesmo período de tempo, são descartados quase metade desta produção.

Segundo o Instituto Brasileiro de Produção Sustentável (IBPS) (2005), uma das formas de reduzir o passivo ambiental causado pelo descarte incorreto de pneus é reutilizá-los, após correto processamento, como modificadores em misturas asfálticas, visto que os benefícios de seu uso na pavimentação já foram estudados e comprovados inúmeras vezes.

Na figura 6, Oda (2000) apresenta um fluxograma dos possíveis modos de reutilização de pneus inservíveis e os impactos que geram no meio ambiente:

**Figura 6:** Esquema de reutilização de pneus inservíveis.



Fonte: Oda (2000).

Com a aplicação desta técnica na fabricação dos pavimentos é possível perceber um aumento na durabilidade da estrutura, uma vez que uma via, quando executada com misturas asfálticas convencionais, tem sua vida útil estimada em 10 anos e, quando executada com a adição de borracha, passa a ter de 25 a 30 anos de vida útil. Isso se deve à presença de agentes oxidantes na borracha, reduzindo, assim, o envelhecimento do pavimento causado pela oxidação. E, ainda, estima-se que sejam consumidos aproximadamente 1000 pneus na produção de um quilômetro de rodovia (SOUZA, 2019).

De forma geral, o uso da borracha de pneus inservíveis está diretamente ligado à sustentabilidade e à melhoria das características mecânicas do revestimento, possibilitando uma evolução e um possível desenvolvimento das malhas viárias.

#### 2.4.1- Histórico do asfalto-borracha

Um dos primeiros relatos da combinação da borracha com o betume para a construção de pavimentos remonta à década de 1980, quando E. E. Cassel fez um experimento misturando os dois materiais. E foi somente em 1901 que houve a primeira aplicação desta mistura nas ruas de Cannes, na França (SPECHT, 2004).

Specht (2004) afirma que o estudo da incorporação da borracha ao asfalto teve maior destaque na Europa. Em 1898, a Inglaterra também se envolveu em tentativas de modificar as propriedades dos asfaltos adicionando borracha, tentativas estas que originaram um produto denominado *rubber-bitumem*. No entanto, devido a Segunda Guerra Mundial, estas

pesquisas tiveram que ser interrompidas.

Mais tarde, na década de 1960, Charles H. McDonald, engenheiro de materiais e considerado pai do sistema asfalto-borracha, ao atravessar o país em seu trailer para verificar as rodovias, notou algumas trincas no teto de seu veículo. Para selá-las, usou asfalto com pó de borracha e, com o tempo, percebeu que, ao contrário do asfalto tradicional, a mistura que usou não oxidava (SPECHT, 2004).

Com isso, Charles H. McDonald iniciou, em 1963, pesquisas adicionando borracha moída às misturas asfálticas com o intuito de criar um material “altamente elástico” para ser utilizado na manutenção dos pavimentos. Estas pesquisas originaram um produto denominado *band-aid*, que era bastante utilizado na selagem de trincas e, mais tarde, recebeu o nome de *asphalt-rubber* (ODA, 2000).

Alguns anos mais tarde começaram a ser publicados, pelo Highway Research Board (HRB), alguns artigos científicos exaltando as qualidades deste novo material (Shelburne,1950; Huffman;1980). Paralelamente a isto, na Suécia, surgia um processo chamado *Rubit*, que desenvolvia tecnologias para a utilização da borracha no ligante e na mistura diretamente (SPECHT, 2004).

Com o passar dos anos, várias empresas americanas foram se aperfeiçoando nas pesquisas envolvendo a utilização da borracha, agora de pneus inservíveis, nas misturas asfálticas. Conforme Way (2003), o estado do Arizona é um dos que mais se destacam no uso do AB (asfalto-borracha), possuindo mais de 28.000 km de pavimento feito com este material.

No Brasil, a utilização do asfalto-borracha só foi aprovada em 1999, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Seu estudo foi iniciado por ODA (2000) e LEITTE (1999), e sua primeira aplicação teste foi feita em rodovias de concessionárias na BR-116, no Rio Grande do Sul. Na atualidade, no país constam-se aproximadamente 9000 km de rodovias pavimentadas com o asfalto-borracha, não sendo uma tecnologia bastante utilizada até o momento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

#### **2.4.2- Processo de fabricação do asfalto-borracha**

Segundo Oda (2000), existem basicamente dois processos para a obtenção do asfalto- borracha: o processo seco e o processo úmido (podendo este ser produzido através de outros dois processos denominados *Continuous Blend* e *Terminal Blend*).

No processo úmido, a borracha moída de pneu é misturada diretamente ao CAP,

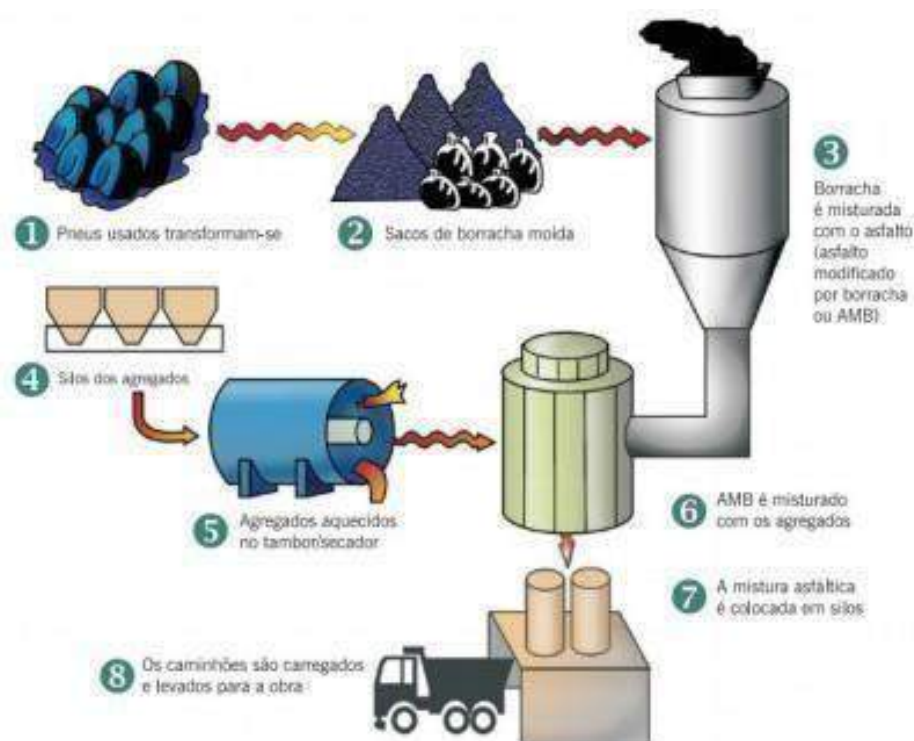
antes deste ser incorporado aos agregados, dando origem ao ligante asfalto-borracha, com características diferentes do ligante convencional, que de acordo com a ASTM D 6114/97 (1997), é definido como uma mistura de concreto asfáltico com borracha de pneus e aditivos, onde o percentual de borracha precisa ser no mínimo 15% em massa da mistura total e sofrer reação com o ligante asfáltico.

Conforme Pinto (2018), na fabricação do asfalto-borracha através do processo via úmida, o ligante deve ser aquecido a temperaturas bastante elevadas (em média 180 °C) e, em seguida, deve ser transportado para um tanque apropriado para a mistura, onde será adicionada a borracha moída ao ligante já aquecido. De modo geral, esse processo de interação entre ligante e borracha varia em um tempo de uma a quatro horas e a modificação correta do ligante depende de fatores como a temperatura de processamento, o tamanho das partículas da borracha, o tipo de ligante e a proporção de borracha adicionada ao CAP, dentre outros.

Bernucci *et al.* (2008) diz que o asfalto-borracha fabricado a partir do processo via úmida pode ser do tipo estocável (*Terminal Blend*), produzido em fábricas distribuidoras de produtos asfálticos e que são transportados para a obra de acordo com a necessidade, podendo ser estocado por longos períodos de tempo; e não estocável (*Continuous Blend*), produzido por equipamento especial na própria obra, devendo ser utilizado em um curto período de tempo para não perder sua estabilidade.

Na figura 7 é apresentado o esquema de fabricação do asfalto-borracha por via-úmida através do método estocável (*Terminal Blend*):

**Figura 7:** processo de fabricação do asfalto-borracha via úmida



Fonte: Bernucci et al. (2008).

De acordo com Pinheiro (2004), a fabricação do asfalto-borracha pelo processo seco consiste na utilização da borracha como um agregado fino (denominado agregado-borracha) na mistura asfáltica, ou seja, as partículas da borracha (geralmente de dimensões maiores que as utilizadas na via úmida) são misturadas primeiramente aos agregados pré-aquecidos e, posteriormente, ao ligante asfáltico convencional.

Entretanto, problemas como homogeneidade, ruptura prematura, dificuldade de compactação, dentre outros, têm sido um dos principais motivos de esse método não ser tão utilizado quanto o via úmida, uma vez que, caso não haja nenhuma fusão entre a borracha granulada e o ligante asfáltico, esta passa a fazer papel de aditivo na mistura, não de modificadora (PAIS *et al.*, 2004).

#### 2.4.3- Vantagens da incorporação da borracha ao CAP/MISTURA.

Zatarin *et al.* (2017) diz que, ao adicionar pó de borracha moída ao CAP, algumas das propriedades presentes na borracha serão atribuídas à mistura, fazendo com que ela adquira características superiores às das misturas convencionais. Tais características trazem algumas vantagens às misturas asfálticas, como:

- Maior flexibilidade: A alta concentração de elastômero na borracha pode melhorar a flexibilidade dos pavimentos, evitando patologias causadas pelos trilhos de roda e permitindo melhor aderência dos agregados aos ligantes;

- Resistência ao envelhecimento: a presença de oxidantes na borracha reduz o envelhecimento do pavimento por oxidação;
- Ponto de amolecimento: a adição de borracha ao ligante gera um ponto de amolecimento maior que das misturas convencionais, fazendo com que o pavimento resista mais às deformações permanentes;
- Ruído: a presença da borracha na mistura asfáltica diminui em até cinco decibéis o nível de ruídos oriundos do tráfego.



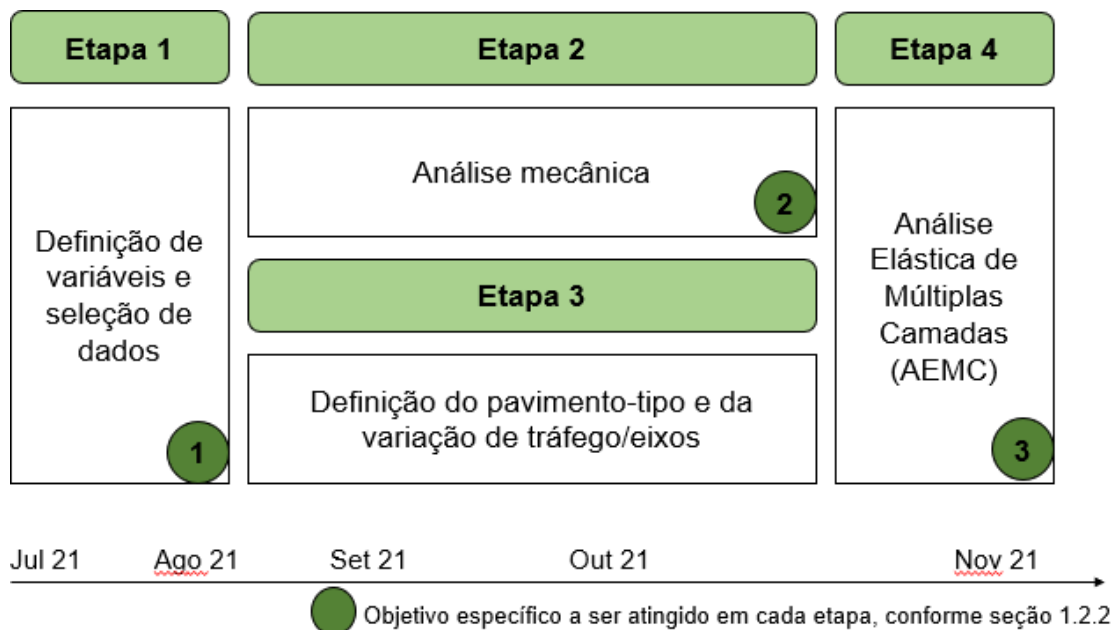
### 3- METODOLOGIA

Para desenvolvimento da pesquisa e com o intuito de atender todos os objetivos propostos no início do trabalho, a presente sessão apresentará a metodologia empregada para este fim. Posto isto, a pesquisa será dividida nas seguintes etapas:

- a. Etapa 1: Definição de variáveis e seleção de dados;
- b. Etapa 2: Análise mecânica;
- c. Etapa 3: Definição do pavimento-tipo e da variação de tráfego/eixos;
- d. Etapa 4: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC).

A figura 8 indica as etapas de desenvolvimento da pesquisa e os objetivos específicos a serem alcançados em determinadas etapas.

**Figura 8:** Etapas de desenvolvimento da pesquisa



### **3.1- Etapa 1: Definição de Variáveis e Seleção de Dados**

Na etapa 1 foram definidas as principais variáveis mecânicas que foram utilizadas para realização da análise mecânica das misturas asfálticas. A escolha dessas variáveis foi feita considerando a possibilidade de maior utilização, ou seja, foram escolhidas variáveis que são utilizadas com mais frequência na análise mecânica e dimensionamento dos pavimentos, o que implica na maior possibilidade de encontrar trabalhos que contenham todas elas.

Também foi realizada uma revisão de literatura (em artigos, pesquisas científicas, monografias, etc) em busca de trabalhos que contenham todas as variáveis definidas. A busca foi feita através dos unitermos “asfalto-borracha”, “resistência mecânica dos pavimentos”, “pavimentação”, existentes nos trabalhos encontrados.

A partir disto, a seleção de dados desta pesquisa seguiu a seguinte premissa:

- I. Leitura exploratória: nesta parte foi feita uma leitura geral dos trabalhos selecionados com o intuito de verificar se sua utilização seria pertinente ao objetivo da pesquisa. Ao final desta sessão, verificou-se que não era viável a utilização de quatro das sete obras selecionadas, portanto, foram descartadas.
- II. Leitura seletiva: nesta parte foi realizada uma leitura mais aprofundada nos três trabalhos restantes, com ênfase nos tópicos que mais interessavam à pesquisa, como os relacionados à resistência mecânica dos pavimentos e os que apresentavam os resultados dos ensaios realizados nas amostras de pavimentos.
- III. Registro das informações: nesta parte foram elaboradas planilhas, através do Google Planilhas, para retirar dos trabalhos os dados e informações que serão pertinentes utilizar na realização da análise mecânica que será feita com as amostras encontradas.

### **3.2- Etapa 2: Análise mecânica**

Na etapa 2 foi feita uma comparação, utilizando os dados encontrados na etapa 1, dos resultados obtidos a partir da análise mecânica das diferentes misturas asfálticas analisadas nos trabalhos selecionados.

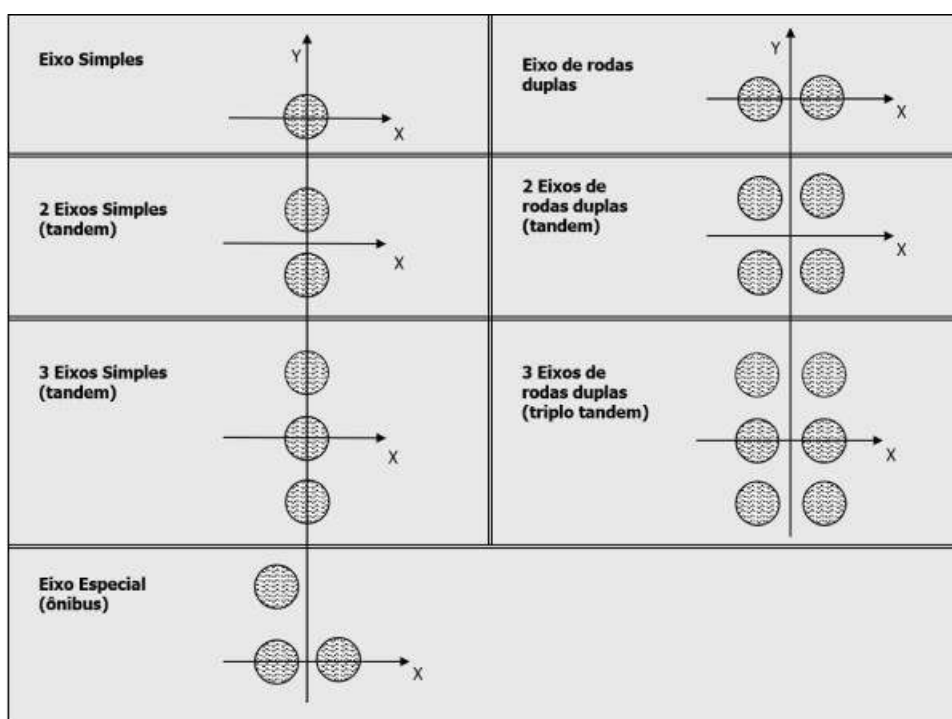
Tal análise foi feita com base no teor de borracha das amostras presentes nos trabalhos em função das variáveis definidas, a fim de verificar como a adição da borracha influencia no comportamento dessas misturas.

### 3.3- Etapa 3: Definição do pavimento tipo e da variação de tráfego/eixos;

Na etapa 3 foi feita a definição, com base nos trabalhos encontrados e nas variáveis definidas, da estrutura do pavimento tipo que foi utilizado para rodar o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC).

Após definição do pavimento tipo, foi definida a variação do tráfego (baixa, média ou alta intensidade) e a quantidade de eixos a serem trabalhados. A figura 9 apresenta os tipos de eixos que podem ser trabalhados no programa:

**Figura 9:** Lista de eixos do programa AEMC.



**Fonte:** Manual de utilização do programa MeDiNa (2020).

### 3.4- Etapa 4: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC)

A última etapa do projeto, definida como etapa 4, consistiu na execução da análise do pavimento tipo em função de todos os dados e variáveis utilizados para sua escolha. Para tal, foi realizada a Análise Elástica de Múltiplas Camadas através do programa conhecido como AEMC, vinculado ao software MeDiNa.

O AEMC calcula as tensões e deformações que a estrutura do pavimento sofre sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário, oferecendo como resultado diversas variáveis, tais como:

- X, Y: Distâncias no plano horizontal;
- Z: Profundidade;
- $U_x, U_y, U_z$ : Deslocamentos nos eixos x, y e z respectivamente;
- $S_x, S_y, S_z$ : Tensões no plano X, Y e Z respectivamente;
- $S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}$ : Tensões de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente;
- $s_1, s_2, s_3$ : Tensões principais;
- $s_{OctNor}, s_{OctCis}$ : Tensões octaédricas normal e de cisalhamento;
- $E_x, E_y, E_z$ : Deformações específicas no plano X, Y e Z respectivamente;
- $E_{xy}, E_{xz}, E_{yz}$ : Deformações específicas de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente;
- $e_1, e_2, e_3$ : Deformações específicas principais;
- $T_y, T_x$ : Distância entre eixos e entre rodas, respectivamente.

Através dessas variáveis é possível analisar diversos aspectos do comportamento mecânico do pavimento. Serão analisadas no presente trabalho as variáveis  $U_x, U_z, S_x$  e  $S_z$ .

A figura 10 a seguir representa a interface do programa que foi utilizado para análise do pavimento tipo.

Figura 10: Interface do programa AEMC.

AEMC v.2.4.1 (jan/2019) - □ ×

Projeto Ajuda

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	7,5	2,4	LINEAR	4500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	800	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
3	20,0	1,6	LINEAR	300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

Tipo de carregamento:

**Eixo padrão rodoviário**

Eixo simples

Dois eixos simples (direcional)

Eixo duplo

Dois eixos duplos

**EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO**

Número de rodas: 4

Carga de eixo (ton): 8.20

Carga de roda (ton): 2.05

Pressão de pneus (MPa): 0.56

Ty (cm): 0.00

Tx (cm): 32.40

Área (cm²): 366.07

Raio (cm): 10.79

Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						

Fonte: Manual de utilização do programa MeDiNa (2020).

## 4- RESULTADOS

### 4.1- Etapa 1: Definição de variáveis e Seleção de Dados.

A definição das variáveis mecânicas é uma etapa importante da pesquisa, uma vez que são elas que regem o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Tendo em vista isto e as premissas adotadas na metodologia, as variáveis selecionadas para esta pesquisa foram as seguintes:

- Módulo de resiliência (MR): responsável pelo comportamento resiliente das misturas asfálticas, obtida através do Ensaio de compressão diametral de cargas repetidas, normatizado pelo DNIT 135/2018.
- Resistência à tração (RT): responsável pela resistência das misturas asfálticas a ruptura, obtida através do Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, regido pela norma do DNIT 136/2018 - ME.
- *Flow Number* (FN): obtido através do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida, o *Flow Number* possibilita a avaliação da mistura asfáltica em relação à deformação permanente e é regido pela norma do DNIT 184/2018 - ME.

Após a leitura de diversos trabalhos relacionados ao tema de estudo, foram selecionadas três publicações para dar embasamento à pesquisa. Tais publicações foram escolhidas levando em conta os ensaios e as variáveis presentes em cada uma São elas:

- ➔ A dissertação do Neves Filho (2004), onde o autor se propôs a avaliar, através de ensaios laboratoriais, o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo SMA com diferentes tipos de ligante: asfalto-borracha, asfalto-polímero e asfalto convencional, dando maior destaque ao asfalto-borracha, e comparar com um concreto asfáltico convencional pelo método de granulometria contínua. Ao fim do trabalho, o autor concluiu que as misturas SMA com asfalto-borracha e com polímero apresentaram resultados muito próximos, diferentes das misturas com asfalto convencional.
- ➔ A tese do Patriota (2004), na qual o autor realizou um estudo laboratorial para analisar a viabilidade da utilização da borracha moída de pneus em misturas asfálticas a quente, produzidas através do processo seco. Para tal, foram produzidas quatro amostras de concreto asfáltico, ambas com o mesmo teor de ligante, sendo uma sem adição de borracha e as outras três com variação no teor de borracha. Por meio de ensaios laboratoriais o autor analisou o comportamento mecânico das amostras, chegando à conclusão de que as misturas com adição de borracha apresentaram menores valores de resistência à tração e módulo de

resiliência e maior vida de fadiga, o que indica uma maior flexibilidade e menor rigidez da mistura.

- A tese do Specht (2004), em que o autor realizou uma série de ensaios laboratoriais para caracterizar e verificar o desempenho de misturas asfálticas com adição de borracha realizadas pelo processo seco e úmido. Tais ensaios evidenciaram a superioridade das misturas asfálticas com adição de borracha, afirmando que a adição de 12 a 18% de borracha ao ligante produz misturas com maior durabilidade, maior resistência à fadiga e à deformações permanentes.

Em seguida, foram selecionados de cada obra alguns dados importantes para a caracterização dos materiais utilizados nas amostras, apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 1: Dados de Neves Filho (2004).

Referência	NEVES FILHO (2004)			
	Amostra	Faixa C + CAP 20	SMA + CAP 20	SMA + AB
Penetração (0,1 mm)	55	55	38	
Ductilidade a 25 °C (cm)	>140	>140	36,2	
Temperatura para mistura (°C)	151 a 156	151 a 156	167 a 171	
Temperatura para compactação (°C)	139 a 144	139 a 144	164 a 168	
Teor de ligante (%)	6,5	6,5	6,5	
Volume de vazios (%)	1,85	--	4,32	
Estabilidade (kgf)	1351	--	736	
Fluência (mm)	5,08	--	1,1	
RT média (MPa)	2,116	1,137	1,056	
MR médio (MPa)	11.770	7.308	7.275	
	MR/RT	5.562	6.429	6.890
D e f. P e r	1.000 ciclos	2,25	4,76	3,95
	10.000 ciclos	5,57	7,03	5,53
	30.000 ciclos	8,85	9,85	5,98
	Coeficiente angular	0,4029	0,1999	0,1529
Fa dig a	k	65.777	1.427	2.006
	n	4,3105	4,0026	3,2797

Tabela 2: Dados de Patriota (2004).

	Referência	PATRIOTA(2004)			
	Amostra	Referência	B1	B2	B3
	Teor de ligante CAP 50/60 (%)	6	6	6	6
	Teor de borracha (%)	0	1	2	3
	Densidade Aparente Média	2,370	2,303	2,242	2,159
	Densidade Máxima Teórica	2,475	2,449	2,416	2,388
	Volume de vazios (%)	4,2	6,0	7,2	9,6
	Estabilidade média (Kg)	1064	892	785	670
	Fluência média (mm)	3,6	4,4	5,6	7,0
	Resistência à tração média (MPa)	1,07	0,90	0,80	0,72
	Módulo de resiliência médio (MPa)	3.205	2.953	2.302	1.539
	MR/RT (MPa)	2.995	3.281	2.878	2.138
F A D I G A	k2	5076	12845	8035	5677
	n2	4,46	2,75	2,64	5,48
	R <sup>2</sup>	0,95	0,86	0,55	0,96
	k1	2.10 <sup>-15</sup>	8.10 <sup>-8</sup>	3.10 <sup>-7</sup>	8.10 <sup>-18</sup>
	n1	4,46	2,75	2,64	5,48
	R <sup>2</sup>	0,95	0,86	0,55	0,96
D	RT CP Seco (MPa)	1,02	0,88	0,73	0,64
U I	RT CP Condicionado (MPa)	0,93	0,75	0,61	0,30
	RT CP Seco/RT CP Cond. (%)	91,2	85,0	83,0	46,9
	Desgaste médio (%)	4,4	8,0	12,2	14,6

Fonte: Patriota (2004).



Tabela 3: Dados de Specht (2004).

	Referência	SPECHT (2004)			
	Amostra	CAP 20	AB 14	AB 41	AB 68
	Massa esp. aparente (KN/m <sup>3</sup> )	2,53	2,5	2,49	2,47
	Massa esp. máxima teórica (KN/m <sup>3</sup> )	2,63	2,62	2,57	2,57
	Teor de borracha (%)	0	6	12	18
	Teor de ligante (%)	4,75	5,15	5,75	6,25
	Volume de vazios (%)	4	4	4	4
	Relação Betume Vazios (%)	75	75	78	78
	Vazios do Agregado Mineral (%)	15,8	16,5	18	19
	Índice de Lameralidade	34	34	34	34
	Ductilidade (cm)	>150	43	36	32
	Retorno elástico (%)	12	19	45	55
	Perda de massa (%)	5,91	4,2	4,93	2,33
	Performance Grade (°C)	64 à -22	64 à -22	70 à -28	76 à -28
	Estabilidade (KN)	12,5	14,3	10,5	10,4
	Fluência (mm)	2,28	2,54	2,79	2,54
	Relação Est/Fluência (MN/m)	5,48	5,62	3,76	4,09
	Poisson	0,3	0,3	0,3	0,3
	Módulo de resiliência (MPa)	6510	5220	4480	4810
	Resistência à tração (MPa)	1,27	1,44	1,42	1,39
	Relação MR/RT	5126	3625	3155	3460
	Relação RT/MR x 10 <sup>-3</sup>	0,2	0,28	0,32	0,29

	Tensão de tração (MPa)	0,017	0,015	0,014	0,015
F A D I G A	Nf	4,32 x 10 <sup>6</sup>	1,85 x 10 <sup>7</sup>	1,48 x 10 <sup>7</sup>	1,25 x 10 <sup>7</sup>
	Nf/Ni	1	4,2	3,4	2,9
	Deformação de tração (cm/cm)	0,00017	0,00019	0,00021	0,0002
	Nf	247	199	149	251
	Nf/Ni	1	0,8	0,6	1

	<b>Deformação plástica (%)</b>	6,9	5,06	5,17	3,06
<b>D U I</b>	<b>RT s/ condicionamento (MPa)</b>	0,63	0,78	0,73	0,78
	<b>RT c/ condicionamento (MPa)</b>	0,47	0,58	0,66	0,65
	<b>RRT (%)</b>	75	74	90	83

Fonte: Specht (2004).

Tendo como objetivo realizar a análise mecânica das diferentes misturas encontradas e comparar os trabalhos através dos resultados obtidos no AEMC, foram elegidos para tal comparação apenas as publicações do Patriota (2004) e do Specht (2004). Tal escolha se deu pelo fato de ambos apresentarem maior similaridade na realização das amostras, obtendo uma amostra com ligante convencional e três com ligante modificado cada, diferente do Neves Filho (2004) que confeccionou duas amostras com ligante convencional, uma do tipo Faixa C e outra do tipo SMA, e apenas uma com asfalto-borracha.

#### 4.2- Etapa 2: Análise mecânica

A análise mecânica de uma mistura asfáltica é realizada com o intuito de analisar o comportamento que esta apresentará diante das possíveis solicitações que sofrerá. Tal análise é feita através de ensaios laboratoriais que simulam as tensões que a mistura sofrerá quando empregada no revestimento de uma estrutura de pavimento. A partir destes ensaios são obtidas diversas variáveis importantes para a análise do comportamento mecânico da mistura e, como definidas anteriormente, as principais variáveis utilizadas na pesquisa são apresentadas na tabela 4.

**Tabela 4:** Variáveis retiradas dos trabalhos.

<b>REFERÊNCIA</b>	<b>AMOSTRA</b>	<b>TEOR DE BORRACHA(%)</b>	<b>FN</b>	<b>RT (Mpa)</b>	<b>MR (Mpa)</b>
NEVES FILHO (2004)	Faixa C + CAP 20	0	-	2,116	11770
NEVES FILHO (2004)	SMA + CAP 20	6	-	1,137	7308
NEVES FILHO (2004)	SMA + AB	18	-	1,056	7275
PATRIOTA (2004)	Referência	0	-	1,07	3205
PATRIOTA (2004)	B1	1	-	0,9	2953
PATRIOTA (2004)	B2	2	-	0,8	2303
PATRIOTA (2004)	B3	3	-	0,72	1539

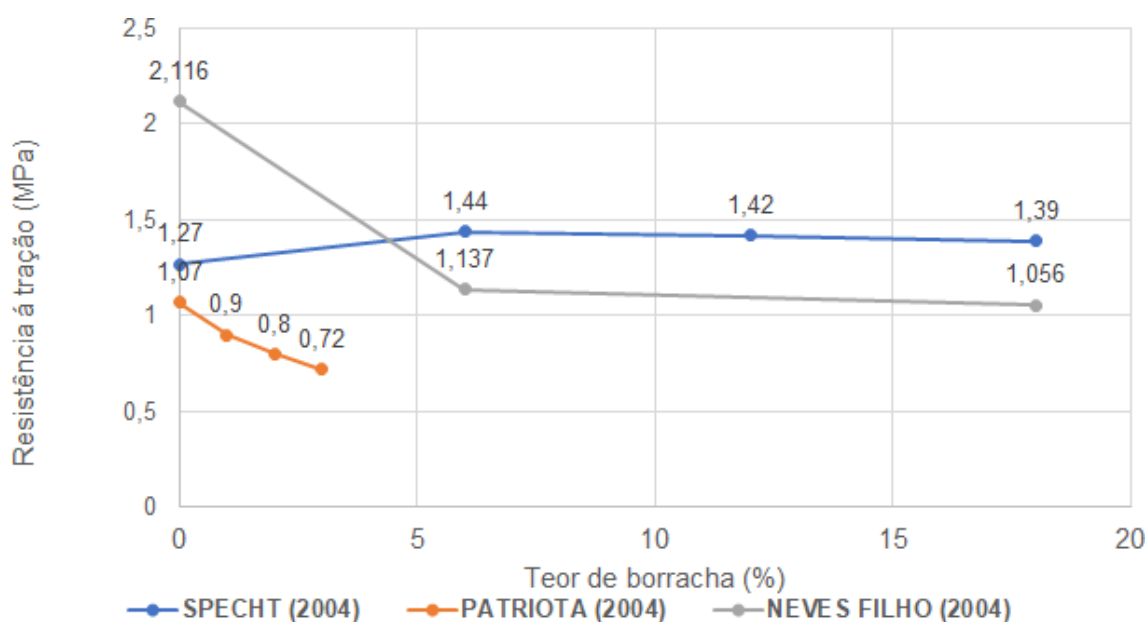
SPECHT (2004)	CAP 20	0	-	1,27	6510
SPECHT (2004)	AB 14	6	-	1,44	5220
SPECHT (2004)	AB 41	12	-	1,42	4480
SPECHT (2004)	AB 68	18	-	1,39	4810

Fonte: Neves Filho (2004); Patriota (2004); Specht (2004).

O *Flow Number* foi uma das variáveis definidas para esta análise, entretanto nenhum dos trabalhos selecionados apresentou essa variável, não sendo possível sua comparação a partir desse parâmetro. Tal ausência pode ser explicada pelo fato de que o ensaio para obter essa variável é novo, a norma NORMA DNIT 184 foi aprovada em 2018, e trata-se de um ensaio mais complexo, que exige equipamentos mais caros e mão de obra qualificada. Por essa razão, talvez, os autores optaram pela não realização desse ensaio.

A partir então do recolhimento dessas variáveis dos trabalhos, foi possível analisar o comportamento das misturas com relação ao Módulo de Resiliência (principal responsável pelo comportamento resiliente das misturas e pelo surgimento de trilhas de roda e trincamentos) e à Resistência à Tração (responsável pelo surgimento de trincas nos pavimentos) em função dos diferentes teores de borracha presentes nas misturas. A figura 11 apresenta a relação entre a Resistência à Tração e o teor de borracha das misturas analisadas:

Figura 11: Resistência à tração x teor de borracha.



Fonte: Dos autores (2021).

Pode-se observar pela análise do gráfico que os valores de resistência à tração das amostras de Neves Filho (2004) e Patriota (2004) diminuíram significativamente à medida

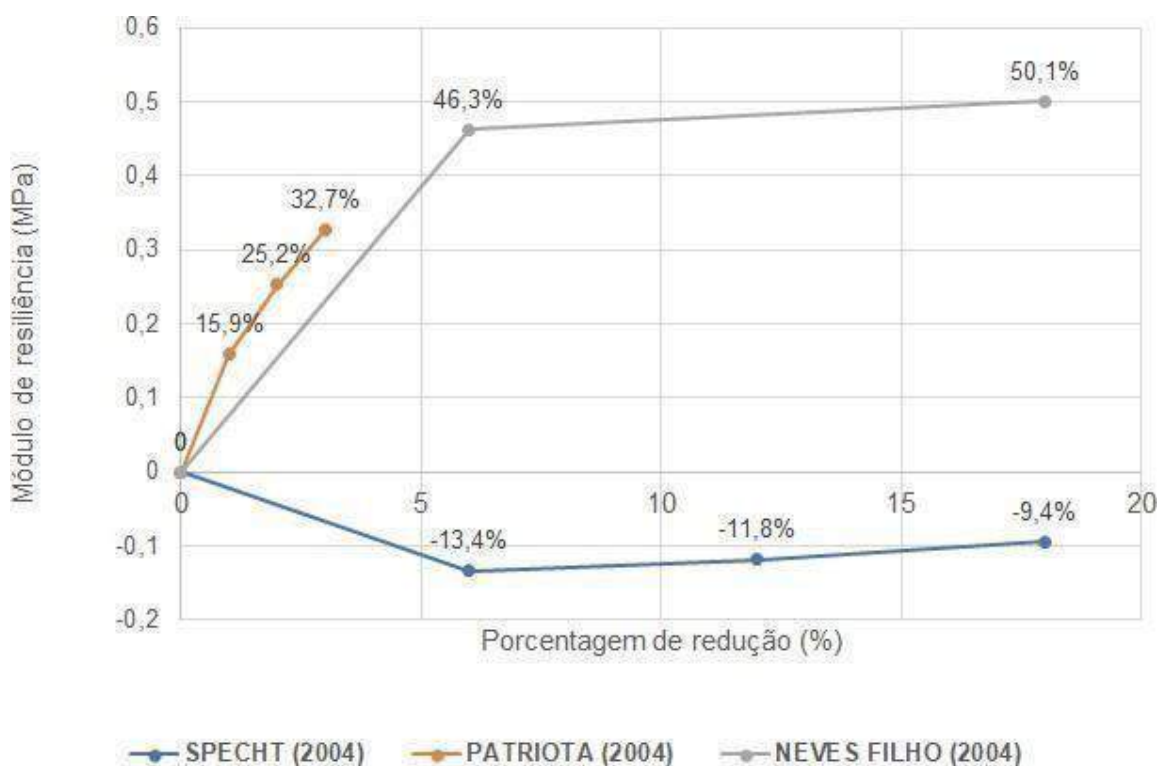
que a borracha foi incorporada à mistura, sendo essa diminuição mais evidente nas amostras com maior teor de borracha. Patriota (2004) apontou que a redução da RT indica que a capacidade estrutural do material diminuiu devido à adição de borracha. Já as amostras do Specht (2004) apresentaram um diferencial, pois houve um aumento da resistência à tração com a adição de borracha. Segundo Specht (2004), as misturas com incorporação de borracha apresentaram um acréscimo de RT de 12%, apresentando um comportamento oposto ao MR. Comparado com o RT, o MR foi reduzido em média 25%. Isso, por sua vez, alude a misturas com maior capacidade de distribuir tensões e maior resistência.

Ainda segundo Specht (2004), o comportamento adverso apresentado pela RT quando comparado com o MR tem relação com a estrutura utilizada, mais precisamente com o volume de vazios, o que torna as misturas com borracha superiores às convencionais, conferindo a elas maior poder cimentante do ligante modificado.

E, mais uma vez, nota-se que as misturas sem adição de borracha se mostraram superiores.

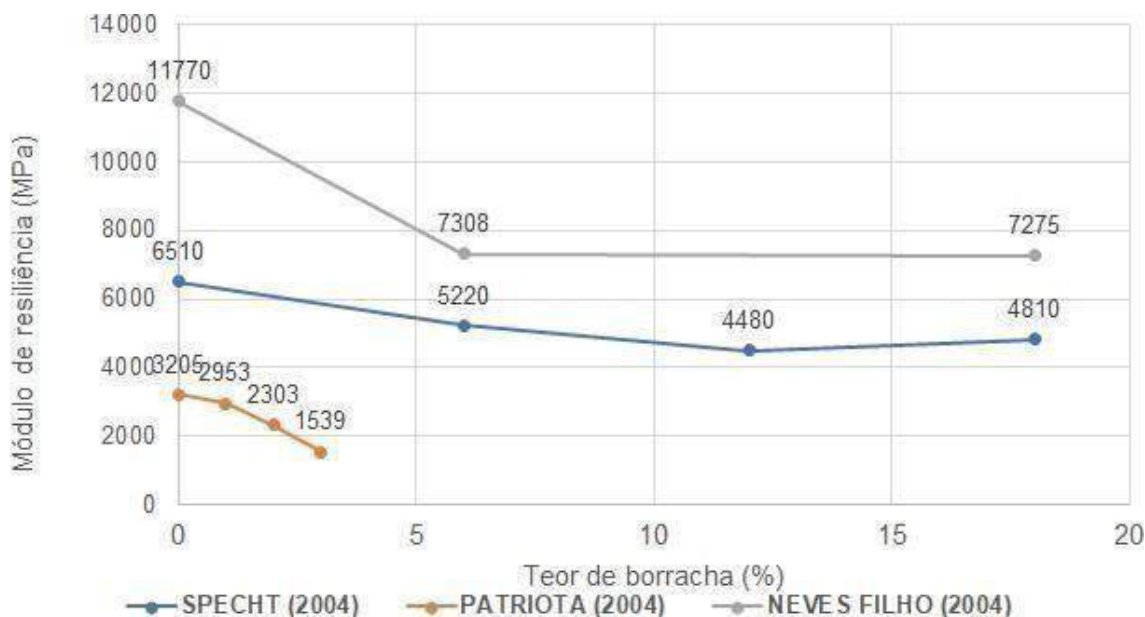
A figura 12 apresenta a porcentagem de redução que a Resistência à Tração apresentou em função do teor de borracha, discutidas anteriormente. Destaca-se a redução drástica de Patriota (2004), pois para a incorporação de apenas 3% de teor de borracha, houve um decréscimo de 32,7%, enquanto que para Neves Filho (2004) houve uma redução de 50,1% para 18% de incorporação de teor de borracha.

**Figura 12:** Resistência à tração x porcentagem de redução.



Outra propriedade que foi possível analisar a partir das variáveis foi o Módulo de Resiliência das misturas, apresentada na figura 13 abaixo:

**Figura 13:** Módulo de resiliência x teor de borracha.



**Fonte:** Dos autores (2021).

A partir da análise deste gráfico é possível observar que houve uma redução significativa do MR das misturas sem teor de borracha para as com adição de borracha, principalmente no trabalho do Neves Filho (2004), onde houve uma queda mais acentuada, totalizando 37,9% do total com a adição de apenas 6% de borracha. Da mistura com 6% de borracha para a com 18% houve uma queda inexpressiva de 0,3%, o que indica que a adição de borracha não alterou quase nada seu comportamento resiliente após o teor de 6% de borracha.

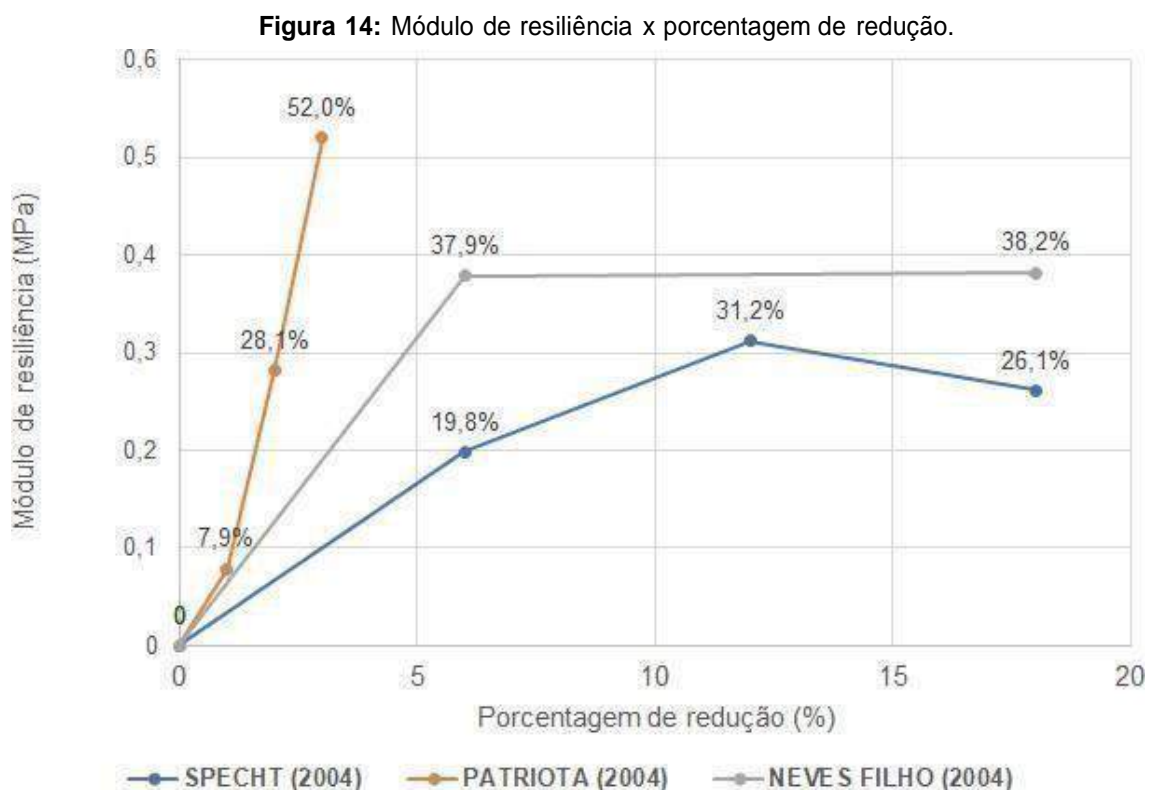
Dá para perceber, pela análise do gráfico, que há duas zonas: uma zona de queda do MR e uma zona constante que independe do teor de borracha, como analisados nas amostras do Specht (2004) e do Neves Filho (2004), onde há uma queda e em seguida um comportamento linear que varia pouco com a adição de borracha.

As amostras do Patriota (2004), entretanto, trabalharam com teores menores de adição de borracha, e portanto se encontram ainda na zona de queda do MR, não sendo possível afirmar se a adição de valores maiores de borracha o conduziram a essa zona constante.

Nota-se que as amostras utilizadas pelo Neves Filho (2004) e pelo Specht (2004) obtiveram resultados superiores às do Patriota (2004), podendo ser observado na diferença na altura das linhas do gráfico. Tal fato pode ser explicado pelos materiais utilizados, uma vez que o desempenho do ligante CAP 20 utilizado por ambos é superior ao ligante CAP 50/60 utilizado pelo Patriota (2004), pois é um material mais resistente e

consequentemente resulta em módulos de resiliência maiores.

Outro fato interessante é que a adição de borracha à mistura diminuiu seu MR em ambos os trabalhos, porém o que apresentou a maior queda com o menor percentual de borracha foi a do Patriota (2004). A figura 14 apresenta a redução que o Módulo de Resiliência das misturas sofreu em função do teor de borracha.



Fonte: Dos autores (2021).

#### 4.3- Etapa 3: Definição do pavimento tipo e da variação de tráfego/eixos;

Para realizar a Análise Elástica de Múltiplas Camadas é imprescindível, antes de tudo, a realização do dimensionamento da estrutura do pavimento. Tal dimensionamento está relacionado à definição das camadas que a estrutura terá e dos materiais que serão utilizados em cada uma delas.

Os insumos utilizados nas camadas abaixo do revestimento possuem grande influência no comportamento mecânico da estrutura do pavimento, porém, como o foco da pesquisa encontra-se na camada de rolamento, foi definido um mesmo cenário hipotético para todos os pavimentos-tipo criados, a fim de que ao serem realizadas as comparações, as mudanças ocorridas no comportamento da estrutura limitem-se somente à camada de revestimento. Tendo em vista isto, os materiais utilizados nas camadas adjacentes ao revestimento foram retirados do banco de dados do próprio programa MeDiNa, pois são dados que foram bastante estudados para aplicações teste como essa,

sendo assim confiáveis.

Dado que o intuito do trabalho é comparar o desempenho mecânico das diferentes misturas asfálticas, foram definidos seis pavimentos-tipo, dos quais apenas os materiais da camada de rolamento mudam. As misturas utilizadas na camada de revestimento foram retiradas das amostras dos dois trabalhos selecionados. Dentre as amostras apresentadas pelos autores, foram escolhidas três de cada trabalho: uma sem adição de borracha e duas com adição de borracha (a que apresentou melhor desempenho e a de desempenho inferior). A tabela 5 apresenta os pavimentos-tipo definidos e os materiais a serem utilizados em cada camada.

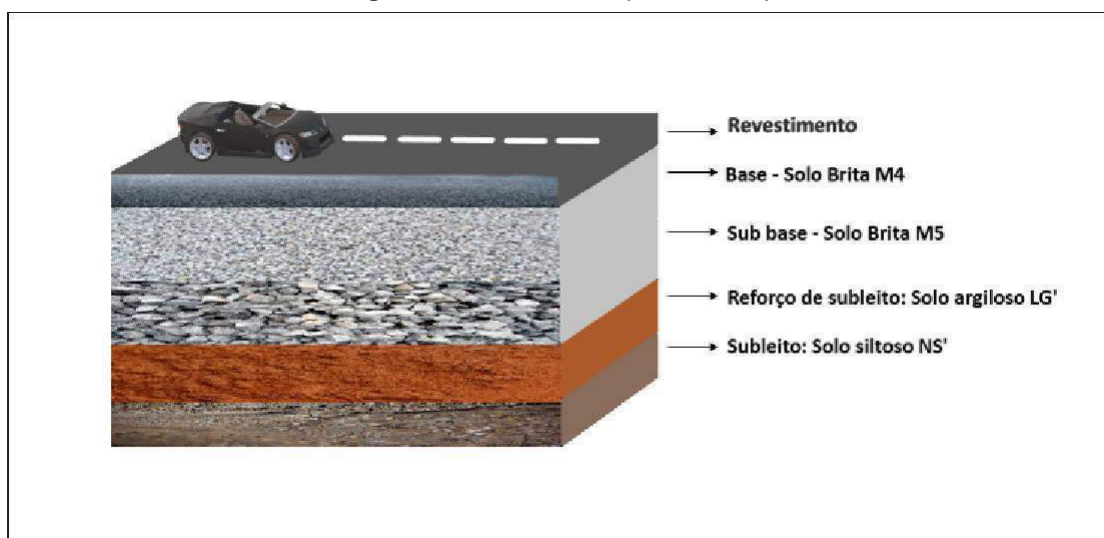
**Tabela 5:** Materiais utilizados no pavimento-tipo

<b>Pavimento</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Base</b>	<b>Sub base</b>	<b>Reforço do subleito</b>	<b>Subleito</b>
<b>1</b>	CAP 20 (SPECHT, 2004)	SOLO BRITA M4 (MEDINA, 2021)	SOLO BRITAM5 (MEDINA, 2021)	Solo Argiloso LG' (MEDINA, 2021)	Solo Siltoso NS' (MEDINA, 2021)
<b>2</b>	AB 14 (SPECHT, 2004)	SOLO BRITA M4 (MEDINA, 2021)	SOLO BRITAM5 (MEDINA, 2021)	Solo Argiloso LG' (MEDINA, 2021)	Solo Siltoso NS' (MEDINA, 2021)
<b>3</b>	AB 68 (SPECHT, 2004)	SOLO BRITA M4 (MEDINA, 2021)	SOLO BRITAM5 (MEDINA, 2021)	Solo Argiloso LG' (MEDINA, 2021)	Solo Siltoso NS' (MEDINA, 2021)
<b>4</b>	REF (PATRIOTA, 2004)	SOLO BRITA M4 (MEDINA, 2021)	SOLO BRITAM5 (MEDINA, 2021)	Solo Argiloso LG' (MEDINA, 2021)	Solo Siltoso NS' (MEDINA, 2021)
<b>5</b>	B1 (PATRIOTA, 2004)	SOLO BRITA M4 (MEDINA, 2021)	SOLO BRITAM5 (MEDINA, 2021)	Solo Argiloso LG' (MEDINA, 2021)	Solo Siltoso NS' (MEDINA, 2021)
<b>6</b>	B3 (PATRIOTA, 2004)	SOLO BRITA M4 (MEDINA, 2021)	SOLO BRITAM5 (MEDINA, 2021)	Solo Argiloso LG' (MEDINA, 2021)	Solo Siltoso NS' (MEDINA, 2021)

**Fonte:** MEDINA (2021).

A figura 15 abaixo apresenta a estrutura do pavimento-tipo definido.

**Figura 15:** Estrutura do pavimento-tipo



**Fonte:** Dos autores (2021).

A análise mecânica da estrutura de um pavimento leva em conta diversos fatores, dentre eles: o volume de tráfego que essa estrutura suportará e o número de eixos que passarão sobre ela. Esses, por sua vez, possuem grande influência no processo de deterioração de uma via, posto que o mau dimensionamento dessas em virtude do volume de tráfego e do número de eixos causará o surgimento de patologias precocemente.

Além do mais, a definição do volume de tráfego e do número de eixos também são de suma importância para realização do dimensionamento do pavimento e conseqüentemente para a Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Tendo em vista isso, foi utilizado neste trabalho o tráfego real de uma rodovia Goiana, a GO-070, classificada como sistema arterial principal, que servirá para a realização da análise da viabilidade da aplicação de tais revestimentos em rodovias de alto volume de tráfego. A tabela 6 apresenta os dados reais de tráfego da GO-070.

**Tabela 6:** Dados do tráfego da GO-070

<b>DADOS DO TRÁFEGO</b>	
<b>Tipo de via</b>	Sistema Arterial Principal
<b>Volume Médio Diário (1º ano)</b>	1992
<b>Fator de Veículo (FV)</b>	13
<b>Número de passagens anual (1º ano)</b>	9,22E+06
<b>% veículos na faixa de projeto</b>	100
<b>N anual da faixa (1º ano)</b>	9,22E+06
<b>Taxa de crescimento (%)</b>	1,5
<b>Período de projeto (anos)</b>	10
<b>Número de passagens total</b>	9,87E+07

**Fonte:** AGETOP



O fator de veículos foi calculado com os seguintes eixos, definidos na tabela 7.

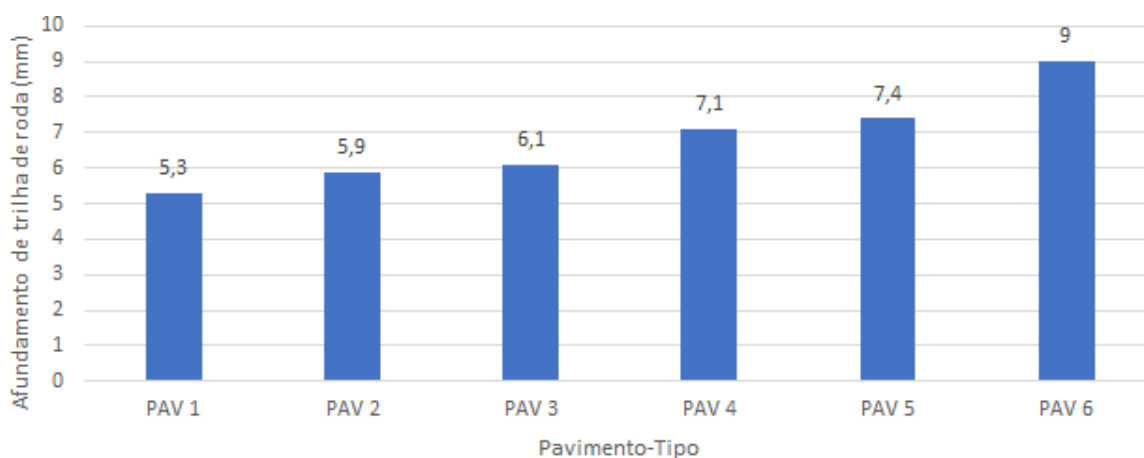
**Tabela 7:** Números de eixos

Eixo	Configuração	Rodas	Fator de eixo (%)	Carga (ton)	Fator de carga	Fator de veículo
1	Eixo simples	2	100	6,0	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	4	49,3	10,0	3,289	1,622
3	Dois eixos duplos em tandem	8	117	17,0	8,549	10,002
4	Três eixos duplos em tandem	12	13,4	25,5	9,300	1,246

Fonte: MEDINA 2021.

Após a definição do pavimento tipo, do volume de tráfego e do número de eixos que serão utilizados, foi possível realizar a análise dessa estrutura com relação ao trincamento e ao afundamento de trilha de roda que ela apresentará ao longo de sua vida útil. Os relatórios completos das análises realizadas no MEDINA encontram-se nos apêndices A, B, C, D, E, F para os pavimentos-tipo 1 a 6, respectivamente. A figura 16 apresenta os dados da análise de afundamento de trilha de roda realizada pelo programa MeDiNa:

**Figura 16:** Afundamento de trilha de roda do pavimento tipo.



Fonte: Dos autores (2021).

Nota-se, a partir deste gráfico, que todos os pavimentos apresentaram valores de afundamento abaixo do permitido por norma para esse tipo de via, que seria 10 mm, apresentando comportamento razoável no quesito afundamento.

Outro fator importante de ser destacado é que as misturas sem adição de borracha (PAV1; PAV4), dentre as três amostras escolhidas de cada trabalho, apresentaram valores de afundamento menores, o que não era totalmente esperado, uma vez que a borracha é

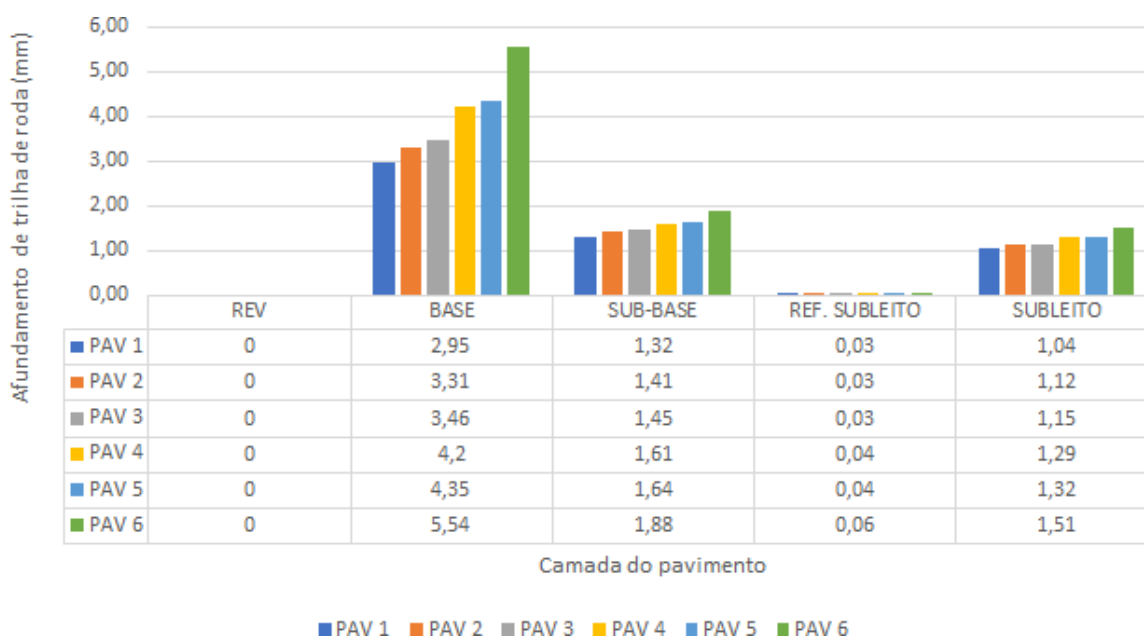
um material composto por uma grande quantidade de elastômeros e possui propriedades resilientes, esperava-se que, ao serem adicionadas ao ligante, parte dessas propriedades fossem transferidas, conferindo às misturas melhor performance com relação ao afundamento de trilha de roda.

Isso, se levasse em consideração estruturas reais de pavimento, poderia ter relação com os materiais das camadas adjacentes ao revestimento, dado que o afundamento está diretamente ligado a essas camadas, e não ao revestimento. Porém, como trata-se de um cenário hipotético com estruturas onde apenas o material da camada de rolamento mudou, tal responsabilidade foi atribuída aos materiais utilizados nessas camadas.

Observa-se, ao fazer uma correlação entre o módulo de resiliência e o afundamento de trilha de roda, que existe uma relação inversamente proporcional entre ambos, pois à medida que o MR diminui, o afundamento de trilha de roda aumenta.

A figura 17 apresenta de forma mais detalhada este afundamento, apresentando-o para cada camada:

**Figura 17:** Detalhamento do afundamento de trilha de roda.



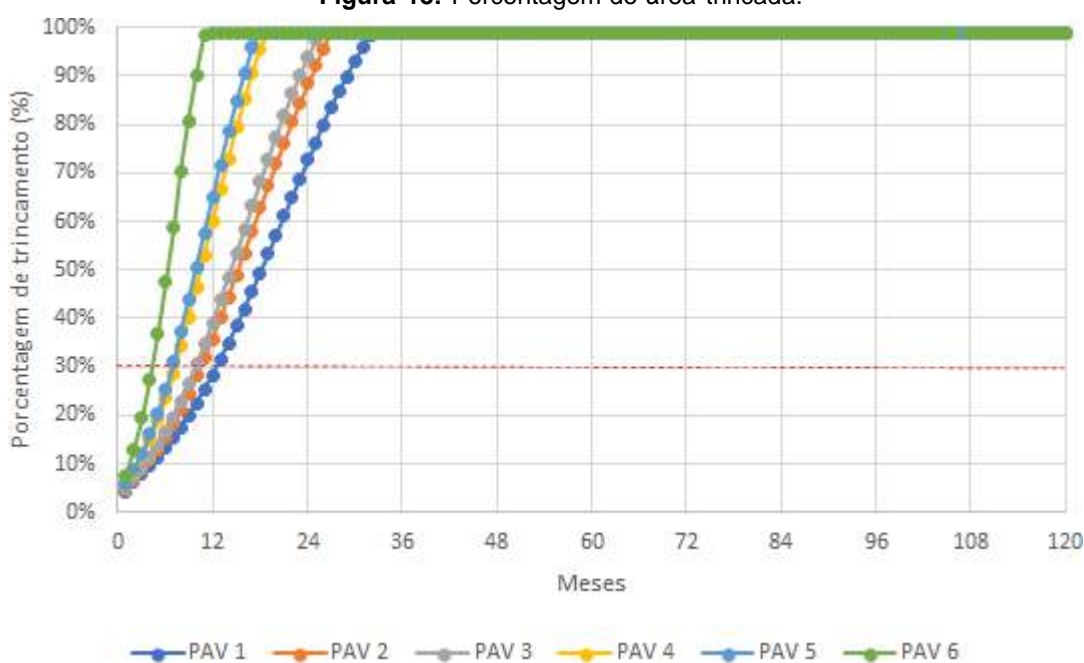
**Fonte:** Dos autores (2021).

A função principal da estrutura de um pavimento é suportar as ações e tensões oriundas do tráfego e, a partir da análise do gráfico acima, observa-se que a camada que mais sofreu afundamento em virtude destas ações foi a base. A adição de borracha aos pavimentos-tipo reduziu seu MR, diminuindo a resistência aos efeitos do tráfego e, conseqüentemente, permitindo a passagem de maiores tensões de carga para as camadas adjacentes, principalmente para a base, que é a principal responsável por absorver essas tensões, caso o revestimento não o faça.

Nota-se também que a camada de reforço de subleito não sofreu quase nenhum afundamento, o que remete à falta de necessidade e ao superdimensionamento dessa camada, o que poderia levar a gastos excessivos sem necessidade.

Foi realizada também a análise da estrutura com relação à porcentagem de área trincada que ela apresentou ao longo de sua vida útil, apresentada na figura 18.

**Figura 18:** Porcentagem de área trincada.



Por meio desse gráfico é possível afirmar que todos os pavimentos apresentaram trincamento precoce, ou seja, tiveram 100% de sua área trincada em menos de 30% de sua vida útil e, novamente, os que atingiram essa marca primeiro foram os com adição de borracha, como apresentado na tabela 8.

**Tabela 8:** Porcentagem área trincada x tempo (meses).

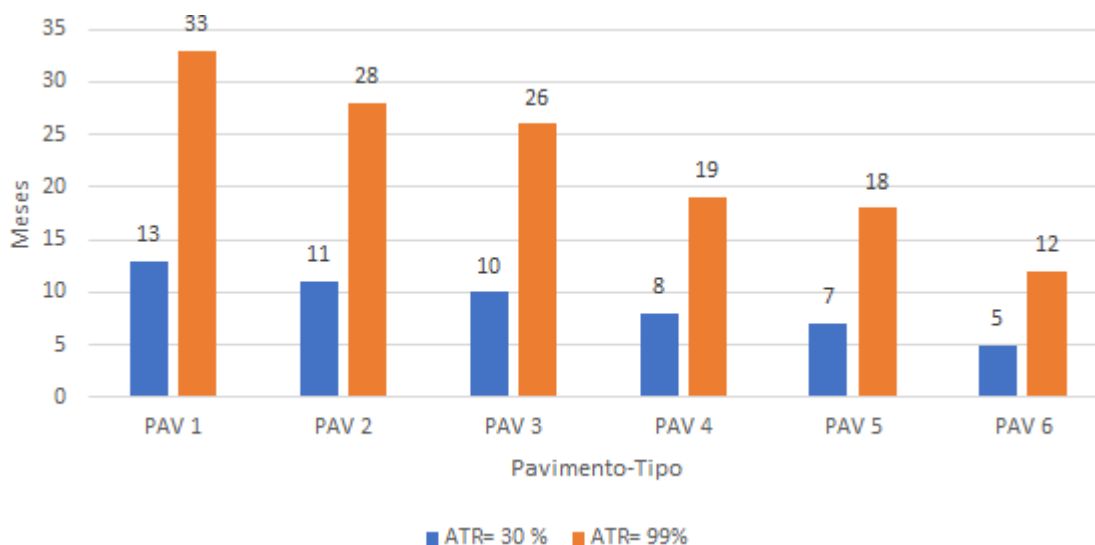
REFERÊNCIA	PAV 1	PAV 2	PAV 3	PAV 4	PAV 5	PAV 6
30%	13	11	10	8	7	5
99%	33	28	26	19	18	12

Fonte: Dos autores (2021).

A tabela 8 apresenta o tempo em que os pavimentos atingiram 30% e 99% de área trincada, parâmetros utilizados para verificar o desempenho da estrutura. Nota-se que ambos, com exceção do pavimento 1, apresentaram 30% de área trincada em menos de um ano e 99% em menos de dois anos e meio, ou seja, nenhuma das misturas apresentou bom desempenho com relação ao trincamento. Portanto, verifica-se que as estruturas não estão adequadas ao tráfego imposto a elas.

A figura 19 ilustra, por meio de um gráfico, essa relação entre a porcentagem de área trincada e o tempo em que ocorreu, destacando que, dentre os seis pavimentos, o que apresentou melhor desempenho foi o pavimento 1 e o com pior desempenho o pavimento 6.

**Figura 19:** Porcentagem área trincada x tempo (meses).



Fonte: Dos autores (2021).

A tabela 9 apresenta a redução da vida útil dos pavimentos. Com base nessa tabela é possível analisar a redução da vida útil que os pavimentos apresentaram. Levando em consideração o tempo de vida útil utilizado nesse trabalho para o dimensionamento dos pavimentos (10 anos), o pavimento 1, sem adição de borracha, apresentou somente 11% de vida útil. Ao adicionar 6% de borracha ao pavimento 2, houve uma redução de 18% em sua vida útil e, adicionando 18% de borracha ao pavimento 3, a redução foi ainda maior, chegando a 30%.

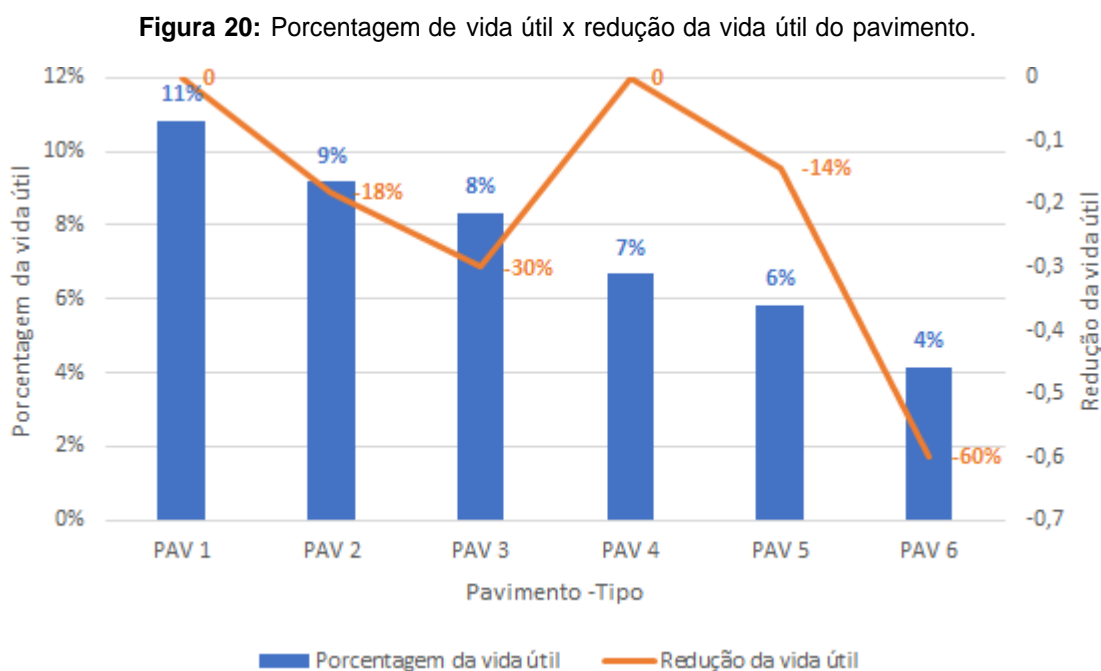
**Tabela 9:** Redução da vida útil do pavimento.

	PAV1	PAV2	PAV3	PAV4	PAV5	PAV6
Porcentagem da vida útil (%)	11	9	8	7	6	4
Redução da vida útil (%)	-	-18	-30	-	-14	-60

Fonte: Dos autores (2021).

O pavimento 4, sem adição de borracha, apresentou apenas 7% de vida útil e, ao ser adicionado apenas 1% de borracha ao pavimento 5, houve uma redução de 14% em sua vida útil. E, pior, adicionando 3% de borracha ao pavimento 6, a vida útil do pavimento caiu mais da metade, chegando a 60%, apresentando este apenas 4% de vida útil total. Por

meio dessas análises é possível afirmar que a adição de borracha às misturas favoreceu ainda mais a redução da vida útil dos pavimentos. A figura 20 apresenta a relação entre a porcentagem de vida útil e a redução que os pavimentos sofreram.



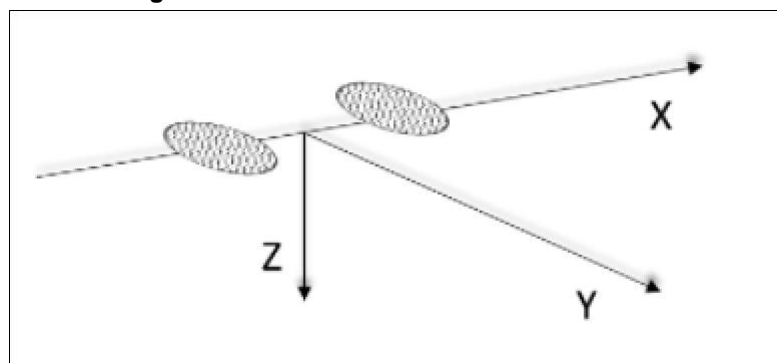
Fonte: Dos autores (2021).

#### 4.4- Etapa 4: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC).

O software AEMC calcula, levando em conta o mesmo esforço exercido pelo eixo rodoviário padrão, as tensões e deformações que a estrutura do pavimento sofre quando submetida a esse carregamento. Através desse cálculo, são oferecidas pelo programa diversas variáveis, sendo possível analisar diversos aspectos do comportamento da estrutura.

Como definido na metodologia, foi realizada a análise dos deslocamentos nos eixos X e Z ( $U_x$  e  $U_z$ ) e as tensões nos planos X e Z ( $S_x$  e  $S_z$ ) para avaliar o comportamento dos pavimentos-tipo. O sistema de eixos utilizado pelo programa é apresentado pela figura 21.

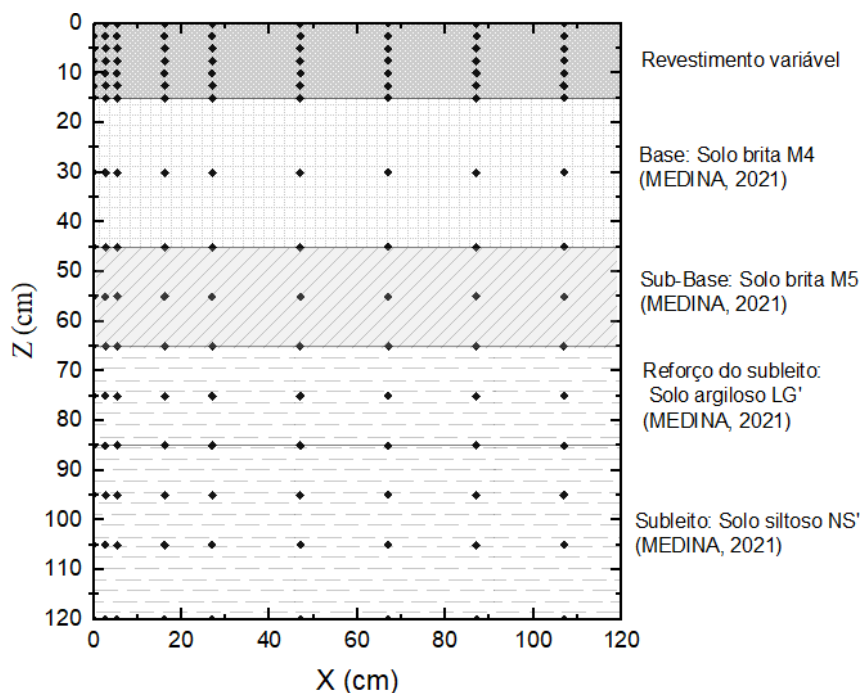
**Figura 21:** Sistemas de coordenadas do AEMC.



Fonte: AEMC (2021).

A figura 22 apresenta o *grid* de pontos analisados para os seis pavimentos-tipo. Considerando a profundidade ( $z$ ), foram determinados pontos na superfície, no centro e na interface de cada camada abaixo do revestimento. Como o foco principal é o revestimento, os pontos desta camada foram determinados a cada 2,5 centímetros, a fim de que o comportamento nesta camada fosse o mais detalhado possível. Os pontos perpendiculares ao rolamento, no eixo ( $x$ ), são determinados em função do tipo de eixo rodoviário, estando o centro do carregamento situado em ( $x=0$ ).

**Figura 22:** *Grid* de pontos analisados para os seis pavimentos-tipo.



Fonte: Dos autores (2021).

A tabela 10 apresenta os valores obtidos no programa para as variáveis selecionadas. Tais valores referem-se somente à camada de revestimento de cada pavimento-tipo nas zonas de interface e meio dessa camada, a fim de possibilitar uma futura diferenciação numérica na análise dos gráficos dos comportamentos de cada estrutura, uma vez que o fator relevante de estudo encontra-se nessa camada.

**Tabela 10:** Dados do AEMC para análise do comportamento dos pavimentos-tipo.

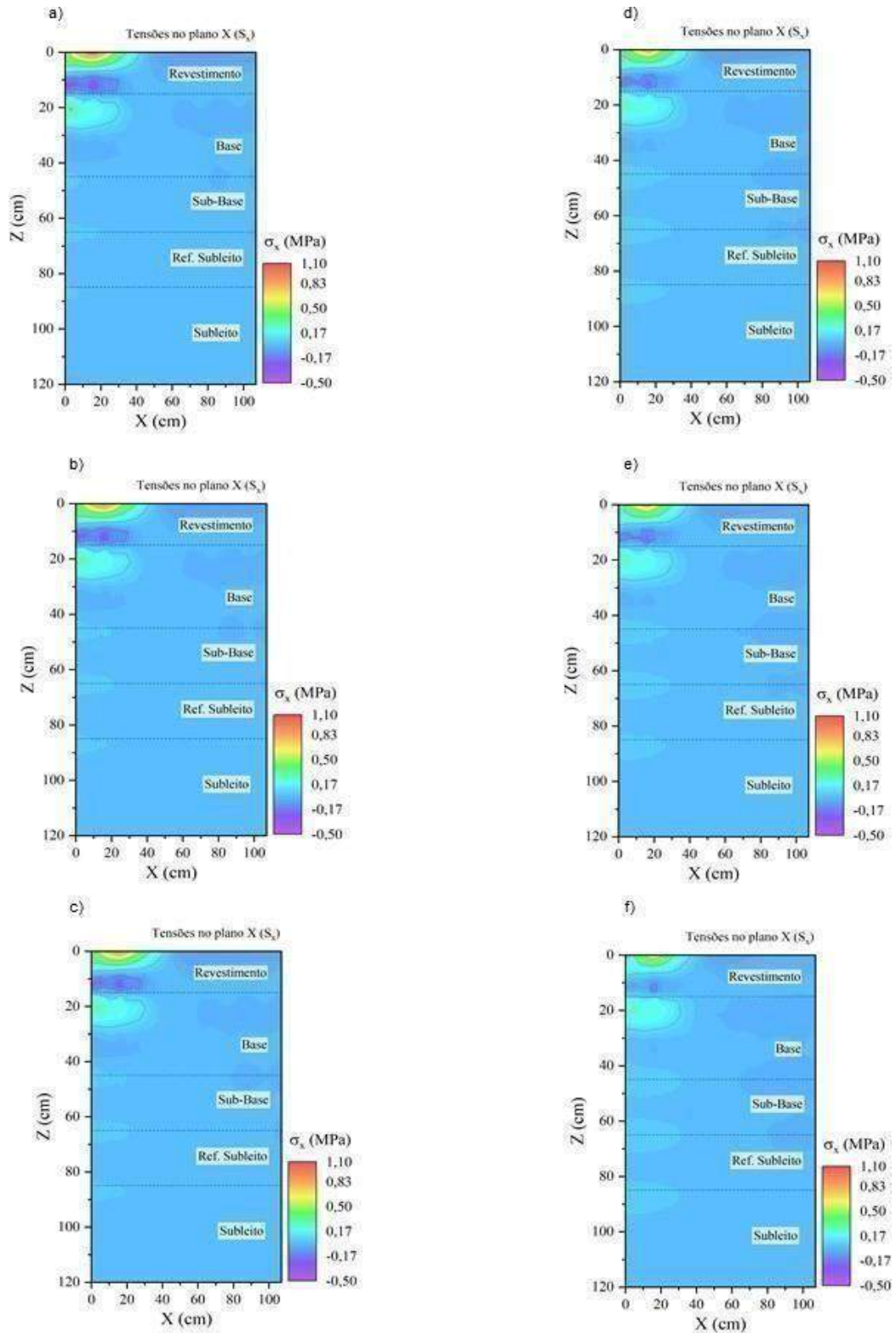
Pavimento	Z (cm)	SX (Mpa)	SZ (Mpa)	UX ( $\mu\text{m}$ )	UZ ( $\mu\text{m}$ )	Ex (m/m)	Ez (m/m)
<b>Pav. 1</b>	0	1,028	0,560	-9,566	240,782	7,70E-05	-1,70E-05
	2,5	0,634	0,536	-6,069	240,706	3,90E-05	1,90E-05
	5	0,307	0,460	-2,755	239,936	1,00E-05	4,00E-05
<b>Pav. 2</b>	0	0,963	0,560	-10,525	254,587	8,80E-05	-1,30E-05
	2,5	0,592	0,537	-6,645	254,325	4,30E-05	2,90E-05
	5	0,287	0,463	-2,969	253,257	9,00E-06	5,30E-05
<b>Pav. 3</b>	0	0,940	0,560	-10,879	259,806	9,20E-05	-1,10E-05
	2,5	0,577	0,537	-6,854	259,457	4,50E-05	3,40E-05
	5	0,279	0,464	-3,042	258,256	9,00E-06	5,90E-05
<b>Pav. 4</b>	0	0,831	0,560	-12,560	286,686	1,16E-04	7,00E-06
	2,5	0,507	0,539	-7,814	285,699	5,30E-05	6,60E-05
	5	0,245	0,471	-3,317	283,597	7,00E-06	9,80E-05
<b>Pav. 5</b>	0	0,810	0,560	-12,874	292,338	1,22E-04	1,20E-05
	2,5	0,494	0,540	-7,984	291,172	5,40E-05	7,50E-05
	5	0,239	0,472	-3,348	288,827	6,00E-06	1,08E-04
<b>Pav. 6</b>	0	0,665	0,560	-14,788	341,559	1,75E-04	8,70E-05
	2,5	0,401	0,543	-8,827	338,014	6,60E-05	1,86E-04
	5	0,195	0,484	-3,142	332,642	-9,00E-06	2,35E-04

Fonte: Dos autores (2021).

As figuras 23, 24, 25 e 26 abaixo apresentam os perfis dos pavimentos-tipo para a análise das tensões e deformações nos planos x e z.

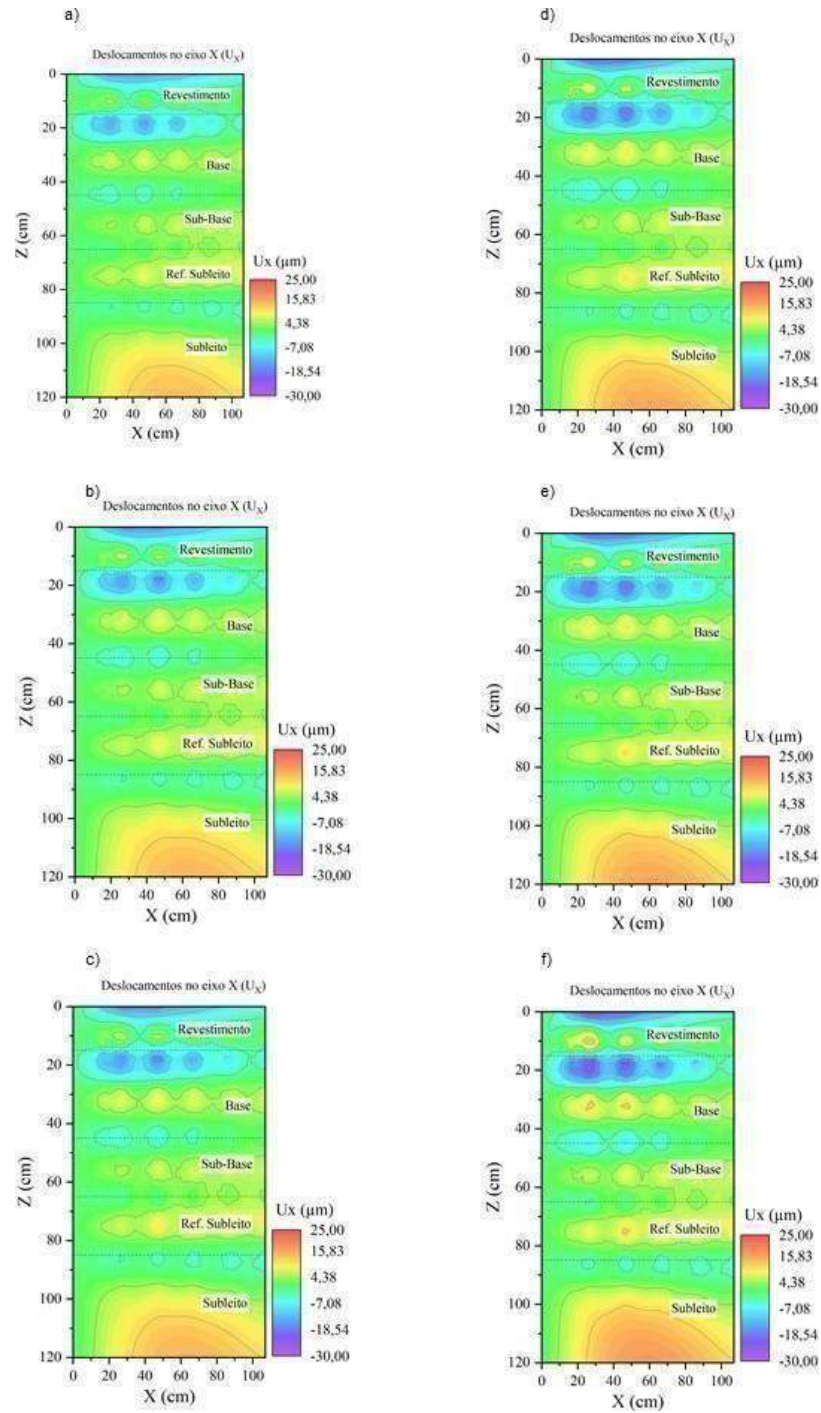
**Figura 23:** Tensões no plano X ( $S_x$ ).





Legenda: (a) Pavimento 1: SPECHT- 0% de borracha; (b) Pavimento 2: SPECHT- 6% de borracha; (c) Pavimento 3: SPECHT- 18% de borracha; (d) Pavimento 4: PATRIOTA- 0% de borracha; (e) Pavimento 5: PATRIOTA- 1% de borracha; (f) Pavimento 6: PATRIOTA- 3% de borracha.

Figura 24: Deslocamentos no eixo X ( $U_x$ ).



Legenda: (a) Pavimento 1: SPECHT- 0% de borracha; (b) Pavimento 2: SPECHT- 6% de borracha; (c) Pavimento 3: SPECHT- 18% de borracha; (d) Pavimento 4: PATRIOTA- 0% de borracha; (e) Pavimento 5: PATRIOTA- 1% de borracha; (f) Pavimento 6: PATRIOTA- 3% de borracha.

**Figura 25:** Tensões no plano Z ( $S_z$ ).

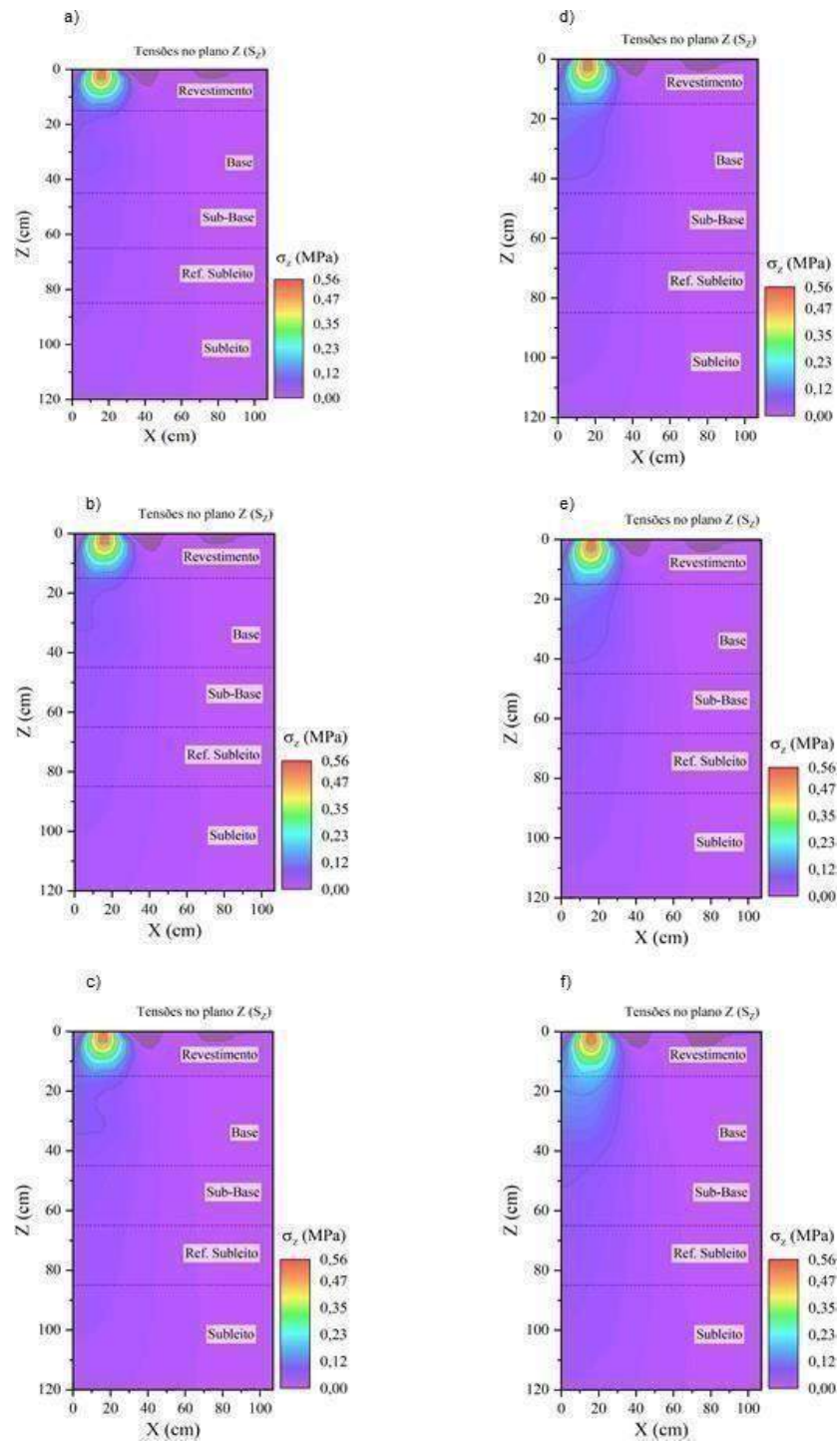
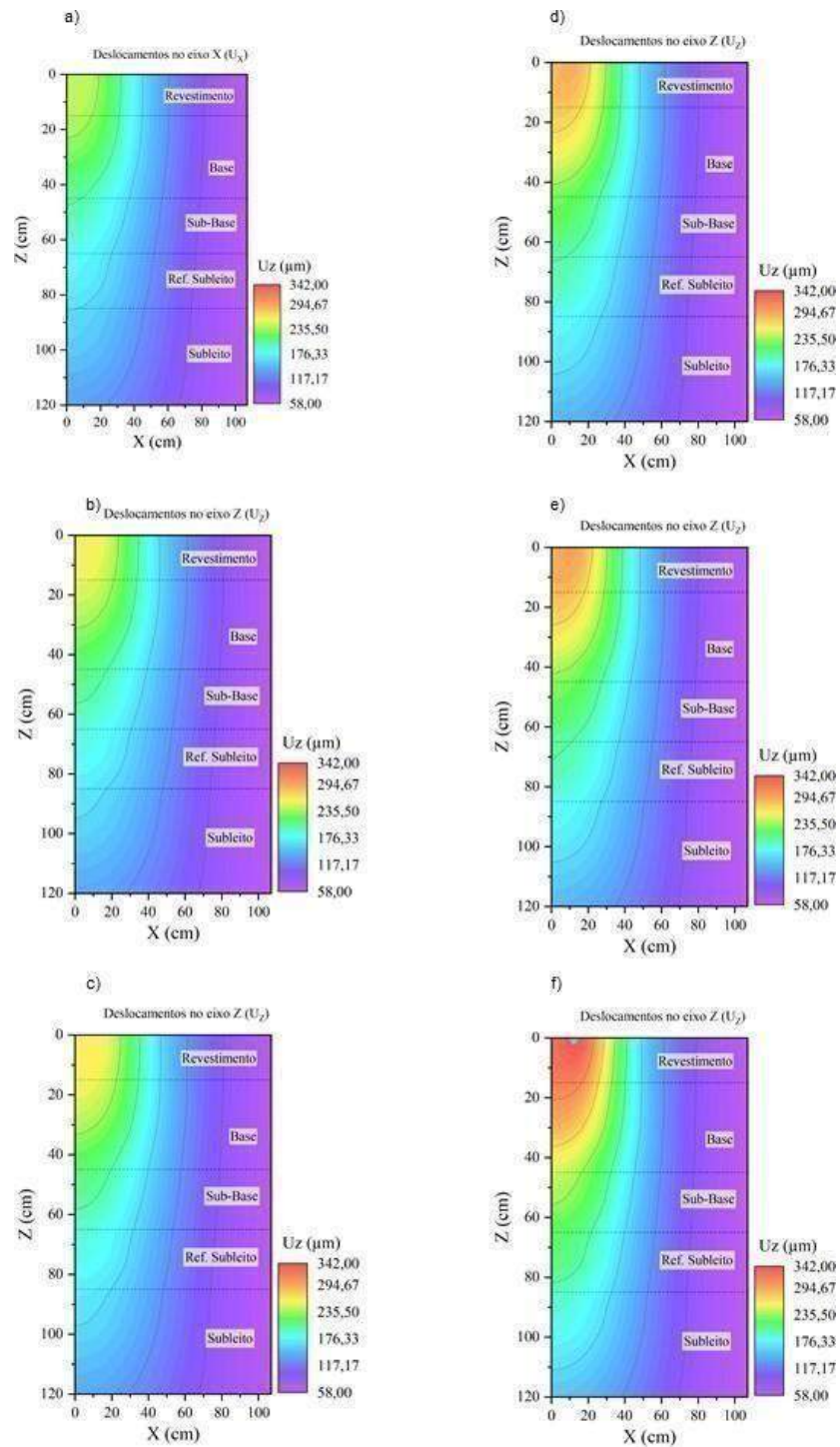


Figura 26: Deslocamentos no eixo Z ( $U_z$ ).



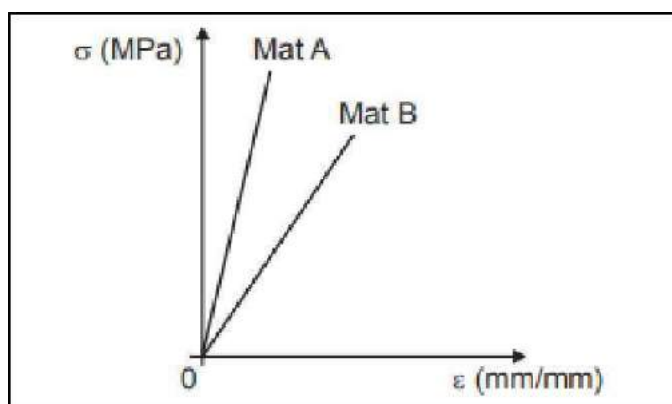
A partir da análise da figura 23, nota-se que há altas tensões de tração em X, sendo mais evidentes nos pavimentos sem adição de borracha, especialmente o 1, pois são mais

rígidos. À medida que a borracha é adicionada às misturas, a resiliência dos materiais aumenta e conseqüentemente há uma melhor distribuição das tensões, tornando o solo menos tensionado, mais evidente no pavimento 6.

Isso, por sua vez, não significa que o solo deformará menos, pelo contrário. Ao analisar os deslocamentos em X na figura 24, é possível perceber que houve um menor deslocamento no pavimento que sofreu maior tensão e um maior deslocamento no que sofreu menor tensão. Tal fato pode ser explicado pela adição da borracha, pois à medida que a borracha é adicionada à mistura, ela tende a se tornar mais elástica, o que, por sua vez, faz com que se deforme mais sob menor tensão.

Isso pode ser explicado também através da Lei de Hooke do comportamento elástico dos materiais, por meio do diagrama tensão-deformação apresentado na figura 27. O comportamento de um material é analisado levando em consideração a deformação que ele sofre em função de uma determinada tensão, ou seja, quanto maior a tensão e menor o deslocamento, melhor será o desempenho desse material.

**Figura 27:** Diagrama tensão-deformação.



Fonte: CESGRANRIO (2018).

Partindo desse pressuposto, é possível afirmar então que o pavimento 1 obteve o melhor desempenho, pois foi o que absorveu maiores tensões e obteve o menor deslocamento, ao contrário do pavimento 6 que, por estar mais elástico e mais resiliente, absorveu menos tensões e, em virtude disso, tracionou mais, o que fez com que resistisse menos às deformações.

O mesmo ocorreu com os pavimentos intermediários. As tensões em X diminuíram gradativamente com a adição de borracha, enquanto os deslocamentos aumentaram. Outro fato importante a ser comentado é que não houveram alterações significativas de tensões no plano X nas camadas abaixo do revestimento. Houveram também concentrações de tensões negativas na parte inferior da camada de rolamento, que é onde começam a surgir as trincas.

Em suma, é evidente que a incorporação da borracha melhorou o comportamento

referente a tensão de tração nas fibras inferiores do revestimento para ambos os casos, permitindo que absorvessem maiores tensões. Nesse caso, porém, não surtiu um efeito desejável, pois está tornando o solo mais elástico e mais deformável.

Isso tem relação direta com o módulo de resiliência analisado anteriormente, pois se o módulo de resiliência das misturas (que é o principal aspecto para determinar o trincamento) cai, isso implica que com o tempo o material terá uma maior susceptibilidade às trincas.

Do mesmo modo, ao analisar as tensões no plano Z, na figura 25, nota-se que o revestimento do pavimento 1 ( sem adição de borracha) obteve, mais uma vez, um desempenho melhor comparado aos outros, uma vez que, ao analisar as linhas de cores do gráfico (a), é possível perceber que o revestimento 1 conseguiu absorver melhor as tensões em Z, resistindo a maiores tensões e conseqüentemente emitindo menores tensões para as camadas subsequentes. A adição da borracha nas amostras do pavimento 2 (com adição de 6% de borracha ) e 3 ( com adição de 18%de borracha) tornou as misturas mais resilientes, fazendo com que o revestimento sozinho não suportasse essas tensões e começasse a solicitar mais a base, porém ainda se concentraram somente no revestimento e na base.

No revestimento do pavimento 4 (sem adição de borracha), as tensões apresentaram-se maiores que as do pavimento 1. Como ambos não apresentam adição de borracha, esse fato é explicado por meio do ligante utilizado, dado que o utilizado no pavimento 1 tem comportamento superior ao utilizado no pavimento 4. Da mesma forma, ao adicionar borracha aos pavimentos 5 (1% de borracha) e 6 (3% de borracha), esses ficaram mais resilientes e com tendência a deformarem mais sob menores tensões. A adição de 1% de borracha ao pavimento 5 não alterou muito o comportamento relativo às tensões, porém a adição de 3% ao pavimento 6 fez com que as tensões atingissem a sub-base.

Isso, por sua vez, reflete diretamente nos deslocamentos no eixo Z, apresentados na figura 26, onde quanto maiores foram as tensões, maiores os deslocamentos. Nota-se que os deslocamentos nos pavimentos de 1 a 3 ( com o ligante CAP 20) ocorreram em sua maioria no revestimento e bem pouco na base, diferentemente dos pavimentos de 4a 6 (com o ligante CAP 50/60), onde os deslocamentos foram mais críticos, chegando a alcançar o subleito.

## **5- CONCLUSÃO**

Este trabalho buscou avaliar a viabilidade da incorporação da borracha de pneus

inservíveis às misturas asfálticas e analisar seu comportamento mecânico quando submetidas a um elevado volume de tráfego.

A revisão bibliográfica apontou diversas vantagens da incorporação da borracha às misturas asfálticas, ligadas a melhorias nas propriedades mecânicas dos pavimentos e à sustentabilidade.

Entretanto, através da análise das amostras selecionadas, concluiu-se que todas apresentaram resultados não satisfatórios para os cenários levantados. Isso, por sua vez, está relacionado a dois fatores principais:

- O volume de tráfego utilizado no trabalho, pois como os pavimentos-tipo foram submetidos a um elevado volume de tráfego, conseqüentemente as tensões aplicadas sob eles foram as maiores possíveis, o que fez com que os materiais utilizados não suportassem tais tensões. Ficou evidente que as misturas que mais sofreram com essas tensões foram as com adição de borracha, isso ocorreu pois a incorporação da borracha tornou os materiais mais resilientes e conseqüentemente deixou as camadas abaixo do revestimento mais susceptíveis às tensões e deformações.

Tal fato pode ser comprovado através do tempo de vida útil que os pavimentos apresentaram, evidenciando que a adição da borracha não trouxe benefícios aos pavimentos, pois à medida que é adicionada aos pavimentos-tipo, seu tempo de vida é reduzido:

- O pavimento-tipo 1 (sem adição de borracha) apresentou 30% de área trincada em 13 meses e 99% em 33 meses;
  - O pavimento-tipo 2 (com adição de 6% de borracha) apresentou 30% de área trincada em 11 meses e 99% em 28 meses;
  - O pavimento-tipo 3 (com adição de 18% de borracha) apresentou 30% de área trincada em 10 meses e 99% em 26 meses;
  - O pavimento-tipo 4 (sem adição de borracha) apresentou 30% de área trincada em 8 meses e 99% em 19 meses;
  - O pavimento-tipo 5 (com adição de 1% de borracha) apresentou 30% de área trincada em 7 meses e 99% em 18 meses;
  - O pavimento-tipo 6 (com adição de 3% de borracha) apresentou 30% de área trincada em 5 meses e 99% em 12 meses.
- O ligante utilizado nas misturas asfálticas: foram utilizados dois tipos de ligantes nas amostras selecionadas, o CAP 20 e o CAP 50/60. As amostras feitas com

o CAP 20 se mostraram superiores às feitas com o CAP 50/60, uma vez que ele é um material melhor, mais resistente e mais rígido. O CAP 50/60, por outro lado, já é um material mais flexível, e com a adição da borracha ficou mais flexível ainda, tornando-o mais suscetível às tensões e deformações.

Em suma, conclui-se que a adição da borracha às misturas asfálticas é sim interessante e traz diversas vantagens, porém para este caso em específico não apresentou nenhuma, em virtude dos materiais utilizados e do cenário a que foram submetidos. Se utilizar materiais mais rígidos (como o CAP 20, que é sim um excelente material, porém com o volume de tráfego utilizado e combinado aos materiais das camadas adjacentes, não obteve um bom comportamento) e volume de tráfego de médio a baixo, possivelmente obteria-se resultados mais satisfatórios, o que pode ficar como sugestão para futuras pesquisas.



AMARAL, Simonne da Costa. **Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo - Usp, São Carlos, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6114/97: Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder**. West Conshohocken, Pa, 1997.

ANIP: **Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos**. 2018. Disponível em: [www.anip.org.br](http://www.anip.org.br). Acesso em: 23 mar. 2021.

ANTOSCZEZEM JUNIOR, José Antonio. **Desenvolvimento dos revestimentos asfálticos produzidos com asfaltos modificados por polímeros e borracha de pneus no Brasil**. 7. ed. São Paulo: Sinicesp, 2012.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16505 - MISTURAS ASFÁLTICAS - RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE UTILIZANDO O ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA**. Rio de Janeiro: Abnt Editora, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207:1982 - TERMINOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO**. Rio de Janeiro: Abnt Editora, 1982. 3 p

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BATISTA, Kenia Barros. **Desenvolvimento de ligantes asfálticos modificado com lignina como aditivo antienvelhecimento**. 2017. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Gráfica Imprinta, 2008. 509 p.

BOLSA DE RECICLAGEM DO SISTEMA FIEP. **Como é o processo de reciclagem de pneus**. Boletim Informativo. Ano I, n.3, JUL/AGO/2001. Disponível em: [www.cetsam.senai.br](http://www.cetsam.senai.br). Acesso em: 30 de março de 2021.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2019 – Relatório Gerencial**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial> >. Acesso em: 22 de março de 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **Manual de Pavimentação Rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **DNIT 136/2018 - ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Ipr, 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **DNIT 135/2018 - ME: Pavimentação asfáltica - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**.

Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Ipr, 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **DNIT 136/2018 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: : Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Ipr, 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **DNIT 184/2018 - ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: : Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Ipr, 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **Manual de ajuda programa MeDiNA**. Rio de Janeiro, 2020.

FENGLER, Ricardo Zardin. **Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad Lake Asphalt**. 2018. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

IBPS. **Instituto Brasileiro de Produção Sustentável**. 2005. Disponível em: [www.interb.com.br](http://www.interb.com.br). Acesso em: 25 mar. 2021.

KRAEMER, Karine Wille *et al.* **Deformação permanente em misturas asfálticas com diferentes ligantes asfálticos e adição de cal a partir do ensaio uniaxial de carga repetida**. Anpet, Gramado, v. 32, p. 1518-1530, nov. 2018.

LEAL, C. L. D.; CASTRO, P. F. E. **Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como fíler em concreto asfáltico**. Revista Vértices, v. 9, n. 1, p. 9-20, 11.

LEITE, L. M. (1999) **Estudo do Preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese de Doutorado, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MANO, Eloisa B. - **Introdução a Polímeros**, Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1986.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. (2015) **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência. 3ª ed., 638 p.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

MOTA, Rafael Vicente *et al.* **Efeito do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando dados de pedágio**. Revista de Transportes, Gramado, v. 32, n. 32, p. 0-1, nov. 2018.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha**. 2004. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ODA, S. (2000). **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PAIS, Jorge Carvalho *et al.* **Misturas asfálticas de graduação densa modificadas com borracha granulada pelo processo seco.** Rio de Janeiro, v. 35, out. 2004.

PATRIOTA, Marcelo de Barros. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus - processo seco.** 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

PAVEI, Evelice *et al.* **Resistência à tração de misturas asfálticas com adição de cinza pesada.** 2014. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense- Unesc, Santa Catarina, 2014.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias.** 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia do Transporte, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

PINTO, Salomão; PINTO, Isaac Eduardo. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos.** 1 ed Rio de Janeiro: LTC, 2018.

RODRIGUES, Andréa Ribeiro da Silva. **Caracterização química e reológica do cimento asfáltico de petróleo utilizado na cidade de Manaus modificado por borracha moída de pneus inservíveis e polímeros.** 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2006.

SANTOS, Thaís Aquino dos *et al.* **Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul.** Revista Transportes, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 48-64, abr. 2019.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação:** volume 1. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2007.

SEST SENAT. **Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartados por ano no Brasil.** Disponível em: [www.sestsenat.org.br](http://www.sestsenat.org.br). Acesso em: 23 mar. 2021

SILVA, Letícia Socai da *et al.* **Polímeros como modificadores asfálticos.** *Transportes*, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 84-106, 2 jul. 2002. Lepidus Tecnologia.

SOUZA, Gabriel Raimundo de. **Tratamentos superficiais com asfalto-borracha.** 2019. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unifacig Centro Universitário, Manhuaçu, 2019.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

WAY, G. B OGFC meets CRM; **Where the rubber meets the rubber: 15 years of durable success.** In: Asphalt Rubber 2003, Brasília. Proceedings 2003. p.49-63.

ZATARIN, Ana Paula Machado *et al.* **Viabilidade da pavimentação com asfalto-borracha.** Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 649-674, mar. 2017.



## **APÊNDICE A - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 1**

Neste apêndice será apresentado o relatório da análise mecânica do pavimento-tipo1 (sem adição de borracha), realizada pelo software MeDiNa, no qual constam as características dos materiais utilizados na estrutura e os danos sofridos por eles ao longo do tempo de vida útil.

## Programa MeDiNa v.1.1.3.0 - set/2019

CÓPIA NÃO REGISTRADA.

### Análise do pavimento

Empresa:

Nome do Projeto: **Pavimento 1: CAP 20 (SPECHT, 2004)**

Responsável pelo projeto: **Geovana de Sousa Bandeira e Wilquer Domingos Siguim**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **21/10/2021 às 17:31:57** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **5,3mm**

### ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

### Materializa do

Cam Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1 CONCRETO ASFÁLTICO CAP 20 (SPECHT, 2004)		Resiliente Linear MR = 6510 MPa	0,30
2 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	30,0	Resiliente Linear MR = 433 MPa	0,35
3 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	20,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
4 SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(5)	20,0	Resiliente Linear MR = 393 MPa	0,45
5 SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

## 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 20 (SPECHT, 2004)

### Propriedades

Tipo de CAP = CAP 20 - Refinaria Alberto Pascoalini em Canoas/RS.

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,63

Resistência à tração (MPa) = 1,27

Teor de asfalto (%) = 4,75

Volume de vazios (%) = 4

Faixa Granulométrica = ...

Abrasão Los Angeles (%) = ...

Norma ou Especificação = DNIT ES 31

### Modelos

Ensaio de Fadiga

-Modelo:  $k1 \cdot (et \wedge k2)$

-Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 5,496e-11$

-Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,253$

-Classe de Fadiga:  $\geq 1$

-FFM (100μ a 250μ):  $\geq 0,84$

Flow Number Mínimo

- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 750$  ciclos

- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 1966$  ciclo

## 2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo NG' + 30% brita 1 e 40% brita 0

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,065

Umidade Ótima (%) = 6,9

Energia Compactação = Intermediária

Abrasão Los Angeles (%) = 40,0

Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente

Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$

Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,24**

Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,34**

Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,37**

Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,04**

## 3 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,25

Umidade Ótima (%) = 7,0

Energia Compactação = Intermediário

Abrasão Los Angeles (%) = 40,0

Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente

Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$

Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,31**

Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,06**

Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,85**

Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,05**

## 4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(5)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo do Maranhão

Grupo MCT = LG'

MCT - Coeficiente c' = 2,48

MCT - Índice e' = 0,79

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,458

Umidade Ótima (%) = 26,5

Energia Compactação = Intermediária

Norma ou Especificação = DNIT ES 139

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente

Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$

Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,021**

Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,606**

Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **2,048**

Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,091**

## 5- SUBLEITO: Solo Siltoso NS

**Propriedades**

Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ  
 Grupo MCT = NS'  
 MCT - Coeficiente  $c' = 1,00$   
 MCT - Índice  $e' = 1,68$   
 Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ) = 1,8  
 Umidade Ótima (%) = 13,0  
 Energia Compactação = Normal  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

**Modelos**

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = \text{psi1} \cdot (\text{s3}^{\text{psi2}}) \cdot (\text{sd}^{\text{psi3}}) \cdot (\text{N}^{\text{psi4}})$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,244**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,419**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,309**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,069**

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1922**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **13,15**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,22e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,22e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **1,5%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,87e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	49%	10,00	3,289	1,622
3	Dois eixos duplos em tandem	117%	17,00	8,549	10,002
4	Três eixos duplos em tandem	13%	25,50	9,300	1,246

**Evolução dos danos no pavimento**

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	7,634e+05	4,41%	4,2
6	4,595e+06	13,20%	4,6
12	9,224e+06	28,36%	4,8
18	1,389e+07	49,45%	4,8
24	1,859e+07	72,62%	4,9
30	2,332e+07	92,92%	5,0
36	2,809e+07	99,00%	5,0
42	3,289e+07	99,00%	5,1
48	3,773e+07	99,00%	5,1
54	4,261e+07	99,00%	5,1
60	4,752e+07	99,00%	5,1
66	5,247e+07	99,00%	5,2
72	5,746e+07	99,00%	5,2
78	6,248e+07	99,00%	5,2
84	6,755e+07	99,00%	5,2
90	7,264e+07	99,00%	5,3



# Deflexões de Afundamento de Trilha de Roda

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
96	7,778e+07	99,00%	5,3
102	8,296e+07	99,00%	5,3
108	8,817e+07	99,00%	5,3
114	9,343e+07	99,00%	5,3
120	9,872e+07	99,00%	5,3

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	2,95
3	MATERIAL GRANULAR	1,32
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,03
5	SUBLEITO	1,04
<b>Afundamento de Trilha de Roda (mm)</b>		<b>5,3</b>

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG'

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRET ASFÁLTICO - CAP 20 (SPECHT, 2 04)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	28	24	22	19	16	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	16	13	11	9	7	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M4 (NG s:1494)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	29	24	20	17	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	36	17	13	10	8	6	4	3	3

<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1</b> <b>0 cm</b>	<b>Sensor 2</b> <b>20 cm</b>	<b>Sensor 3</b> <b>30 cm</b>	<b>Sensor 4</b> <b>45 cm</b>	<b>Sensor 5</b> <b>60 cm</b>	<b>Sensor 6</b> <b>90 cm</b>	<b>Sensor 7</b> <b>120 cm</b>	<b>Sensor 8</b> <b>150 cm</b>	<b>Sensor 9</b> <b>180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	33	27	22	18	13	10	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	41	21	15	11	8	6	4	3	3
Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso L' (5)									
<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1</b> <b>0 cm</b>	<b>Sensor 2</b> <b>20 cm</b>	<b>Sensor 3</b> <b>30 cm</b>	<b>Sensor 4</b> <b>45 cm</b>	<b>Sensor 5</b> <b>60 cm</b>	<b>Sensor 6</b> <b>90 cm</b>	<b>Sensor 7</b> <b>120 cm</b>	<b>Sensor 8</b> <b>150 cm</b>	<b>Sensor 9</b> <b>180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	53	37	29	22	17	13	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	44	23	17	11	8	5	4	3	3
Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'									
<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1</b> <b>0 cm</b>	<b>Sensor 2</b> <b>20 cm</b>	<b>Sensor 3</b> <b>30 cm</b>	<b>Sensor 4</b> <b>45 cm</b>	<b>Sensor 5</b> <b>60 cm</b>	<b>Sensor 6</b> <b>90 cm</b>	<b>Sensor 7</b> <b>120 cm</b>	<b>Sensor 8</b> <b>150 cm</b>	<b>Sensor 9</b> <b>180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	60	37	28	21	17	12	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	63	25	16	11	8	5	4	3	3

## **APÊNDICE B - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 2**

Neste apêndice será apresentado o relatório da análise mecânica do pavimento-tipo 2 (com 6% de borracha), realizada pelo software MeDiNa, no qual constam as características dos materiais utilizados na estrutura e os danos sofridos por eles ao longo do tempo de vida útil.

## Programa MeDiNa v.1.1.3.0 - set/2019

CÓPIA NÃO REGISTRADA.

Empresa:

Nome do Projeto: **Pavimento 2 - AB 14**

Responsável pelo projeto: **Geovana de Sousa Bandeira e Wilquer Domingos Siguim**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **21/10/2021 às 17:34:52** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **5,9mm**

### ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

### Materiais do pavimento

Cam Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1 CONCRETO ASFÁLTICO AB 14 (SPECHT, 2004)	15,0	Resiliente Linear MR = 5220 MPa	0,30
2 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	20,0	Resiliente Linear MR = 433 MPa	0,35
3 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	20,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
4 SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(5)	20,0	Resiliente Linear MR = 393 MPa	0,45
5 SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

## 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: AB 14 (SPECHT, 2004)

### Propriedades

Tipo de CAP = CAP 20 - Refinaria Alberto Pascoalini em Canoas/RS.  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,62  
 Resistência à tração (MPa) = 1,44  
 Teor de asfalto (%) = 5,15  
 Volume de vazios (%) = 4  
 Faixa Granulométrica = ...  
 Abrasão Los Angeles (%) = ...  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31

### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 -Modelo:  $k1 \cdot (et \wedge k2)$   
 -Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 5,496e-11$   
 -Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,253$   
 -Classe de Fadiga:  $\geq 1$   
 -FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  $\geq 0,84$   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  $\geq 750$  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  $\geq 1966$  ciclos

## 2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo NG' + 30% brita 1 e 40% brita 0  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,065  
 Umidade Ótima (%) = 6,9  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,24**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,34**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,37**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,04**

## 3 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,25  
 Umidade Ótima (%) = 7,0  
 Energia Compactação = Intermediário  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,31**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,06**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,85**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,05**

## 4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(5)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo do Maranhão  
 Grupo MCT = LG'  
 MCT - Coeficiente c' = 2,48  
 MCT - Índice e' = 0,79  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,458  
 Umidade Ótima (%) = 26,5  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,021**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,606**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **2,048**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,091**

## 5- SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

# Evolução dos danos no

Mês

N Equiv

Área Trincada

ATR

## Propriedades

Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ  
 Grupo MCT = NS'  
 MCT - Coeficiente c' = 1,00  
 MCT - Índice e' = 1,68  
 Massa específica (g/cm³) = 1,8  
 Umidade Ótima (%) = 13,0  
 Energia Compactação = Normal  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

## Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,244**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,419**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,309**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,069**

## Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1922**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **13,15**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,22e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,22e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **1,5%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,87e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	49%	10,00	3,289	1,622
3	Dois eixos duplos em tandem	117%	17,00	8,549	10,002
4	Três eixos duplos em tandem	13%	25,50	9,300	1,246

(mm)

1	7,634e+05	4,78%	4,7
6	4,595e+06	15,59%	5,1
12	9,224e+06	35,83%	5,2
18	1,389e+07	62,70%	5,3
24	1,859e+07	88,41%	5,4
30	2,332e+07	99,00%	5,5
36	2,809e+07	99,00%	5,5
42	3,289e+07	99,00%	5,6
48	3,773e+07	99,00%	5,6
54	4,261e+07	99,00%	5,6
60	4,752e+07	99,00%	5,7
66	5,247e+07	99,00%	5,7
72	5,746e+07	99,00%	5,7
78	6,248e+07	99,00%	5,7
84	6,755e+07	99,00%	5,8
90	7,264e+07	99,00%	5,8



# Adição de Afundamento de Trilha de Roda

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Mês	N Equiv	Área Trincada	AIK (mm)
96	7,778e+07	99,00%	5,8
102	8,296e+07	99,00%	5,8
108	8,817e+07	99,00%	5,8
114	9,343e+07	99,00%	5,9
120	9,872e+07	99,00%	5,9

Cam Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1 CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2 MATERIAL GRANULAR	3,31
3 MATERIAL GRANULAR	1,41
4 SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,03
5 SUBLEITO	1,12
<b>Afundamento de Trilha de Roda (mm)</b>	<b>5,9</b>

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG'

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - AB 14 (SPEC 1, 2004)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	29	25	22	19	16	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	17	13	11	9	7	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M4 (N°:1494)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	29	24	20	17	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	36	17	13	10	8	6	4	3	3



Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	33	27	22	18	13	10	9	8
Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	41	21	15	11	8	6	4	3	3

Equipamento	0 cm	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	Sensor 1 20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm	
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	53	37	29	22	17	13	10	8	8
Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITZ - Solo Silteoso Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	44	23	17	11	8	5	4	3	3

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	60	37	28	21	17	12	10	8	8
Carga = 4,0 ton Raio = 15,0 cm	63	25	16	11	8	5	4	3	3

## **APÊNDICE C - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 3**

Neste apêndice será apresentado o relatório da análise mecânica do pavimento-tipo 3 (com 18% de borracha), realizada pelo software MeDiNa, no qual constam as características dos materiais utilizados na estrutura e os danos sofridos por eles ao longo do tempo de vida útil.

## Programa MeDiNa v.1.1.3.0 - set/2019

CÓPIA NÃO REGISTRADA.

Empresa:

Nome do Projeto: **Pavimento 3 - AB 68**

Responsável pelo projeto: **Geovana de Sousa Bandeira e Wilquer Domingos Siguim**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **21/10/2021 às 17:35:54** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **6,1mm**

### ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

### Materiais do

Cam Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1 CONCRETO ASFÁLTICO AB 68 (SPECHT, 2004)	15,0	Resiliente Linear MR = 4810 MPa	0,30
2 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	30,0	Resiliente Linear MR = 433 MPa	0,35
3 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	20,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
4 SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(5)	20,0	Resiliente Linear MR = 393 MPa	0,45
5 SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

## 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: AB 68 (SPECHT, 2004)

### Propriedades

Tipo de CAP = CAP 20 - Refinaria Alberto Pascoalini em Canoas/RS.  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,57  
 Resistência à tração (MPa) = 1,39  
 Teor de asfalto (%) = 6,25  
 Volume de vazios (%) = 4  
 Faixa Granulométrica = ...  
 Abrasão Los Angeles (%) = ...  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31

### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 -Modelo:  **$k1 \cdot (et \wedge k2)$**   
 -Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 5,496e-11$   
 -Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,253$   
 -Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
 -FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  $\geq 0,84$   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  $\geq 750$  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  $\geq 1966$  ciclos

## 2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo NG' + 30% brita 1 e 40% brita 0  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,065  
 Umidade Ótima (%) = 6,9  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,24**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,34**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,37**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,04**

## 3 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,25  
 Umidade Ótima (%) = 7,0  
 Energia Compactação = Intermediário  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,31**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,06**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,85**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,05**

## 4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(5)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo do Maranhão  
 Grupo MCT = LG'  
 MCT - Coeficiente c' = 2,48  
 MCT - Índice e' = 0,79  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,458  
 Umidade Ótima (%) = 26,5  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,021**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,606**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **2,048**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,091**

## 5- SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

**Propriedades**

Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ  
 Grupo MCT = NS'  
 MCT - Coeficiente  $c' = 1,00$   
 MCT - Índice  $e' = 1,68$   
 Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ) = 1,8  
 Umidade Ótima (%) = 13,0  
 Energia Compactação = Normal  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

**Modelos**

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$   
 Coeficiente de Regressão ( $k1$  ou  $psi1$ ): **0,244**  
 Coeficiente de Regressão ( $k2$  ou  $psi2$ ): **0,419**  
 Coeficiente de Regressão ( $k3$  ou  $psi3$ ): **1,309**  
 Coeficiente de Regressão ( $k4$  ou  $psi4$ ): **0,069**

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1922**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **13,15**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,22e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,22e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **1,5%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,87e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	49%	10,00	3,289	1,622
3	Dois eixos duplos em tandem	117%	17,00	8,549	10,002
4	Três eixos duplos em tandem	13%	25,50	9,300	1,246

**Evolução dos danos no pavimento**

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	7,634e+05	4,92%	4,8
6	4,595e+06	16,64%	5,3
12	9,224e+06	39,11%	5,4
18	1,389e+07	68,10%	5,5
24	1,859e+07	94,03%	5,6
30	2,332e+07	99,00%	5,7
36	2,809e+07	99,00%	5,7
42	3,289e+07	99,00%	5,8
48	3,773e+07	99,00%	5,8
54	4,261e+07	99,00%	5,8
60	4,752e+07	99,00%	5,9
66	5,247e+07	99,00%	5,9
72	5,746e+07	99,00%	5,9
78	6,248e+07	99,00%	6,0
84	6,755e+07	99,00%	6,0
90	7,264e+07	99,00%	6,0



## Deflexões de Afundamento de Trilha de

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de afundamento após Trilha de Rodas comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

89

Mês	N Equiv	Área Trincada	(mm)
96	7,778e+07	99,00%	6,0
102	8,296e+07	99,00%	6,0
108	8,817e+07	99,00%	6,1
114	9,343e+07	99,00%	6,1
120	9,872e+07	99,00%	6,1

### Cam Material

		(mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	3,46
3	MATERIAL GRANULAR	1,45
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,03
5	SUBLEITO	1,15
<b>Afundamento de Trilha de Roda (mm)</b>		<b>6,1</b>

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG'

Equipamento	Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRET ASFÁLTICO - AB 68 (SPECHT, 2 04)								
	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	29	25	22	19	16	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	17	13	11	9	7	5	4	3	3

Equipamento	Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M4 (NG' s:1494)								
	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	29	24	20	17	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	36	17	13	10	8	6	4	3	3

<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1</b>	<b>Sensor 2</b>	<b>Sensor 3</b>	<b>Sensor 4</b>	<b>Sensor 5</b>	<b>Sensor 6</b>	<b>Sensor 7</b>	<b>Sensor 8</b>	<b>Sensor 9</b>
	<b>0 cm</b>	<b>20 cm</b>	<b>30 cm</b>	<b>45 cm</b>	<b>60 cm</b>	<b>90 cm</b>	<b>120 cm</b>	<b>150 cm</b>	<b>180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	33	27	22	18	13	10	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	41	21	15	11	8	6	4	3	3



De (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

De  
fle  
xões  
es  
es  
pe  
ra  
da  
s  
(0,  
01  
m  
m)  
no  
to  
po  
da  
ca  
m  
ad  
a:  
SO  
LO  
FI  
N  
O,  
SIL  
TO  
SO  
O  
U  
AR  
GI  
LO  
SO  
-  
So  
lo  
Ar  
gil  
os  
o  
LG  
'(5  
)

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	53	37	29	22	17	13	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	44	23	17	11	8	5	4	3	3

De  
fle  
xões  
es  
es  
pe  
ra  
da  
s

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	60	37	28	21	17	12	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	63	25	16	11	8	5	4	3	3

## **APÊNDICE D - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 4**

Neste apêndice será apresentado o relatório da análise mecânica do pavimento-tipo 4 (sem adição de borracha), realizada pelo software MeDiNa, no qual constam as características dos materiais utilizados na estrutura e os danos sofridos por eles ao longo do tempo de vida útil.

## Programa MeDiNa v.1.1.3.0 - set/2019

CÓPIA NÃO REGISTRADA.

Empresa:

Nome do Projeto: **Pavimento 4 - REF (PATRIOTA, 2004)**

Responsável pelo projeto: **Geovana de Sousa Bandeira e Wilquer Domingos Siguim**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **21/10/2021 às 17:36:50** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **7,1mm**

### ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

## Material do pavimento

Cam Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1 CONCRETO ASFÁLTICO REF. (PATRIOTA, 2004)	15,0	Resiliente Linear MR = 3205 MPa	0,30
2 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	30,0	Resiliente Linear MR = 433 MPa	0,35
3 MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	20,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
4 SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(5)	20,0	Resiliente Linear MR = 393 MPa	0,45
5 SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

## 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: REF. (PATRIOTA, 2004)

### Propriedades

Tipo de CAP = CAP 50/60  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,475  
 Resistência à tração (MPa) = 1,07  
 Teor de asfalto (%) = 6  
 Volume de vazios (%) = 4,2  
 Faixa Granulométrica = ...  
 Abrasão Los Angeles (%) = ...  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31

### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 -Modelo:  **$k1 \cdot (et \wedge k2)$**   
 -Coeficiente de Regressão (k1):  **$\geq 5,496e-11$**   
 -Coeficiente de Regressão (k2):  **$\geq -3,253$**   
 -Classe de Fadiga:  **$\geq 0$**   
 -FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  **$\geq 0,84$**   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  **$\geq 750$**  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  **$\geq 1966$**  ciclos

## 2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo NG' + 30% brita 1 e 40% brita 0  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,065  
 Umidade Ótima (%) = 6,9  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,24**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,34**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,37**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,04**

## 3 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,25  
 Umidade Ótima (%) = 7,0  
 Energia Compactação = Intermediário  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,31**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,06**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,85**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,05**

## 4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(5)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo do Maranhão  
 Grupo MCT = LG'  
 MCT - Coeficiente c' = 2,48  
 MCT - Índice e' = 0,79  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,458  
 Umidade Ótima (%) = 26,5  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,021**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,606**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **2,048**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,091**

## 5- SUBLEITO: Solo Siltoso NS'





## Deflexões de Afundamento de Trilha de Roda

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de afundamento de Trilha de Roda comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

95

Mês	N Equiv	Area Trincada	(mm)
96	7,778e+07	99,00%	7,1
102	8,296e+07	99,00%	7,1
108	8,817e+07	99,00%	7,1
114	9,343e+07	99,00%	7,1
120	9,872e+07	99,00%	7,1

### Cam Material

		(mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	4,20
3	MATERIAL GRANULAR	1,61
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,04
5	SUBLEITO	1,29
<b>Afundamento de Trilha de Roda (mm)</b>		<b>7,1</b>

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG'

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - REF. (FRIQUITA, 2004)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	31	26	23	19	16	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	19	14	11	9	7	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M4 (NITS:1494)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	29	24	20	17	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	36	17	13	10	8	6	4	3	3

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	33	27	22	18	13	10	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	41	21	15	11	8	6	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso LG'(5)

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	53	37	29	22	17	13	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	44	23	17	11	8	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	60	37	28	21	17	12	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	63	25	16	11	8	5	4	3	3



## **APÊNDICE E - RELATÓRIO DA ANÁLISE DO PAVIMENTO-TIPO 5**

Neste apêndice será apresentado o relatório da análise mecânica do pavimento-tipo 5 (com 1% de borracha), realizada pelo software MeDiNa, no qual constam as características dos materiais utilizados na estrutura e os danos sofridos por eles ao longo do tempo de vida útil.

## Programa MeDiNa v.1.1.3.0 - set/2019

CÓPIA NÃO REGISTRADA.

Empresa:

Nome do Projeto: **Pavimento 5 - B1 (PATRIOTA, 2004)**

Responsável pelo projeto: **Geovana de Sousa Bandeira e Wilquer Domingos Siguim**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **21/10/2021 às 17:37:50** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **7,4mm**

### ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

### Materializa do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO BI (PATRIOTA, 2004)	15,0	Resiliente Linear MR = 2953 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	30,0	Resiliente Linear MR = 433 MPa	0,35
3	MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	20,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(5)	20,0	Resiliente Linear MR = 393 MPa	0,45
5	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

## 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: BI (PATRIOTA, 2004)

### Propriedades

Tipo de CAP = CAP 50/60  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,449  
 Resistência à tração (MPa) = 0,9  
 Teor de asfalto (%) = 6  
 Volume de vazios (%) = 6  
 Faixa Granulométrica = ...  
 Abrasão Los Angeles (%) = ...  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31

### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 -Modelo:  **$k1 \cdot (et \wedge k2)$**   
 -Coeficiente de Regressão (k1):  **$\geq 5,496e-11$**   
 -Coeficiente de Regressão (k2):  **$\geq -3,253$**   
 -Classe de Fadiga:  **$\geq 0$**   
 -FFM (100μ a 250μ):  **$\geq 0,84$**   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  **$\geq 750$**  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  **$\geq 1966$**  ciclos

## 2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo NG' + 30% brita 1 e 40% brita 0  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,065  
 Umidade Ótima (%) = 6,9  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,24**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,34**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,37**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,04**

## 3 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,25  
 Umidade Ótima (%) = 7,0  
 Energia Compactação = Intermediário  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,31**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,06**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,85**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,05**

## 4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(5)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo do Maranhão  
 Grupo MCT = LG'  
 MCT - Coeficiente c' = 2,48  
 MCT - Índice e' = 0,79  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,458  
 Umidade Ótima (%) = 26,5  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  **$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$**   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,021**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,606**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **2,048**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,091**

## 5 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

# Evolução dos danos no pavimento

100

Mês                                      N Equiv                                      Área Trincada                                      ATR

## Propriedades

Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ  
 Grupo MCT = NS'  
 MCT - Coeficiente  $c' = 1,00$   
 MCT - Índice  $e' = 1,68$   
 Massa específica ( $g/cm^3$ ) = 1,8  
 Umidade Ótima (%) = 13,0  
 Energia Compactação = Normal  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

## Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,244**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,419**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,309**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,069**

## Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1922**  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **13,15**  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,22e+06**  
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**  
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,22e+06**  
 Taxa de crescimento do tráfego: **1,5%**  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,87e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	49%	10,00	3,289	1,622
3	Dois eixos duplos em tandem	117%	17,00	8,549	10,002
4	Três eixos duplos em tandem	13%	25,50	9,300	1,246

				(mm)
1	7,634e+05	5,91%		5,8
6	4,595e+06	25,40%		6,4
12	9,224e+06	64,81%		6,6
18	1,389e+07	99,00%		6,7
24	1,859e+07	99,00%		6,8
30	2,332e+07	99,00%		6,9
36	2,809e+07	99,00%		6,9
42	3,289e+07	99,00%		7,0
48	3,773e+07	99,00%		7,0
54	4,261e+07	99,00%		7,1
60	4,752e+07	99,00%		7,1
66	5,247e+07	99,00%		7,1
72	5,746e+07	99,00%		7,2
78	6,248e+07	99,00%		7,2
84	6,755e+07	99,00%		7,2
90	7,264e+07	99,00%		7,3



# Deflexões e Afundamento de Trilha de Roda

Trincada

ATR

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de afundamento de Trilha de Roda de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

101

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - BI (PATRIOTA, 2004)

			(mm)
96	7,778e+07	99,00%	7,3
102	8,296e+07	99,00%	7,3
108	8,817e+07	99,00%	7,3
114	9,343e+07	99,00%	7,3
120	9,872e+07	99,00%	7,4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Cam Material

		(mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	4,35
3	MATERIAL GRANULAR	1,64
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,04
5	SUBLEITO	1,32
<b>Afundamento de Trilha de Roda (mm)</b>		<b>7,4</b>

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	31	26	23	19	16	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	19	14	11	9	7	5	4	3	3

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	29	24	20	17	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	36	17	13	10	8	6	4	3	3

<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1 0 cm</b>	<b>Sensor 2 20 cm</b>	<b>Sensor 3 30 cm</b>	<b>Sensor 4 45 cm</b>	<b>Sensor 5 60 cm</b>	<b>Sensor 6 90 cm</b>	<b>Sensor 7 120 cm</b>	<b>Sensor 8 150 cm</b>	<b>Sensor 9 180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	33	27	22	18	13	10	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	41	21	15	11	8	6	4	3	3

<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1 0 cm</b>	<b>Sensor 2 20 cm</b>	<b>Sensor 3 30 cm</b>	<b>Sensor 4 45 cm</b>	<b>Sensor 5 60 cm</b>	<b>Sensor 6 90 cm</b>	<b>Sensor 7 120 cm</b>	<b>Sensor 8 150 cm</b>	<b>Sensor 9 180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	53	37	29	22	17	13	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	44	23	17	11	8	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso LG'(5)

<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1 0 cm</b>	<b>Sensor 2 20 cm</b>	<b>Sensor 3 30 cm</b>	<b>Sensor 4 45 cm</b>	<b>Sensor 5 60 cm</b>	<b>Sensor 6 90 cm</b>	<b>Sensor 7 120 cm</b>	<b>Sensor 8 150 cm</b>	<b>Sensor 9 180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	60	37	28	21	17	12	10	8	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	63	25	16	11	8	5	4	3	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Neste apêndice será apresentado o relatório da análise mecânica do pavimento-tipo 6 (com 3% de borracha), realizada pelo software MeDiNa, no qual constam as características dos materiais utilizados na estrutura e os danos sofridos por eles ao longo do tempo de vida útil.



## Programa MeDiNa v.1.1.3.0 - set/2019 CÓPIA NÃO REGISTRADA.

Empresa:

Nome do Projeto: **Pavimento 6 - B3 (PATRIOTA, 2004)**

Responsável pelo projeto: **Geovana de Sousa Bandeira e Wilquer Domingos Siguim**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **21/10/2021 às 17:39:04** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **9,0mm**

### ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

### Materializa do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO B3 (PATRIOTA, 2004)	15,0	Resiliente Linear MR = 1539 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	30,0	Resiliente Linear MR = 433 MPa	0,35
3	MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	20,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(5)	20,0	Resiliente Linear MR = 393 MPa	0,45
5	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

## 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: B3 (PATRIOTA, 2004)

### Propriedades

Tipo de CAP = CAP 50/60  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,388  
 Resistência à tração (MPa) = 0,72  
 Teor de asfalto (%) = 6  
 Volume de vazios (%) = 9,6  
 Faixa Granulométrica = ...  
 Abrasão Los Angeles (%) = ...  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31

### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 - Modelo:  $k1 \cdot (et \wedge k2)$   
 - Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 5,496e-11$   
 - Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,253$   
 - Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
 - FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  $\geq 0,84$   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  $\geq 750$  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  $\geq 1966$  ciclos

## 2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo NG' + 30% brita 1 e 40% brita 0  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,065  
 Umidade Ótima (%) = 6,9  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,24**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,34**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,37**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,04**

## 3 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,25  
 Umidade Ótima (%) = 7,0  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Abrasão Los Angeles (%) = 40,0  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,31**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,06**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,85**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,05**

## 4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(5)

### Propriedades

Descrição do Material = Solo do Maranhão  
 Grupo MCT = LG'  
 MCT - Coeficiente  $c' = 2,48$   
 MCT - Índice  $e' = 0,79$   
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,458  
 Umidade Ótima (%) = 26,5  
 Energia Compactação = Intermediária  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

### Modelos

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,021**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,606**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **2,048**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,091**

## 5 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

# Evolução dos danos no pavimento

Mês    N Equiv    Área Trincada    ATR

**Propriedades**

**Modelos**

Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ  
 Grupo MCT = NS'  
 MCT - Coeficiente c' = 1,00  
 MCT - Índice e' = 1,68  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,8  
 Umidade Ótima (%) = 13,0  
 Energia Compactação = Normal  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

Ensaio de Deformação Permanente  
 Modelo:  $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$   
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,244**  
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,419**  
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,309**  
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,069**

## Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1922**  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **13,15**  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,22e+06**  
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**  
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,22e+06**  
 Taxa de crescimento do tráfego: **1,5%**  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,87e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	49%	10,00	3,289	1,622
3	Dois eixos duplos em tandem	117%	17,00	8,549	10,002
4	Três eixos duplos em tandem	13%	25,50	9,300	1,246

			(mm)
1	7,634e+05	7,72%	7,1
6	4,595e+06	47,72%	7,8
12	9,224e+06	99,00%	8,0
18	1,389e+07	99,00%	8,2
24	1,859e+07	99,00%	8,3
30	2,332e+07	99,00%	8,4
36	2,809e+07	99,00%	8,5
42	3,289e+07	99,00%	8,5
48	3,773e+07	99,00%	8,6
54	4,261e+07	99,00%	8,6
60	4,752e+07	99,00%	8,7
66	5,247e+07	99,00%	8,7
72	5,746e+07	99,00%	8,8
78	6,248e+07	99,00%	8,8
84	6,755e+07	99,00%	8,8
90	7,264e+07	99,00%	8,9



# Deflexões e Afundamento de Trilha de Roda

Trincada

ATR

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

107

			(mm)
96	7,778e+07	99,00%	8,9
102	8,296e+07	99,00%	8,9
108	8,817e+07	99,00%	8,9
114	9,343e+07	99,00%	9,0
120	9,872e+07	99,00%	9,0

Carga = 4,0 ton

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M4 (NG' s:1494)

		(mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	5,54
3	MATERIAL GRANULAR	1,88
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,06
5	SUBLEITO	1,51
<b>Afundamento de Trilha de Roda (mm)</b>		<b>9,0</b>

Carga = 4,0 ton

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	34	27	23	19	16	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm	23	15	12	9	7	5	4	3	3

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	29	24	20	17	13	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm	36	17	13	10	8	6	4	3	3

0 cm

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm	

Carga = 4,0 ton	Viga Benkelman								
	Raio = 10,8 cm	47	33	27	22	18	13	10	9
	Carga = 8,2 ton								8

Deflexões esperadas (0,01 mm)	FWD								
	Raio = 15,0 cm	41	21	15	11	8	6	4	3
									3

0 cm

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm	

Carga = 4,0 ton	Viga Benkelman								
	Raio = 10,8 cm	53	37	29	22	17	13	10	8
	Carga = 8,2 ton								8

Deflexões esperadas (0,01 mm)	FWD								
	Raio = 15,0 cm	44	23	17	11	8	5	4	3
									3

Equipamento	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm

Carga = 4,0 ton	Viga Benkelman								
	Raio = 10,8 cm	60	37	28	21	17	12	10	8
	Carga = 8,2 ton								8

	FWD								
	Raio = 15,0 cm	63	25	16	11	8	5	4	3
									3