

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**Adriane Arruda Silveira**

**Desempenho mecânico de concretos asfálticos com diferentes ligantes em  
relação à deformação permanente**

**Alegrete  
2025**

**Adriane Arruda Silveira**

**Desempenho mecânico de concretos asfálticos com diferentes ligantes em  
relação à deformação permanente**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Silveira dos  
Santos.

**Alegrete  
2025**

**ADRIANE ARRUDA SILVEIRA**

**DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS COM DIFERENTES  
LIGANTES EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA - Orientador

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Prof. Dr. SILVIO LISBOA SCHUSTER - UFSM



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO**,  
**PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 08:42, conforme  
horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS**,  
**PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 10:34, conforme  
horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Silvio Lisboa Schuster**, **Usuário Externo**, em  
12/12/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as  
normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?  
acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código  
verificador **1922690** e o código CRC **EF3509BC**.

---

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela sanidade mental e pela saúde física que me sustentaram ao longo desta jornada.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio financeiro e amor incondicional.

Ao meu namorado, Vinicius, por estar presente nos cinco anos de faculdade, oferecendo companheirismo e compreensão.

Aos meus primos, especialmente à Laura, pelo incentivo constante, e por acreditar no meu potencial.

Ao meu orientador, por todo o conhecimento compartilhado e pela paciência.

À UNIPAMPA, pela formação acadêmica, e ao laboratório GEPPASV, por tornar possível a realização dos ensaios do TCC.

## RESUMO

O presente estudo avaliou o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligante convencional CAP 50/70 e ligantes modificados AMP 60/85 e AMP 55/75, com foco na resistência à deformação permanente. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais ensaios de *Flow Number* e *Hamburg Wheel Tracking Test*, além de avaliações em campo utilizando barra laser e treliça metálica em trechos experimentais localizados na BR-116 no Rio Grande do Sul. Foi feita uma análise integrada, comparando os resultados das misturas usinadas com o comportamento observado nos trechos experimentais, o que permitiu verificar a coerência entre o comportamento previsto em laboratório e o desempenho efetivo das mesmas misturas utilizadas em serviço. Os resultados mostraram que o AMP 60/85 apresentou o melhor desempenho global em ambiente controlado, especialmente no *Flow Number*, enquanto o AMP 55/75 demonstrou comportamento intermediário e estável nos diferentes métodos de avaliação. O CAP 50/70 exibiu maior suscetibilidade à deformação permanente tanto em laboratório quanto na análise reológica, conforme indicado por valores elevados de Jnr. Entretanto, em campo, verificou-se influência significativa das condições estruturais e ambientais, sobretudo no Segmento B, onde a elevada umidade reduziu o desempenho da mistura com AMP 60/85.

**Palavras-chaves:** Deformação permanente; Misturas asfálticas; Ligantes modificados; Flow Number; Hamburgo; Avaliação em campo; AMP 60/85; AMP 55/75; CAP 50/70; Trechos experimentais; Jnr; Treliça metálica; Barra laser.

## ABSTRACT

This study evaluated the mechanical performance of asphalt mixtures produced with the conventional binder CAP 50/70 and the modified binders AMP 60/85 and AMP 55/75, with a focus on resistance to permanent deformation. Laboratory tests were carried out, including the Flow Number and Hamburg Wheel Tracking Test, as well as field evaluations using a laser bar and a metal truss in experimental sections located along the BR-116 highway in Rio Grande do Sul. An integrated analysis was performed, comparing the results of the plant-produced mixtures with the behavior observed in the experimental sections, which made it possible to verify the consistency between the laboratory-predicted performance and the in-service behavior of the same mixtures. The results showed that AMP 60/85 presented the best overall performance under controlled conditions, particularly in the Flow Number test, while AMP 55/75 demonstrated intermediate and stable behavior across the different evaluation methods. The CAP 50/70 binder displayed greater susceptibility to permanent deformation both in laboratory testing and in the rheological analysis, as indicated by its higher Jnr values. However, field observations revealed a significant influence of structural and environmental conditions, especially in Segment B, where high moisture reduced the performance of the AMP 60/85 mixture.

**Keywords:** Permanent deformation; Asphalt mixtures; Modified binders; Flow Number; Hamburg; Field evaluation; AMP 60/85; AMP 55/75; CAP 50/70; Experimental sections; Jnr; Metal truss; Laser bar.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de deformação permanente em pavimentos flexíveis	16
Figura 2 - Comportamento mecânico de materiais asfálticos em função da temperatura versus deformação	18
Figura 3 – Comportamento de misturas com diferentes teores de ligante asfáltico	19
Figura 4 - Processos de incorporação de polímeros em misturas asfálticas.	21
Figura 5 - Propriedades dos minerais	22
Figura 6 - Ação do carregamento	24
Figura 7 - Resposta do material viscoelástico	24
Figura 8 - Representação esquemática da transferência de calor entre o pavimento e o ambiente	25
Figura 9 - 723 estações meteorológicas de superfície ativas do INMET e 2.278 centroides das células do MERRA – 2	26
Figura 10 - Aparelho de carga repetida uniaxial	28
Figura 11 - Taxa de deformação plástica vertical uniaxial mínima	28
Figura 12 - <i>Hamburg Wheel Tracking Device</i>	30
Figura 13 – Fluxograma da metodologia	31
Figura 14 - Segmento A	32
Figura 15 - Segmento B	33
Figura 16 - Segmento C	33
Figura 17 - Perfis transversais dos trechos experimentais.	34
Figura 18 - Curva granulométrica do solo dos Segmentos A, B e C	35
Figura 19 - Curva granulométrica do material de enchimento da sub-base	35
Figura 20 - Curva granulométrica da mistura de BGS da camada de Base	36
Figura 21 - Curva granulométrica da mistura asfáltica de projeto e de campo do Segmento A	37
Figura 22 – Curva granulométrica da mistura asfáltica de projeto dos Segmentos B e C, da mistura de campo do Segmento B e da terceira camada do campo do Segmento C	38
Figura 23 - Curva granulométrica da mistura asfáltica de projeto, da primeira e segunda camada do campo do Segmento C	40
Figura 24 - Amostras dos segmentos A, B e C	43
Figura 25 - Retificação da face inferior	43
Figura 26 - Corte para adaptação ao dispositivo de deformação	44
Figura 27 - Medição da espessura do corpo de prova com paquímetro	44
Figura 28 - Confinamento de aproximadamente metade da altura das amostras	44
Figura 29 - Roda posicionada sobre as amostras	45
Figura 30 - Ruptura inadequada das amostras	46
Figura 31 - Amostra com ruptura imediata	46
Figura 32 - Formas utilizadas no ensaio Hamburg Wheel Tracking Test: Fornecida de fábrica (direita) e substituta (esquerda)	47
Figura 33 - Forma substituta	47
Figura 34 - Amostras com deformação permanente	47
Figura 35 - Avaliação de IRI nos segmentos A, B e C	49
Figura 36 - Avaliação de ATR efetuado nos Segmentos A, B e C	50
Figura 37 - Valores de <i>FLOW NUMBER</i>	51

<b>Figura 38 - Gráfico resumo de Hamburgo</b>	<b>53</b>
<b>Figura 39 - Resultados de barra laser</b>	<b>57</b>
<b>Figura 40 - Valores de ATR da treliça metálica</b>	<b>60</b>
<b>Figura 41 - Análise conjunta dos métodos de avaliação de deformação permanente</b>	<b>62</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de <i>Flow Number</i> .....	29
Tabela 2 - Resultados dos agregados e da dosagem da mistura do Segmento A .....	37
Tabela 3 - Dosagem da mistura do Segmentos B e da camada superior do Segmento C .....	39
Tabela 4 - Dosagem da mistura com AMP 55/75 do Segmento C .....	40
Tabela 5 – Volume diário médio.....	42
Tabela 6 - Valores de <i>Flow Number</i> .....	51
Tabela 7 - Valores de ATR obtidos com barra laser.....	56
Tabela 8 - Valores de ATR obtidos com treliça metálica .....	59
Tabela 9 - Resumo dos resultados das amostras usinadas.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% - Porcentagem

° - Graus

AASHTO - Associação Americana de Autoridades de Rodovias e Transportes Estaduais

AMP – Asfaltos modificados por polímeros

ATR - Afundamento de Trilha de Roda

BGS - Brita Graduada Simples

CAP – Cimentos asfálticos de petróleo

CNT - Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de Prova

cSt – Centistokes

DMM - Densidade Máxima Medida

DNER-ME - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FN – *Flow Number*

g/cm<sup>3</sup> - Grama Por Centímetro Cúbico

HPG – High Performance Grade

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IRI – Irregularidade Internacional

kgf – Quilograma – força

Km – Quilômetro

km/h - Quilômetros Percorridos Em Uma Hora

kPa – quilopascal

MCT - Miniatura, Compactado, Tropical

MERRA - *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*

mm – Milímetros

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

°C - Graus Célsius

PG - Performance Grade

Pol – Polegadas

PRO-MeDiNa - Programa de Monitoramento de Seções de Pavimento

QI – Quociente de irregularidade

R 30 - Procedimento padrão para a amostragem de misturas asfálticas

R 97 - Procedimento para a determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida

RBV – Relação Betume Vazios

REFAP - Refinaria Alberto Pasqualini

RICE - Repouso, Gelo, Compressão e Elevação

SBS - Estireno-Butadieno-Estireno

SGC – Compactador giratório superpave

TE – Trilha Externa

TI – Trilha Interna

UV – Radiação ultravioleta

UV-VIS - Ultravioleta-visível

VV – Volume de Vazios



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM REVESTIMENTOS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 DESEMPENHO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 DESEMPENHO DOS AGREGADOS MINERAIS FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 INFLUÊNCIA DO TRÁFEGO FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE ...</b>	<b>23</b>
<b>2.2.4 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE NO LABORATÓRIO.....</b>	<b>27</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 TRECHOS MONITORADOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.1 SUBLEITO, SUB-BASE E BASE .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.2 REVESTIMENTOS.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.1 CONTAGEM DO TRÁFEGO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.2 HAMBURG WHEEL TRACKING TEST.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.3 FLOW NUMBER .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.4 BARRA LASER .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.5 TRELIÇA METÁLICA .....</b>	<b>50</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 FLOW NUMBER .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 HAMBURG WHEEL TRACKING TEST.....</b>	<b>53</b>

<b>4.3 BARRA LASER .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4 TRELIÇA METÁLICA .....</b>	<b>59</b>
<b>4.5 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A título introdutório, Bernucci *et al.*, (2022) abordam que o pavimento compreende uma estrutura integrada por múltiplas camadas de espessuras finitas, executada sobre a superfície de terraplenagem. Sua função sob perspectiva técnica econômica é resistir às solicitações impostas pelo tráfego de veículos e pelas condições climáticas, além de proporcionar melhores condições de rolamento aos usuários, assegurando conforto e segurança. Os pavimentos rodoviários são classificados em dois tipos básicos principais: pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis, cada um com características estruturais distintas e métodos específicos de dimensionamento, para alcançar um comportamento satisfatório frente às cargas aplicadas.

Colavite e Konishi (2015) abordam que no cenário brasileiro, destacam-se cinco modais principais utilizados para o transporte de cargas: rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo, cada qual apresentando características operacionais que os tornam adequados conforme o tipo e a exigência da carga transportada. Com isso, a esfera rodoviária possui uma função essencial no sistema de transporte, sendo crucial para o desenvolvimento socioeconômico de uma nação, promovendo mobilidade e acessibilidade para pessoas e mercadorias.

Segundo a pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT 2023), a malha rodoviária cumpre função central na logística brasileira, sendo responsável por 65% do deslocamento de cargas e 95% do transporte de passageiros no país. No entanto, a generalidade dessa movimentação ocorre sobre a infraestrutura viária com condições precárias de conservação. Pesquisas recentes indicam que 67,5% da extensão da malha rodoviária nacional apresenta classificação regular, ruim ou péssima, enquanto apenas 32,5% são avaliadas como boas ou ótimas.

Assim, tendo em vista sua relevância para o desenvolvimento econômico e social do país, torna-se fundamental compreender os materiais e métodos de execução que compõem as estruturas dos pavimentos asfálticos, para que as mesmas possam suportar solicitações mecânicas e ações climáticas ao longo do tempo, assegurando condições adequadas de trafegabilidade de cargas e pessoas Mota *et al.*, (2022).

Barros *et al.*, (2015) explicam que o grande volume de carga nas rodovias, aliado à insuficiência de manutenção adequada para as vias, contribui para a

degradação precoce dos pavimentos. Como consequência, tem-se o desgaste dos revestimentos asfálticos e o surgimento de patologias, dentre elas, sobressai-se, a deformação permanente. Bastos (2016) escreveu que, a deformação permanente em revestimentos asfálticos torna-se evidente por meio de depressões longitudinais situadas nas trilhas de roda e, além do revestimento, as camadas inferiores da estrutura do pavimento também podem apresentar esse tipo de deformação, em decorrência de cargas adicionais induzidas pelo tráfego e de falhas por cisalhamento.

A fim de minimizar a ocorrência do efeito mencionado, torna-se importante a investigação de suas causas, possibilitando a otimização dos materiais e parâmetros que os aperfeiçoam e, conseqüentemente, promovendo o aumento da resistência mecânica do pavimento. Diante dos aspectos previamente abordados, busca-se a relevância em pesquisar e averiguar o comportamento das misturas asfálticas, com o intuito de prever seu desempenho mecânico ao longo do tempo, e identificar entre as misturas asfálticas, qual apresenta a melhor resposta às solicitações projetadas.

Uma das estratégias adotadas para aprimorar o desempenho das misturas asfálticas e reduzir a ocorrência da deformação permanente é a incorporação de aditivos e modificadores aos ligantes asfálticos.

Dessa forma, o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral analisar o comportamento e o desempenho frente a deformação permanente, de misturas feitas com ligantes asfálticos convencional e modificados aplicados em trechos experimentais.

Como objetivos específicos tem-se:

- a) Identificar o concreto asfáltico com os melhores resultados de resistência à deformação permanente.
- b) Comparar os testes laboratoriais de parâmetros do ensaio de *Flow Number*, obtido por meio do ensaio uniaxial de carga repetida em paralelo com os parâmetros obtidos com o ensaio de Hamburgo.
- c) Comparar os resultados de ensaios realizados em trechos experimentais utilizando barra laser e treliça metálica.

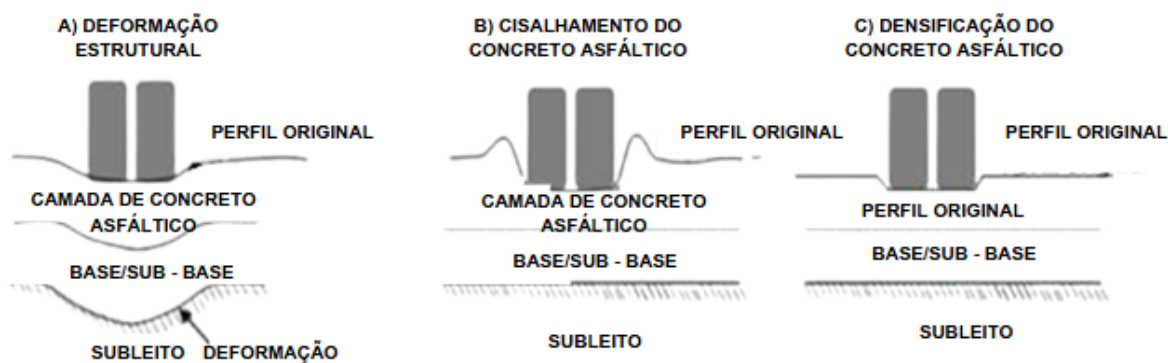
## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, serão apresentados os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do estudo comparativo de três tipos distintos de misturas asfálticas produzidas em usina e aplicadas em trechos experimentais, bem como de misturas replicadas em laboratório, diferenciadas principalmente pelos ligantes asfálticos utilizados. Serão abordados aspectos relacionados aos materiais constituintes das misturas, influência dos agregados e ligantes, bem como do tráfego e do ambiente, além de métodos de avaliação em laboratório, com ênfase na análise da deformação permanente.

### 2.1 DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM REVESTIMENTOS

A deformação permanente pode desenvolver – se em qualquer uma das camadas que compõe a estrutura do pavimento, em decorrência da ação do tráfego veicular combinada com fatores ambientais (Barros, 2017). Bastos (2016), afirma que este defeito se caracteriza pelo surgimento de depressões longitudinais nas trilhas de roda, cujo acúmulo tende a aumentar com a ação repetida das cargas geradas pela ação dos veículos. Segundo Faccin (2018), as três principais formas básicas de deformação permanente são: deformação estrutural, cisalhamento da camada de revestimento asfáltico e densificação do concreto asfáltico, como apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de deformação permanente em pavimentos flexíveis



Fonte: Adaptado de Thao e Luu (2016)

De acordo com Barros (2017), a deformação estrutural envolve todas as camadas do pavimento, de modo que as camadas inferiores da estrutura do pavimento, como a base, sub-base e subleito, não apresentam aptidão para suportar as cargas aplicadas, resultando em afundamentos permanentes, ondulações ou recalques visíveis na superfície. Para Moura (2010), a deformação devido ao cisalhamento da camada de revestimento asfáltico pode ser definida como sendo o afundamento da parte mineral que compõe a mistura, decorrente da densificação de ruptura por cisalhamento.

Já a densificação do concreto asfáltico, é caracterizada pela redução de volume da camada asfáltica, sendo consequência da compactação provocada pela ação do tráfego (Wesseling, 2005). Diante disso, a densificação em pavimentos pode ser controlada de forma adequada na etapa da compactação da infraestrutura, aprimorando a resistência ao cisalhamento (DNIT, 2006). Para Bastos (2024), as deformações permanentes podem não estarem relacionadas diretamente ao carregamento, mas sim, é possível ocorrerem devido à subleitos formados por solos expansivos ou colapsáveis. A deformação permanente gera afundamentos irreversíveis na superfície do pavimento, comprometendo sua qualidade funcional em termos de conforto e segurança no rolamento (Bastos, 2024). Além disso, Thiel (2023) complementa mencionando que os revestimentos asfálticos com defeitos causam danos aos veículos, acelerando o desgaste de componentes mecânicos e elevando os custos com manutenção.

Desse modo, Costa (2018) e Choi (2013) citam que a formação de sulcos no concreto asfáltico resultante da deformação permanente, ainda que não represente, necessariamente, falhas estruturais de grande gravidade, faz com que haja o acúmulo de água nos sulcos reduzindo o coeficiente de atrito dos pneus dos veículos com a superfície da via, o que podem comprometer a segurança viária, especialmente sob chuva intensa, devido ao risco de aquaplanagem e redução da visibilidade causada por respingos.

Thao e Luu (2016) complementam destacando que a segurança viária é significativamente comprometida pela presença de sulcos no pavimento. Esses sulcos tornam a mudança de faixa uma manobra arriscada, aumentando a chance de perda de controle do veículo, especialmente quando há acúmulo de água nas trilhas de roda. Essa condição favorece a ocorrência de derrapagens e

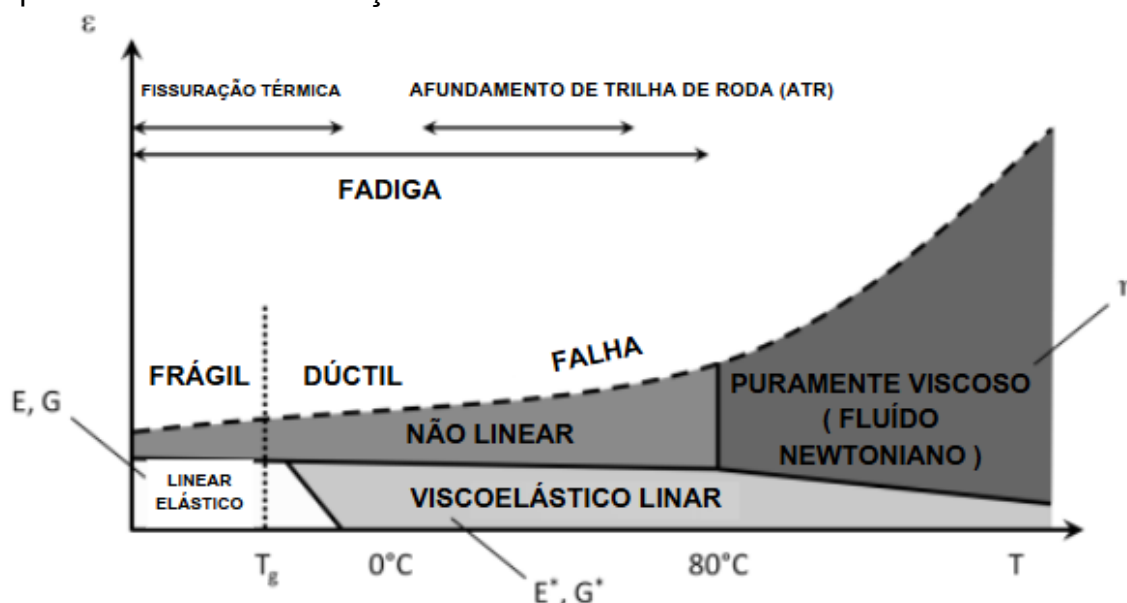
aquaplanagem, além de contribuir para o aumento da distância de frenagem, o que representa um risco potencial para o transporte de pessoas.

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Um dos principais fatores que influenciam a deformação permanente é o tipo e o teor do ligante asfáltico, cujo desempenho pode variar entre ligantes convencionais e modificados. Os agregados também exercem papel fundamental, destacando-se por suas propriedades mecânicas, como na distribuição granulométrica, forma e textura superficial (Faccin, 2018).

Além disso, Faccin (2018) expõe que as condições ambientais e de tráfego, como variações de temperatura e a intensidade das cargas aplicadas, também tem efeito sobre o comportamento mecânico do pavimento ao longo do tempo. A influência da temperatura no comportamento mecânico do concreto asfáltico, ocorre conforme mostra o gráfico de temperatura *versus* deformação, apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Comportamento mecânico de materiais asfálticos em função da temperatura versus deformação



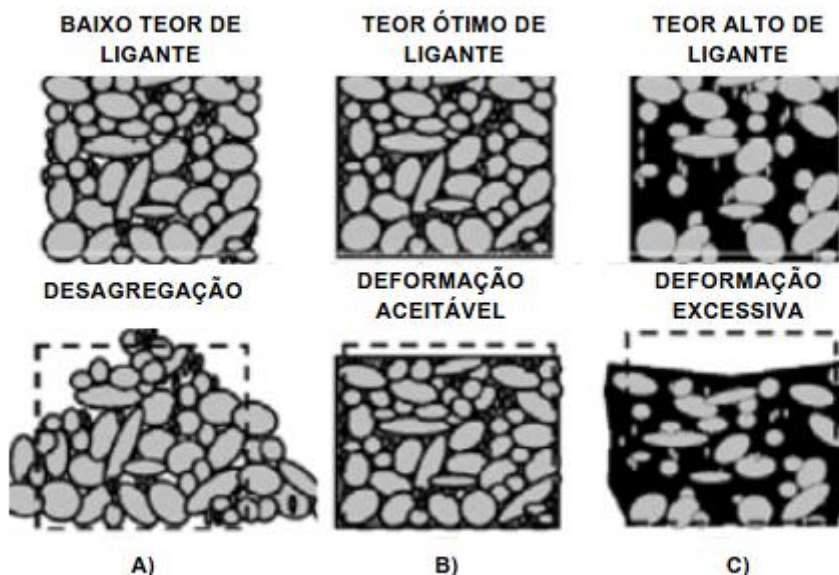
Fonte: Adaptado de Magiaficio (2014)

## 2.2.1 DESEMPENHO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Diversos estudos destacam a relevância dos ligantes asfálticos na melhoria da resistência à deformação permanente. Entre os principais fatores que influenciam esse desempenho estão a viscosidade, o teor de ligante e a presença de modificações em sua composição (Faccin, 2018).

Com vista na viscosidade, os asfaltos de menor viscosidade tornam a mistura mais rígida e, portanto, mais suscetíveis à deformação irreversível (Mahboub e Little, 1988). Diversas literaturas, como nos trabalhos Moura (2010) e Rodrigues (2022), mostram que o teor ótimo de ligante não pode ser nem excessivo, nem insuficiente, pois é necessário encontrar um equilíbrio ideal para garantir o desempenho adequado da mistura asfáltica. Na Figura 3 é visualizado o comportamento da mistura asfáltica com diferentes teores de betume.

Figura 3 – Comportamento de misturas com diferentes teores de ligante asfáltico



Fonte: Adaptado de *shell bitumem* (2016)

Conforme Moura (2010), a manutenção do teor de ligante próximo ao valor ótimo contribui para o aumento da rigidez da mistura asfáltica. No entanto, quando esse teor é excedido, pode haver redução da rigidez e aumento significativo do risco

de ocorrência de deformações irreversíveis. Rodrigues (2022) observa que concentrações reduzidas de ligante comprometem o recobrimento adequado dos agregados, resultando em deficiência de coesão na mistura.

De acordo com Sohm (2011), essa condição reduz a adesão entre os materiais e aumenta a quantidade de vazios na estrutura, o que, por sua vez, diminui a resistência ao atrito e a coesão do esqueleto granular, tornando a mistura mais suscetível à deformação permanente após o processo de compactação.

Para Nascimento (2008), a ocorrência da deformação permanente em revestimentos asfálticos é mais frequentes durante os meses do verão, em comparação com o período de inverno. Pois os ligantes que apresentarem Performance Grade (PG) mais elevado, poderão gerar misturas asfálticas mais resistentes com relação à deformação permanente (Onofre *et al.*, 2013).

Em relação ao ligante asfáltico, Bernucci *et al.*, (2022) afirmam que, embora esse material apresente baixa reatividade química, ele está sujeito ao envelhecimento ao longo do tempo em função da oxidação lenta provocada pela exposição ao ar e à água. Segundo Marcon (2016), esses fatores reforçam a importância de se estudar as propriedades dos concretos asfálticos modificados, com ênfase em sua reologia, dada a influência direta sobre a resistência à deformação permanente.

Os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) convencionais, embora cumpram sua função, têm sido gradualmente substituídos pelos asfaltos modificados por polímeros (AMP), devido à sua baixa resistência às variações de tráfego e às condições climáticas (Fontoura, 2023). A modificação presente na formulação de misturas asfálticas vem se destacando nas rodovias, em especial em vias de intenso tráfego de cargas e em climas adversos.

Fang *et al.* (2013) e Almeida Júnior (2016) ressaltam que a modificação do ligante asfáltico é necessária para aprimorar seu desempenho frente a variáveis como sensibilidade térmica, adesividade, resistência à oxidação e durabilidade. Assim, o tipo de modificação adotado impacta diretamente o comportamento da mistura quanto ao acúmulo de deformações permanentes. Bernucci *et al.*, (2022) também concluem que os ligantes que apresentam maior compatibilidade com polímeros são aqueles com melhor capacidade de interação química com os aditivos, dentre os polímeros mais utilizados na pavimentação, destacam-se os elastômeros, plastômeros e a borracha proveniente de pneus inservíveis.

Rosa Júnior (2000) fala que os asfaltos modificados por polímeros são ligantes resultantes da incorporação de polímeros ao ligante asfáltico, seja por meio de mistura mecânica ou por reação química. Segundo Pereira (2020), existem dois métodos utilizados para a incorporação de modificantes ao ligante asfáltico: a via úmida e a via seca.

Pereira (2020) explica que na via úmida, os modificantes são previamente misturados ao ligante em um processo industrial controlado, que envolve aquecimento e agitação adequada para garantir a homogeneidade do material. Já na via seca, os modificantes são adicionados diretamente no misturador, juntamente com os agregados aquecidos. Nesse processo, os modificantes se distribuem entre os agregados, com material preparado para a adição posterior do ligante, que encontra a mistura com viscosidade adequada para sua incorporação. Esses dois processos podem ser melhor entendidos pela Figura 4.

Figura 4 - Processos de incorporação de polímeros em misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Ben Zair *et al.* (2021)

Manoel (2015) aborda a reologia e as propriedades mecânicas dos polímeros, onde os polímeros apresentam um comportamento dependente do tempo e da temperatura, sendo simultaneamente viscosos e elásticos, característica conhecida como viscoelasticidade. Dessa forma, esses materiais possuem a capacidade de escoar, como um fluido, e ao mesmo tempo acumular deformações recuperáveis, como um sólido elástico, sob diferentes condições de carregamento.

Lucena (2005) fala em seu trabalho que os ligantes modificados por polímeros tendem a apresentar uma rigidez estática mais elevada em baixas temperaturas do

que a ideal. No entanto, mesmo com essa maior rigidez, esses ligantes podem não apresentar trincas devido à sua capacidade de deformar sem se romper em temperaturas reduzidas.

## 2.2.2 DESEMPENHO DOS AGREGADOS MINERAIS FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Os agregados minerais desempenham um papel essencial nas misturas asfálticas, sendo determinantes para o desempenho do pavimento frente às patologias. De acordo com Gouveia (2002), a estabilidade dessas misturas pode ser aprimorada por meio da utilização de agregados com propriedades físico-mecânicas adequadas. Segundo Pazos *et al.*, (2015), os agregados correspondem a aproximadamente 80 a 90% do volume total das misturas asfálticas, exercendo influência significativa sobre o comportamento global do revestimento. Nesse contexto, Almeida Júnior (2016) destaca que os agregados são responsáveis por suportar as cargas aplicadas ao pavimento e transferi-las para as camadas inferiores, especialmente em situações em que o ligante se encontra próximo à sua temperatura de amolecimento.

Conforme Almeida Júnior (2016) aborda, as principais características dos agregados que influenciam a resistência à deformação permanente são a textura superficial, a distribuição granulométrica, a forma e o tamanho das partículas, essas características são compreendidas na Figura 5.

Figura 5 - Propriedades dos minerais



Fonte: Diógenes (2018)

No que contempla a distribuição granulométrica, Andrade *et al.*, (2020), escreve que essa propriedade exerce um papel fundamental no desempenho das

misturas asfálticas, pois afeta diretamente sua resistência ao deslocamento induzido por cargas repetidas.

Segundo Al Rousan (2004), a textura superficial dos agregados influencia diretamente a resistência das misturas asfálticas, ao afetar o atrito entre partículas e a adesão com o ligante, sendo essencial para a estabilidade da estrutura sob o efeito de cargas repetidas. Como destacado por Gouveia (2002), a forma ideal dos agregados para utilização em misturas de concreto asfáltico é a cúbica, uma vez que partículas alongadas e achatadas são inadequadas para esse tipo de aplicação.

### 2.2.3 INFLUÊNCIA DO TRÁFEGO FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Lima *et al.*, (2015) escreveram que a deformação permanente é pontualmente relacionada ao histórico das tensões, e a sua origem dá-se pela mecânica dos pavimentos, seja na flexão frequente ou na compressão provocada pelo tráfego. Essa parcela de deformação total desencadeada na infraestrutura contribui para o desenvolvimento da deformação plástica (permanente).

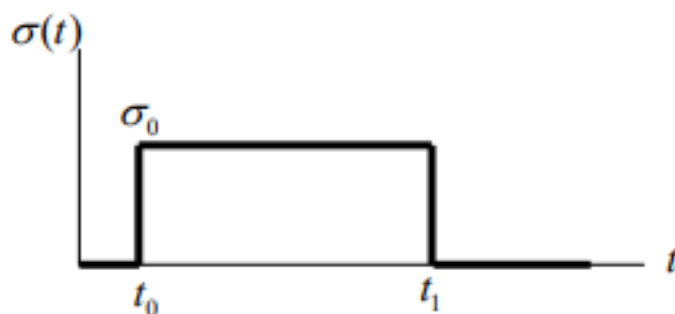
Boeira (2018) ressalta que o desempenho dos pavimentos asfálticos tem se mostrado insatisfatório, resultado de fatores, como o aumento do tráfego de veículos pesados, o crescimento das cargas e a elevação da pressão de enchimento dos pneus, esses aspectos contribuem para a formação de defeitos como deformações permanentes nas trilhas de roda. Para Moura (2010), ainda que infraestruturas projetadas com qualidade e misturas asfálticas corretamente dosadas, o aumento de carga vindo de rodas, e também o aumento da pressão de inflação de pneumáticos, contribuem para o surgimento de defeitos como deformações permanentes nas trilhas de roda.

Para Barros *et al.*, (2015) o defeito de deformação permanente surge de forma prematura, esse efeito torna-se banal nas faixas viárias onde as velocidades são reduzidas. Além disso, é agravado ainda mais sob ação de frenagem e aceleração, situações comumente presente nas zonas dos percursos de ônibus em aclives e declives.

De acordo com Woldekidan (2011), durante a ação do carregamento a deformação viscosa do ligante asfáltico tem como resultado uma deformação irreversível quando o carregamento é retirado. Esse evento pode ser relacionado

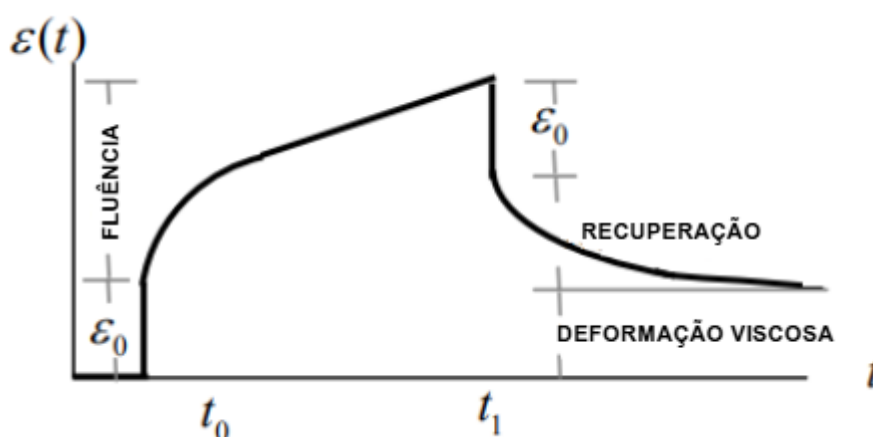
com o carregamento dos veículos, conforme mostrado na Figura 6, e com a resposta do ligante asfáltico, como pode ser verificado na Figura 7.

Figura 6 - Ação do carregamento



Fonte: Woldekidan (2011)

Figura 7 - Resposta do material viscoelástico



Fonte: Adaptado de Woldekidan (2011)

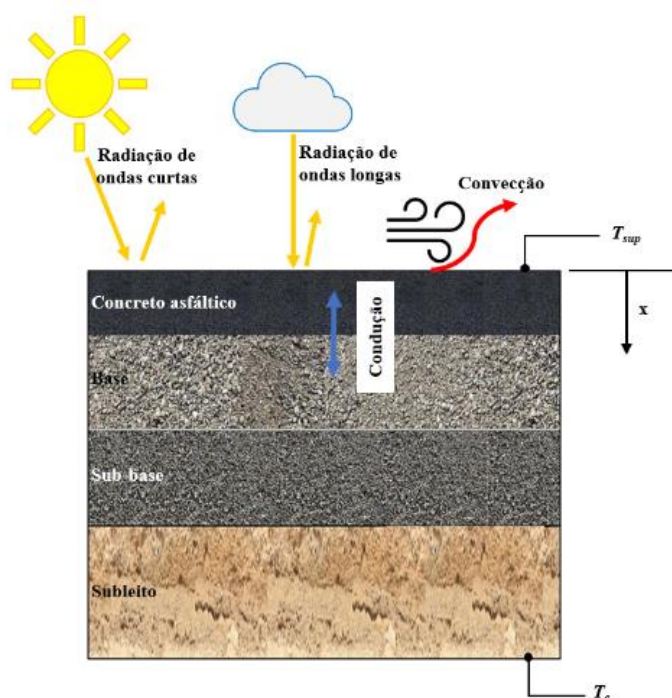
#### 2.2.4 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE FRENTE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Com relação às características do ambiente, Cravo (2016) ressalta que o processo de degradação dos revestimentos asfálticos está associado à exposição ao oxigênio, à radiação na faixa ultravioleta-visível (UV-VIS) e às variações térmicas.

Faxina (2006) explica que devido às limitações dos parâmetros tradicionais de suscetibilidade térmica, torna-se necessária uma abordagem mais fundamentada, pois a maioria dos materiais viscoelásticos, incluindo os ligantes asfálticos, é classificada como termorreologicamente simples. Na Figura 8 pode – se observar o

balanço térmico nas camadas asfálticas, onde os principais mecanismos de transferência de calor atuam sobre as camadas do pavimento durante sua exposição às condições ambientais.

Figura 8 - Representação esquemática da transferência de calor entre o pavimento e o ambiente



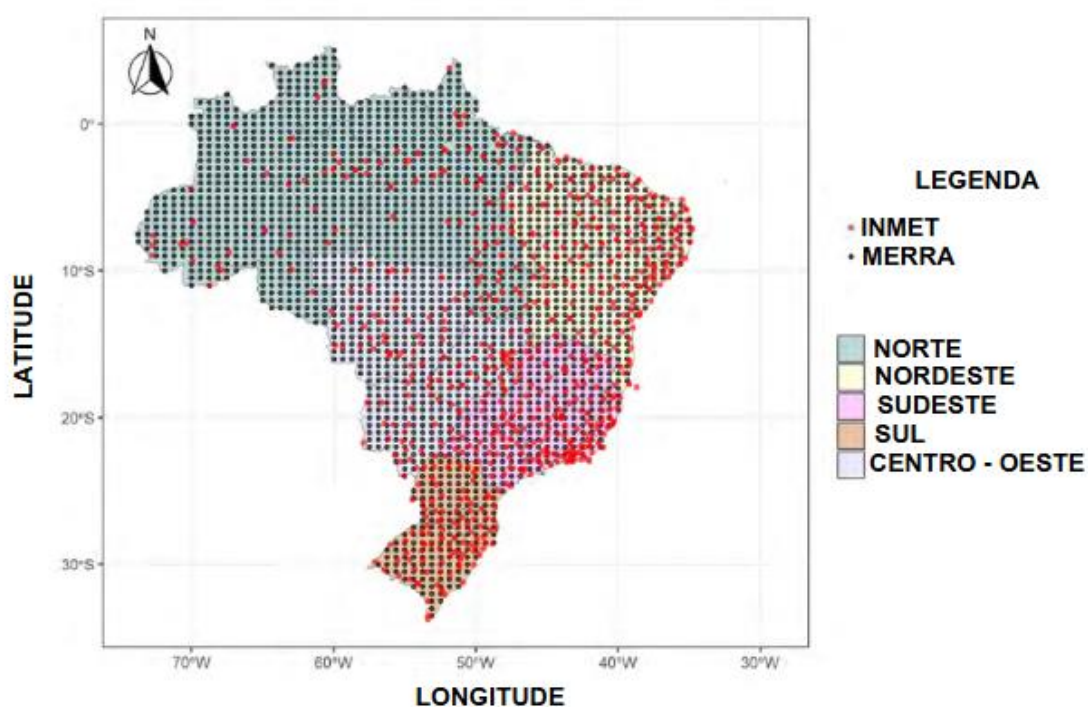
Fonte: Faccin *et al.*, (2024)

Brito e Heller (2017), explicam que a temperatura tem influência na deformação permanente e afeta a rigidez do asfalto, dessa forma, prejudica o módulo de elasticidade da mistura de concreto asfáltico. Além disso, Ferreira (2017) relata em seu trabalho que as altas temperaturas também contribuem para este defeito, onde o ligante asfáltico se torna menos viscoso, reduzindo o intertravamento dos agregados e comprometendo a estrutura da mistura.

Para Souza *et al* (2022), a camada de revestimento dos pavimentos asfálticos é constituída por materiais betuminosos, cuja resposta mecânica é altamente sensível às variações das condições climáticas. Entre os agentes ambientais, a temperatura exerce influência significativa nas propriedades reológicas e no desempenho funcional desses materiais ao longo da vida útil do pavimento. Faxina (2006) fala em seu estudo que na temperatura ambiente, os ligantes asfálticos apresentam comportamento viscoelástico, entretanto, sob condições extremas, os

ligantes podem se comportar como um sólido elástico estando em situações de baixa temperatura, ou como um líquido viscoso quando submetidos a altas temperaturas. Com isso, está representada na Figura 9, 723 estações meteorológicas de superfície ativas do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), e os 2.278 centroides das células do MERRA-2 localizados no Brasil.

Figura 9 - 723 estações meteorológicas de superfície ativas do INMET e 2.278 centroides das células do MERRA – 2



Fonte: Apadapado de Faccin (2024)

Para Jung (2006), além da influência da temperatura, outro fator ambiental de grande relevância para o desempenho dos ligantes asfálticos é a oxidação. A oxidação do ligante asfáltico em campo é analisada com o objetivo de avaliar o grau de endurecimento ocorrido durante a vida útil do pavimento, possibilitando a comparação com os níveis de envelhecimento obtidos em condições controladas de laboratório.

Outro aspecto relevante a ser considerado é o dano causado pela ação da umidade nas misturas asfálticas, Caro *et al.*, (2008) falam que defeitos como a deformação permanente são de forma significativa agravados pela presença de água nas camadas do pavimento. De forma mais específica, esse tipo de dano está diretamente relacionado à qualidade da adesão entre o ligante asfáltico e os

agregados (Moura, 2021). Furlan (2006) discute que os danos provocados pela umidade não são considerados um modo específico de ruptura, mas sim um fator que condiciona e acelera outros mecanismos de degradação devido à presença de água. Esse processo pode potencializar a ocorrência de deformação permanente, especialmente sob a forma de afundamentos nas trilhas de roda, além de contribuir para o surgimento de trincas por fadiga e processos de desagregação, que podem evoluir para defeitos mais severos, como buracos e panelas.

Yu *et al.*, (2019) abordam que na fase de construção e durante a vida útil do pavimento, essa estrutura é exposta à luz solar e à radiação ultravioleta (UV). A radiação UV se concentra como ação nas camadas superficiais do pavimento, desenvolvendo reações de foto-oxidação no concreto asfáltico com uma penetração que chega a uma profundidade de 4 a 5 micrômetros (Gómez *et al.*, 2016). Ainda com base nos resultados obtidos pelos autores (Gómez *et al.*, 2016), observaram que o aumento do tempo de envelhecimento provocou elevações significativas na medida da rigidez nas amostras, atingindo o dobro dos valores verificados nas misturas não envelhecidas. No que diz respeito à deformação permanente, o envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta (UV), realizado em câmara específica, reduziu 11 anos de desempenho frente à deformação permanente.

### 2.3 AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE NO LABORATÓRIO

Para começar dissertando sobre os métodos de avaliação da deformação permanente, Carvalho (2018) mostra em seu trabalho que existem métodos empíricos de reologia utilizados na avaliação de ligantes asfálticos, como os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade *Saybolt Furol*, recuperação elástica e ductilidade. Embora a maioria desses métodos seja considerada tradicional, ainda são amplamente empregados no Brasil devido à sua simplicidade e aplicabilidade prática.

A fim de avaliar o comportamento das misturas asfálticas frente à deformação permanente, são amplamente utilizados ensaios laboratoriais que simulam as condições de carregamento aplicadas no pavimento. Borges e Soares (2014) falam sobre a previsão da deformação permanente em revestimentos asfálticos, onde é empregado o ensaio de *creep* dinâmico, cujos resultados são

expressos por meio do parâmetro denominado *Flow Number* (FN). Este ensaio é realizado no aparelho de carga repetida uniaxial mostrado na Figura 10.

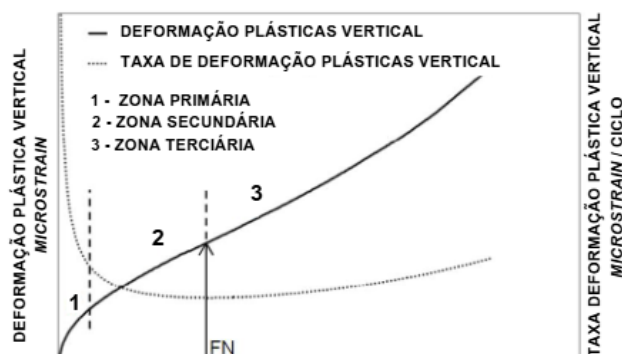
Figura 10 - Aparelho de carga repetida uniaxial



Fonte: NORMA DNIT 184/2018

Entretanto, os modelos que utilizam o *Flow Number* como variável de entrada não contemplam de forma adequada a principal fase do comportamento viscoelástico observado no ensaio, conhecida como região secundária, caracterizada pela taxa de deformação constante. O *Flow Number* corresponde ao número de ciclos na curva de deformação plástica vertical acumulada em que se inicia a região terciária. Este ponto é definido como ponto em que a taxa de deformação atinge seu valor mínimo durante o ensaio uniaxial de carga repetida, como descrito na Figura 11, a transição da fase secundária para a terciária indica o início do mecanismo de ruptura da mistura asfáltica, associado ao cisalhamento sob condição de volume constante (DNIT 184, 2018).

Figura 11 - Taxa de deformação plástica vertical uniaxial mínima



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16505 (2016)

Segundo a ABNT NBR 16505:2016, o parâmetro desta forma de avaliação é o ensaio de resistência à deformação permanente, realizado por meio do método uniaxial de carga repetida que consiste na aplicação de esforços compressivos uniaxiais, de forma cíclica, sobre corpos de prova cilíndricos confeccionados com mistura asfáltica. Cada ciclo de carregamento é composto por um pulso de carga de 0,1 segundos até uma carga limite de  $204 \pm 4$  kPa, seguido de um intervalo de repouso com duração igual a 0,9 segundos, permitindo a simulação das condições reais de carregamento que ocorrem no pavimento devido ao tráfego. A medição da deformação plástica vertical acumulada é realizada ao final de cada período de repouso, utilizando no mínimo dois transdutores de deslocamento axial, posicionados na região central da superfície lateral do corpo de prova. O ensaio é conduzido sob uma temperatura controlada de  $60,0 \pm 0,5$  °C, que representa condições críticas de serviço, nas quais a mistura asfáltica apresenta maior suscetibilidade à deformação permanente.

A análise inicial dos resultados de *Flow Number* baseia-se na Tabela 1, desenvolvida por Nascimento (2014), que classifica os valores obtidos de acordo com o número de repetições de carga de tráfego recomendado para cada N de projeto da via. Essa organização em diferentes classes permite avaliar a adequação da mistura asfáltica ao N de projeto da via.

Tabela 1 – Resultados de *Flow Number*

Classe	<i>Flow Number</i> (ciclos)	N (condições normais)	N (condições severas)
1	FN > 100	$N < 10^6$	Não recomendado
2	$100 \leq \text{FN} < 300$	$10^6 \leq N < 10^7$	$N < 10^6$
3	$300 \leq \text{FN} < 750$	$10^7 \leq N < 10^8$	$10^6 \leq N < 10^7$
4	$750 \leq \text{FN} < 2000$	$N \geq 10^8$	$10^7 \leq N < 10^8$
5	FN $\geq 2000$	-	$N \geq 10^8$

Fonte: Nascimento (2014)

Outro método utilizado para prever a formação de sulcos longitudinais, é o teste de trilha de rodas em Hamburgo de misturas asfálticas compactadas. Segundo a norma AASHTO T 324 – 23 (2023), este método consiste em avaliar a formação

de trilhas de deformação e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas por meio do ensaio no dispositivo de trilhas de rodas de Hamburgo.

Ainda seguindo a norma AASHTO T 324 – 23 que regulamenta o ensaio *Hamburg Wheel Tracking Test*, o método compreende submeter a mistura asfáltica, previamente compactada e submersa, a um ensaio no dispositivo de roda rolante de movimento alternado. Esse ensaio tem como objetivo avaliar a taxa de deformação permanente provocada pela ação de uma carga concentrada em movimento. Este simulador de laboratório é denominado *Hamburg Wheel Tracking Device* (Figura 12).

Figura 12 - *Hamburg Wheel Tracking Device*



Fonte: Autoria própria (2025)

Segundo autores como Rath *et al.* (2021), explicam a importância de avaliar misturas asfálticas modificadas utilizando o ensaio de Hamburgo, onde relataram o desempenho satisfatório no ensaio de roda de Hamburgo ao avaliar a resistência à deformação permanente de misturas com ligante modificado por borracha, observando uma redução do afundamento de 20 mm, no material convencional, para apenas 5 mm na mistura modificada.

Rosa *et al.* (2023), também utilizaram o teste para avaliar o desempenho da mistura asfáltica com a incorporação de pó de borracha ao ligante. Onde elevou significativamente a resistência da mistura à deformação permanente, visto que o teste permitiu observar a redução do afundamento no ensaio de 8,89 mm para 4,54 mm.

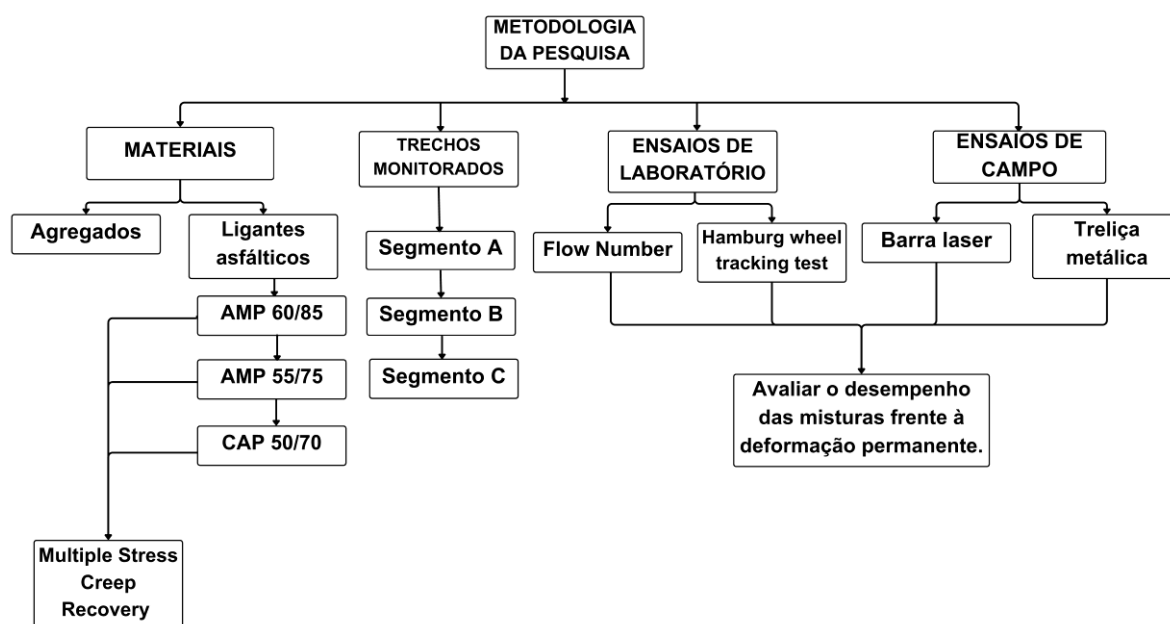
### 3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta os procedimentos que foram seguidos para a condução do trabalho de conclusão de curso na qual envolve a análise da deformação permanente em diferentes misturas asfálticas, onde avaliou-se tanto em campo quanto em laboratório. Os materiais utilizados que compõem as misturas asfálticas são do tipo CAP 50/70, AMP 60/85 e AMP 55/75, além dos agregados.

A metodologia expõe a execução do ensaio *Hamburg Wheel Tracking Test* que faz a comparação com resultados já definidos do ensaio laboratorial *Flow Number* obtidos por Santos (2025), alinhados com a obtenção de dados de campo feita nos trechos definidos com a utilização da treliça metálica e barra laser.

Com suporte para a análise, também foram considerados os resultados do ensaio reológico *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), obtidos por Pacheco (2024) os quais fornecem parâmetros como o módulo de fluência não recuperável (Jnr), utilizado para estimar o desempenho dos ligantes frente à deformação permanente. A organização das atividades pode ser observada na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria (2025)

### 3.1 TRECHOS MONITORADOS

Em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo DNIT (2020), e o Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa, foram estabelecidos três segmentos experimentais para serem monitorados ao curso da rodovia BR-116, situados à 84 km de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul. Os trechos citados neste trabalho são os mesmos escolhidos e analisados na tese de doutorado de Santos (2025).

O primeiro trecho experimental, chamado de segmento A está localizado entre as estacas 350+840 e 350+640 (Figura 14). O segundo, chamado de segmento B, engloba o intervalo entre os quilômetros 350+120 e 349+820 (Figura 15). Ao final, o terceiro trecho denominado Segmento C, está situado entre os quilômetros 348+380 e 348+000 (Figura 16).

O fluxo de tráfego existente nos trechos mencionados produz-se no sentido decrescente, como está marcado nas figuras, com isso, determinou-se a sequência decrescente para os segmentos. As camadas dos trechos experimentais estão dispostas na Figura 17.

Figura 14 - Segmento A



Fonte: Adaptado de Santos (2025)

Figura 15 - Segmento B



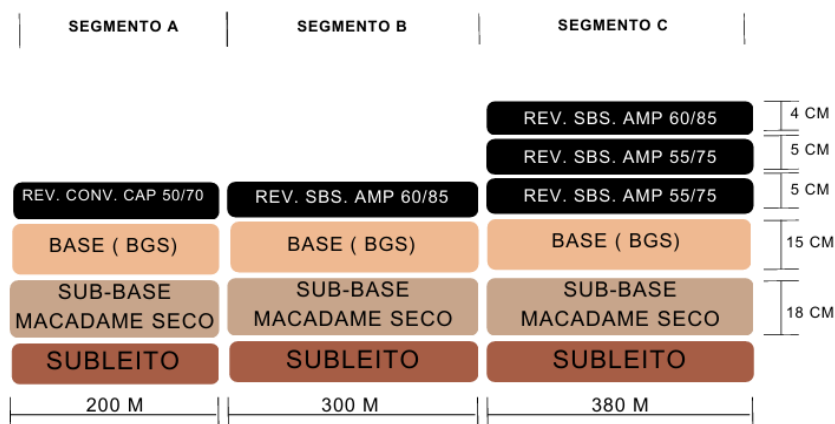
Fonte: Adaptado de Santos (2025)

Figura 16 - Segmento C



Fonte: Adaptado de Santos (2025)

Figura 17 - Perfis transversais dos trechos experimentais.



Fonte: Autoria própria (2025)

## 3.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO

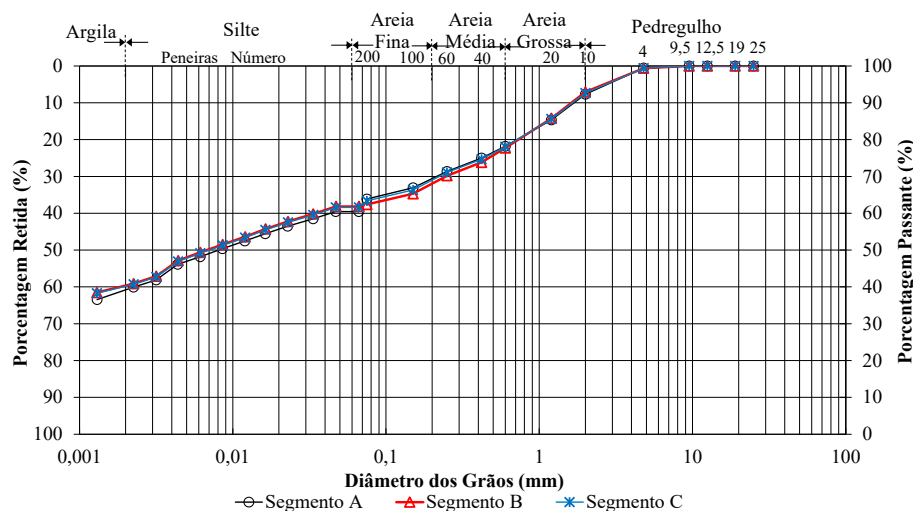
Santos (2025) explica que para a fundação do pavimento composto por subleito, foram feitos os procedimentos laboratoriais para a caracterização do solo de todos os trechos analisados, para a sub-base e base foram estabelecidas a origem e britagem dos materiais rochosos e no revestimento, a produção das misturas asfálticas, seja com ligante convencional ou ligante modificado.

### 3.2.1 SUBLEITO, SUB-BASE E BASE

Para a caracterização do subleito, foram coletadas amostras do solo que compreende as três extensões monitoradas, e efetuados ensaios de granulometria por sedimentação na fração fina e por peneiramento na fração mais espessa seguindo a NBR 7181 (2016). De acordo com as curvas de granulometria na Figura 18, pode-se concluir que os solos dos trechos apresentam características granulométricas idênticas.

Além da granulometria, constatou-se que as demais características dos solos coletados nos três segmentos, como massa específica, Limites de Atterberg e umidade ótima são análogas, podendo ser considerado o mesmo solo nos três trechos. Assim, classificou-se o solo na metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) em LG', ou seja, é um solo argiloso de comportamento laterítico (Santos, 2025).

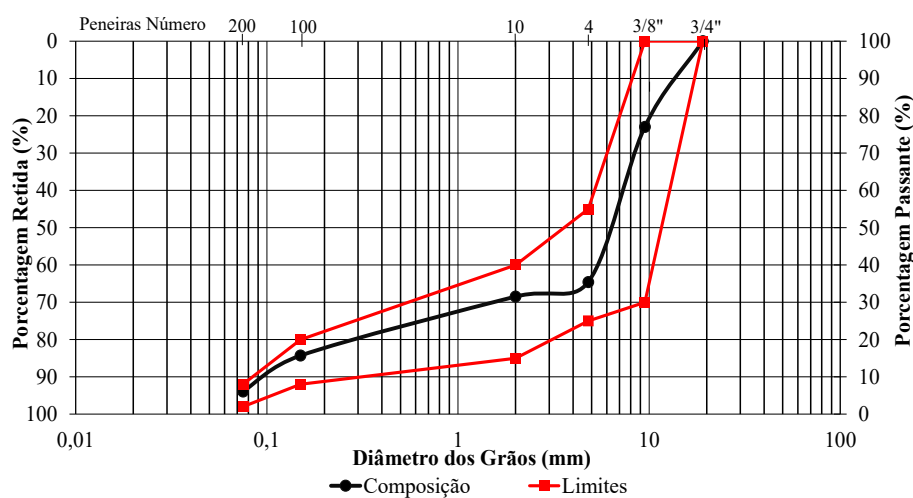
Figura 18 - Curva granulométrica do solo dos Segmentos A, B e C



Fonte: Santos (2025)

A sub-base é composta por material oriundo da jazida situada nas instalações de britagem do 1º Batalhão Ferroviário de Guaíba. O material é tanto na forma de material graúdo (macadame seco), classificado na faixa de 2 a 4 polegadas, quanto no material de enchimento, constituído por uma combinação de 55% de pedrisco e 45% de pó de brita. É apresentada na Figura 19 a curva granulométrica do material de enchimento, enquadrada na Faixa I, conforme especificado no projeto executivo EC-P-01.

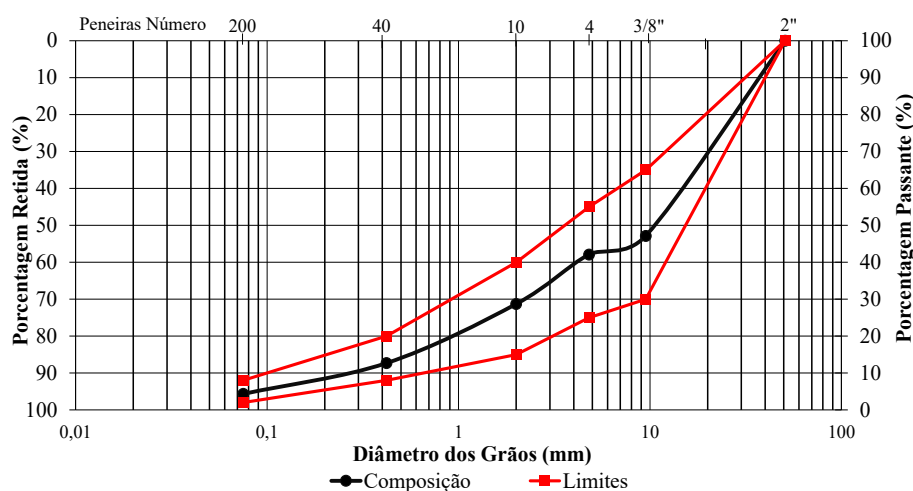
Figura 19 - Curva granulométrica do material de enchimento da sub-base



Fonte: Adaptado de Brasil (2019a)

Já o material utilizado na base é proveniente da jazida localizada na Estrada Monte Alegre, no distrito de Bom Retiro, cidade de Eldorado do Sul. O projeto da base foi elaborado pelo 1º Batalhão Ferroviário de Guaíba, adotando-se a utilização de Brita Graduada Simples (BGS), a composição da BGS consistiu em 27,5% de brita 2", 27,5% de brita 3/4" e 45% de pó de pedra, atendendo aos requisitos granulométricos da Faixa A estabelecida pela norma DNIT-ES 141 (2022). A curva granulométrica da mistura encontra-se representada na Figura 20.

Figura 20 - Curva granulométrica da mistura de BGS da camada de Base



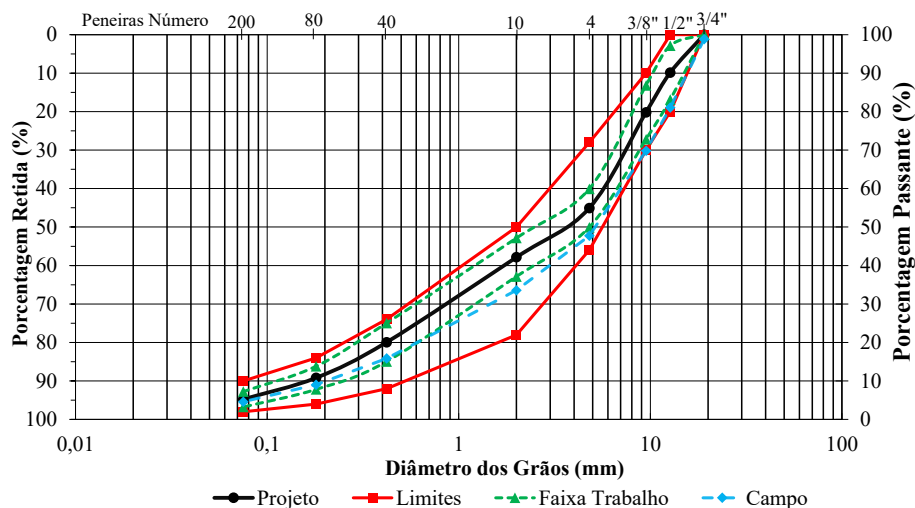
Fonte: Adaptado de Brasil (2019b)

### 3.2.2 REVESTIMENTOS

Santos (2025) inclui que a camada de revestimento do segmento A foi produzida com agregados com origem da britagem do 1º Batalhão Ferroviário de Guaíba. Esses agregados seguiram a Faixa C da norma DNIT-ES 031 (2006), sendo integrados ao CAP 50/70 disponibilizado pela Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP). Seu teor de ligante especificado no projeto foi de 4,9%.

Diante disso, realizou-se a coleta da mistura asfáltica aplicada em campo para verificação granulométrica. A granulometria se situou próxima ao limite inferior da faixa de especificação, porém dentro dos limites de tolerância, atendendo aos requisitos estabelecidos, como mostrado na Figura 21. Os resultados dos agregados e da mistura deste trecho estão dispostos na Tabela 2.

Figura 21 - Curva granulométrica da mistura asfáltica de projeto e de campo do Segmento A



Fonte: Santos (2025)

Tabela 2 - Resultados dos agregados e da dosagem da mistura do Segmento A

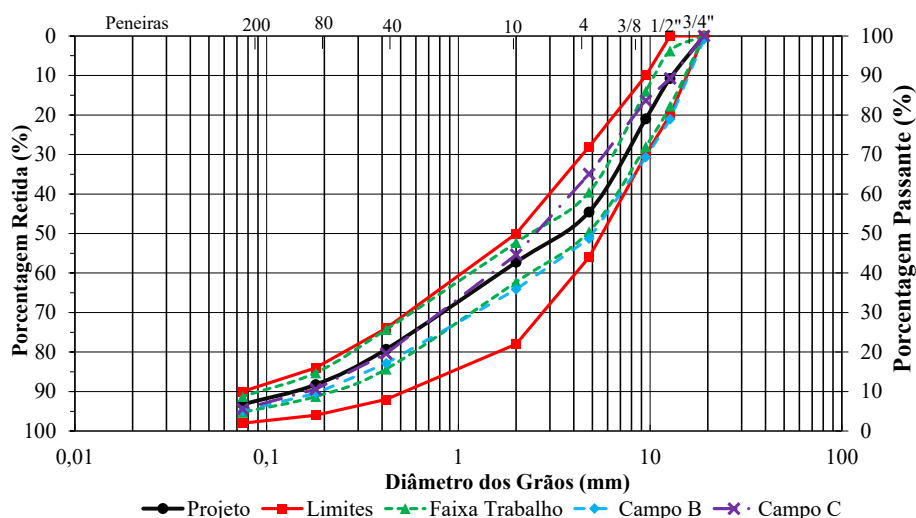
ENSAIO	NORMA	RESULTADO
Equivalente de Areia da Mistura (%)	DNER-ME 054 (1997)	61,19
Índice de Forma – Brita 1 (3/4")	DNER-ME 086 (1994)	0,95
Índice de Forma – Brita 0 (3/8")	DNER-ME 086 (1994)	0,77
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035 (1998)	36
Durabilidade (%)	DNER-ME 089 (1994)	1,21
Absorção (%)	DNER-ME 081 (1998)	0,80
Densidade Efetiva da Mistura Mineral (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 081 (1998)	2,635
Densidade Relativa Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT-ME 428 (2022)	2,355
Densidade do Ligante (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193 (1996)	1,015
Teor de ligante da mistura (%)	DNER-ME 053 (1994)	4,9
Densidade Máxima Medida (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT-ME 427 (2020)	2,439
Volume de Vazios – VV (%)	DNER-ME 043 (1995)	3,44
Relação Betume Vazios – RBV (%)	DNER-ME 043 (1995)	76,85
Resistência à Tração (MPa)	DNIT-ME 136 (2018)	0,75
Estabilidade Marshall (kgf)	DNER-ME 043 (1995)	1138,12

Fluência (mm)	DNER-ME 043 (1995)	3,73
Adesividade (CBB DOP) (%)	DNER-ME 078 (1994)	0,1

Fonte: Santos (2025)

Para a execução do revestimento do segmento B, utilizou-se o ligante AMP 60/85, fornecido pela distribuidora GRECA, a qual adquire o CAP base da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), realiza sua modificação e posteriormente comercializa o produto final, no qual trata-se de um ligante asfáltico modificado por polímero do tipo Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). Neste ligante, AMP 60/85, foram incorporados agregados provenientes da instalação de britagem do 1º Batalhão Ferroviário de Guaíba, sendo utilizada a norma DNIT-ES 031 (2006) para a definição da faixa granulométrica da mistura asfáltica, enquadrando-a na Faixa C, onde a curva granulométrica correspondente encontra-se na Figura 22.

Figura 22 – Curva granulométrica da mistura asfáltica de projeto dos Segmentos B e C, da mistura de campo do Segmento B e da terceira camada do campo do Segmento C



Fonte: Santos (2025)

Foi coletada a mistura em campo e, com base na amostra coletada, foi determinada a Densidade Máxima Medida (DMM) da mistura pelo método RICE, conforme a norma DNIT-ME 427 (2020), obtendo-se o valor de 2,481 g/cm<sup>3</sup>. Foi determinado o teor de ligante de projeto de 4,7%.

Pelo fato de os agregados utilizados nesta mistura ter a mesma origem dos agregados do Segmento A, as características dos agregados podem ser verificadas na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta os resultados de dosagem da mistura do segmento B e da camada superior do segmento C.

Tabela 3 - Dosagem da mistura do Segmentos B e da camada superior do Segmento C

ENSAIO	NORMA	RESULTADO
Densidade Relativa Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT-ME 428 (2022)	2,351
Densidade do Ligante (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193 (1996)	1,020
Teor de ligante da mistura (%)	DNER-ME 053 (1994)	4,7
Densidade Máxima Medida (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT-ME 427 (2020)	2,436
Volume de Vazios – VV (%)	DNER-ME 043 (1995)	3,5
Relação Betume Vazios – RBV (%)	DNER-ME 043 (1995)	76,0
Resistência à Tração (MPa)	DNIT-ME 136 (2018)	1,75
Estabilidade Marshall (kgf)	DNER-ME 043 (1995)	2033
Fluência (mm)	DNER-ME 043 (1995)	3,0
Adesividade	DNER-ME 078 (1994)	Satisfatório Sem DOP

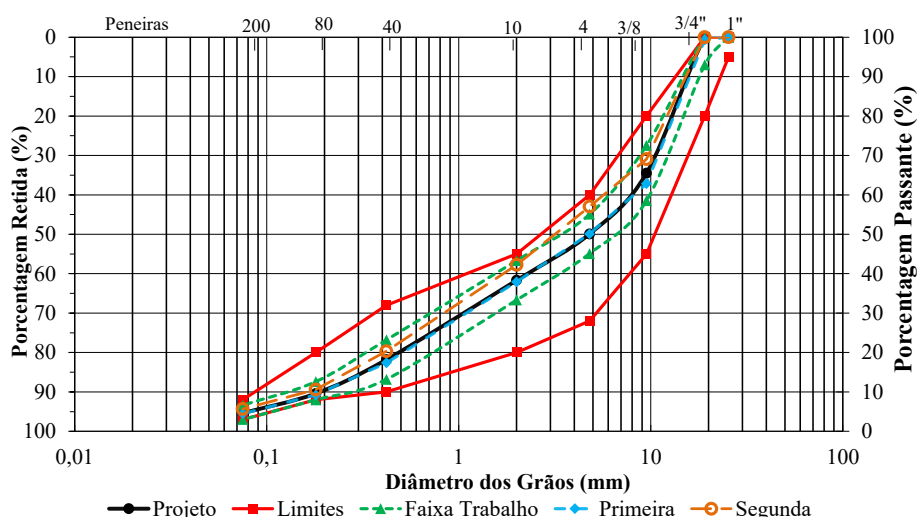
Fonte: Santos (2025)

No segmento C, cumpriu-se os critérios especificados no projeto original da rodovia, sendo o revestimento asfáltico implementado em três camadas, sendo essas camadas construídas com agregados minerais da mesma jazida utilizada nos Segmentos A e B. Portanto, resultou em características mineralógicas iguais, apresentadas na Tabela 2, sendo que a faixa granulométrica da mistura aplicada na camada superior foi enquadrada na Faixa C e as misturas das camadas inferiores de Binder foram enquadradas na Faixa B da norma DNIT-ES 031 (2006).

Além disso, nas duas primeiras camadas foi utilizado o ligante AMP 55/75, um asfalto modificado por polímero elastomérico do tipo Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), com origem na Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) e distribuído pela empresa GRECA, já para a terceira camada, foi empregado o AMP 60/85, também distribuído pela GRECA. Com as misturas coletadas em campo, observou-se que as

duas misturas feitas com AMP 55/75 apresentaram suas curvas enquadrados na faixa granulométrica admissível, como pode ser verificado na Figura 23.

Figura 23 - Curva granulométrica da mistura asfáltica de projeto, da primeira e segunda camada do campo do Segmento C



Fonte: Santos (2025)

O teor de ligante definido em projeto para as misturas feitas com AMP 55/75 foi de 4,3%, e na mistura feita com AMP 60/85 foi de 4,7%. Ademais, as definições da DMM das misturas obtidas foram realizadas conforme a norma DNIT-ME 427 (2020), onde a primeira camada resultou em uma densidade de 2,481 g/cm<sup>3</sup>, no que se refere à segunda camada apresentou a densidade igual a 2,469 g/cm<sup>3</sup> e por fim, a terceira camada obteve a sua densidade no valor de 2,456 g/cm<sup>3</sup>.

Como a mistura da terceira camada tem sua composição equivalente à utilizada no Segmento B, os dados de projeto correspondentes encontram-se na Tabela 4. Já as informações de projeto referentes às misturas aplicadas nas duas primeiras camadas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dosagem da mistura com AMP 55/75 do Segmento C

ENSAIO	NORMA	RESULTADO
Densidade do Ligante (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193 (1996)	1,012
Densidade Relativa Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT-ME 428 (2022)	2,340
Teor de ligante da mistura (%)	DNER-ME 053 (1994)	4,3

Volume de Vazios – VV (%)	DNER-ME 043 (1995)	4,31
Relação Betume Vazios – RBV (%)	DNER-ME 043 (1995)	70,44
Resistência à Tração (MPa)	DNIT-ME 136 (2018)	1,21
Estabilidade Marshall (kgf)	DNER-ME 043 (1995)	1643,21
Fluência (mm)	DNER-ME 043 (1995)	3,07
Adesividade	DNER-ME 078 (1994)	Satisfatório Sem DOP

Fonte: Santos (2025)

### 3.3 MÉTODOS

Para a avaliação da deformação permanente em revestimentos asfálticos, este estudo contempla a análise comparativa entre os resultados obtidos no ensaio de Pista de Hamburgo e resultados provenientes do ensaio de *Flow Number*, juntamente com resultados obtidos em ensaios de campo com barra laser e treliça metálica. No ensaio de Pista de Hamburgo, foram analisadas amostras moldadas em laboratório, tanto com misturas usinadas quanto replicadas em laboratório de amostras de corpos de prova extraídos em campo. Já no ensaio de *Flow Number*, foram utilizadas amostras moldadas em laboratório, usinadas e replicadas, para moldar CPs de cada mistura (CAP 50/70, AMP 60/80 e AMP 55/75).

Juntamente com os ensaios de laboratório, foram realizados ensaios em campo, sendo utilizado o perfilamento por barra laser e a treliça metálica, ambos conduzidos pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) da Universidade Federal de Santa Maria. Dessa forma, a metodologia adotada integra resultados obtidos em laboratório e em campo, permitindo uma análise abrangente do comportamento mecânico das misturas asfálticas frente à deformação permanente.

#### 3.3.1 CONTAGEM DO TRÁFEGO

A partir dos dados do Programa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), adotou-se como base a contagem de tráfego realizada entre 20 a 24 de março de 2023, 25 a 29 de setembro de 2023, 18 a 22 de março de 2024 e 23 a 27 de setembro de 2024. Esse período pode ser considerado representativo por

corresponder a dias úteis em um mês típico, onde não há férias escolares e com a retomada das atividades da população. O levantamento de dados foi feito com intuito de obter dados reais do tráfego da via em questão e poder realizar análises diante das condições existentes do conjunto de materiais que integram a rodovia.

Com esses dados e com a classificação dos veículos em categorias definidas pelo manual de classes veiculares, disponibilizado pelo site do PNCT/DNIT, essa classificação foi executada automaticamente pelo equipamento de contagem da empresa Slice. A partir do número de eixos de cada veículo registrado, elaborou-se a Tabela 5, apresentando o Volume Diário Médio (VDM) de cada classe de veículo (Santos,2025).

Tabela 5 – Volume diário médio

Classe de Veículo	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Média
A	401	466	470	511	520	473,6
B	414	421	467	446	459	441,4
C	274	325	343	309	295	309,2
D	127	129	163	158	131	141,6
E	280	370	347	301	323	324,2
F	63	114	131	96	91	99,0
G	2	0	4	3	2	2,2
H	13	44	56	51	41	41,0
I	3.288	2.521	2.620	2.967	3.389	2.957,0
J	81	63	43	46	62	59,0
L	41	59	49	54	47	50,0
Total	4.984	4.512	4.693	4.942	5.360	4.898,2

Fonte: Santos (2025)

Com os valores apresentados na Tabela 5, torna-se possível correlacionar os dados de tráfego real com o valor do número equivalente de passagem de veículos, de modo que o afundamento em trilha de roda pode ser representado em função do tráfego acumulado.

### 3.3.2 HAMBURG WHEEL TRACKING TEST

Neste ensaio, foram utilizados CPs moldados em laboratório com as misturas usinadas, coletadas em campo, e misturas replicadas em laboratório, além de CPs extraídos da pista. Os CPs moldados já foram feitos com as dimensões e

adequações prontas para o ensaio, já os CPs extraídos da pista precisaram passar pela regularização da face inferior do CP. Na preparação dos CPs extraídos, as amostras já estavam dispostas no laboratório GEPPASV - UFSM, as mesmas encontravam-se protegidas com plástico para evitar o envelhecimento advindo da oxidação procedente do contato com oxigênio conforme a Figura 24.

Figura 24 - Amostras dos segmentos A, B e C



Fonte: Autoria própria (2025)

No procedimento de adequação dos CPs, as amostras foram inseridas em dois modelos de serras elétricas com intuito de retificar a face inferior e por conseguinte, possibilitar ser feito um corte reto em uma das laterais de cada corpo de prova para o encaixe adequado na forma de contenção do dispositivo de ensaio, esses procedimentos podem ser observados nas Figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 - Retificação da face inferior



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 26 - Corte para adaptação ao dispositivo de deformação



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 27 - Medição da espessura do corpo de prova com paquímetro



Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme a Figura 28, em seguida as amostras cilíndricas foram posicionadas no molde fornecido com o dispositivo, o qual confinava aproximadamente metade de sua altura.

Figura 28 - Confinamento de aproximadamente metade da altura das amostras



Fonte: Autoria própria (2025)

O ensaio foi executado através do método de ensaio modo automático, onde foi preciso ajustar a altura do transdutor de deslocamento linear, de acordo com as orientações do equipamento, onde o transdutor é zerado automaticamente no início do teste para cada roda de aço. Com as rodas corretamente posicionadas sobre as amostras, garantindo que a maior parte de sua superfície permaneça em contato com a base, estas são fixadas na forma de montagem conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Roda posicionada sobre as amostras



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a realização do ensaio, o dispositivo Hamburgo foi previamente preparado pelo técnico responsável do laboratório, com o sistema de aquecimento da água acionado no dia anterior, de modo a garantir que a temperatura de ensaio, de 50 °C, fosse atingida no momento da execução. Optou-se pela utilização da forma de contenção padrão do dispositivo, anteriormente empregada para os corpos de prova usinados, de modo a manter a padronização do procedimento e possibilitar a comparação direta dos resultados entre amostras moldadas em laboratório e amostras usinadas em campo.

Em seguida, procedeu-se à imersão das amostras no compartimento do dispositivo, sendo iniciado o processo de estabilização térmica. O tempo de estabilização passou a ser contabilizado a partir do momento em que a água atingiu a temperatura de referência de 50 °C. O equipamento foi programado para realizar automaticamente a aplicação das cargas até o limite de 20.000 passagens das rodas, interrompendo o ensaio ao alcançar esse valor.

Ao iniciar o procedimento, observou-se que as amostras não apresentaram deformação, mas sim ruptura imediata. Devido a esse comportamento, essas amostras foram descartadas, uma vez que o foco do estudo é a análise da deformação permanente. Na Figura 30 e Figura 31, pode-se observar a forma com que ocorreu a fratura nas amostras com falhas.

Figura 30 - Ruptura inadequada das amostras



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 31 - Amostra com ruptura imediata



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a identificação da ruptura das amostras de forma inadequada, optou-se por substituir o molde padrão do equipamento por um modelo com altura maior, capaz de promover o confinamento integral dos corpos de prova. Dessa forma, buscou-se assegurar que a deformação permanente fosse corretamente obtida durante a execução do ensaio, nas Figuras 32 e 33 é possível observar a comparação entre as dimensões da forma fornecida e da forma substituta, bem como a visualização da nova configuração de forma utilizada no ensaio.

Figura 32 - Formas utilizadas no ensaio Hamburg Wheel Tracking Test: Fornecida de fábrica (direita) e substituta (esquerda)



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 33 - Forma substituta



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que após a realização do ensaio *Hamburg Wheel Tracking Test* com a utilização da nova forma, a amostra de mistura asfáltica apresentou deformação permanente evidente, caracterizada pelo afundamento ao longo do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Amostras com deformação permanente



Fonte: Autoria própria (2025)

Diante disso, as amostras foram submetidas novamente ao ensaio de deformação permanente, desta vez com a utilização de uma forma modificada, capaz de garantir o confinamento completo dos corpos de prova. Assim, observou-se que para as amostras extraídas em campo, a forma padrão não proporcionava o confinamento adequado, comprometendo a execução do ensaio.

O procedimento descrito anteriormente foi igualmente aplicado às amostras extraídas de campo, produzidas a partir do mesmo material AMP 55/75, AMP 60/-85 e CAP 50/40. Os testemunhos provenientes da usinagem foram ensaiados utilizando a forma metálica originalmente fornecida com o dispositivo. Esse procedimento possibilitou a realização de comparações entre os resultados obtidos para as amostras usinadas e as extraídas em campo, bem como a avaliação da influência do tipo de forma utilizada no comportamento das misturas asfálticas.

É válido ressaltar que durante a execução do ensaio, o equipamento registrava automaticamente o desenvolvimento da deformação permanente. Apresentando em tempo real a curva presente em um gráfico correspondente ao comportamento da amostra submetida às passagens da roda metálica, vista na tela do dispositivo.

Esse monitoramento contínuo permitia acompanhar visualmente a tendência de formação das trilhas de roda ao longo do ensaio. Além disso, o sistema do equipamento indicava por meio de mensagens na mesma tela, eventuais falhas operacionais, possibilitando a identificação de erros durante o processo.

### 3.3.3 *FLOW NUMBER*

Segundo Santos (2025), seguindo a NBR 16505 (2016), foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 160 mm de altura. Esses corpos de prova foram posteriormente cortados e retificados, de modo a apresentarem altura final de 150 mm ( $\pm 2,5$  mm) com volume de vazios de 7% ( $\pm 0,5\%$ ). Em seguida, as amostras foram submetidas a condicionamento térmico por no mínimo três horas, na temperatura de 60 °C, a qual também foi mantida durante a execução do ensaio.

O ensaio consistiu na aplicação de carregamento cíclico de compressão uniaxial, com tempo de aplicação de carga de 0,1 s e intervalo de repouso de 0,9 s, possibilitando o monitoramento das deformações acumuladas em função do número de ciclos. O procedimento foi conduzido até que as amostras atingissem 7200 ciclos

ou apresentassem a ruptura. A partir dos resultados, foi determinado o valor de *Flow Number*, parâmetro utilizado para a avaliação da deformação permanente das misturas asfálticas.

### 3.3.4 BARRA LASER

Um dos métodos adotados para a análise das amostras em campo foi a partir da barra laser para medição de Afundamento em Trilha de Roda ATR, este levantamento de dados foi realizado antes da abertura ao tráfego, em 20 de junho de 2022, e posteriormente em diferentes períodos após a liberação da via, com as datas de 28/02/2023, 01/06/2023, 02/10/2023, 19/04/2024, 25/11/2024 e 15/05/2025.

Segundo Bueno (2019), o Perfilômetro Inercial Laser possui uma taxa de obtenção de aproximadamente 4000 medições por segundo, exigindo uma velocidade mínima de operação de 30 km/h. O equipamento forneceu automaticamente os valores do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) para a trilha externa e para a trilha interna, além do IRI médio entre ambas. Também foram disponibilizados os valores do Quociente de Irregularidade (QI) para TE, TI e o valor médio, assim como os dados de velocidade de deslocamento e os valores de ATR correspondentes às trilhas interna e externa.

O aparelho perfilômetro era constituído por cinco sensores laser, sendo um localizado no centro da barra, dois posicionados nas trilhas de roda e dois instalados nos extremos da barra, voltados para fora das trilhas, conforme ilustrado na Figura 35. Após a montagem, o equipamento foi fixado na camionete S10 e, em seguida, realizou-se a calibração em uma superfície plana, para então iniciar-se o deslocamento e a coleta dos dados.

Figura 35 - Avaliação de IRI nos segmentos A, B e C



### 3.3.5 TRELIÇA METÁLICA

Outro método realizado para a avaliação em campo foi a treliça metálica para o levantamento dos resultados da deformação permanente. A resultante da avaliação da trilha de roda (ATR) foi executada seguindo as diretrizes da norma DNIT-PRO 433/2021, através da medição dos sulcos do pavimento nas regiões da trilha interna (TI) e da trilha externa (TE) das faixas de tráfego de cada segmento estudado.

Segundo Santos (2025), as medições foram empregadas em todas as estacas a cada 10 metros. É apresentada na Figura 36 um exemplo da avaliação do ATR realizada no dia 28 de fevereiro de 2023, na trilha externa da faixa externa do Segmento B.

Figura 36 - Avaliação de ATR efetuado nos Segmentos A, B e C



Fonte: Santos (2025)

A primeira coleta de dados foi efetuada antes da abertura da via ao tráfego e após a liberação do tráfego, foram realizadas novas medições de dados em diferentes períodos, com intervalo monitorado de 4, 7, 11, 18, 25 e 31 meses após o início de serviço da via.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais e de campo realizados. Inicialmente, são expostos os resultados dos ensaios conduzidos em laboratório, contemplando o *Flow Number* e o *Hamburg Wheel Tracking Test*. Serão apresentados também os resultados de ATR obtidos em campo com o uso de treliça metálica e barra laser. Tais resultados serviram para avaliar o comportamento das misturas asfálticas em relação à deformação permanente.

### 4.1 FLOW NUMBER

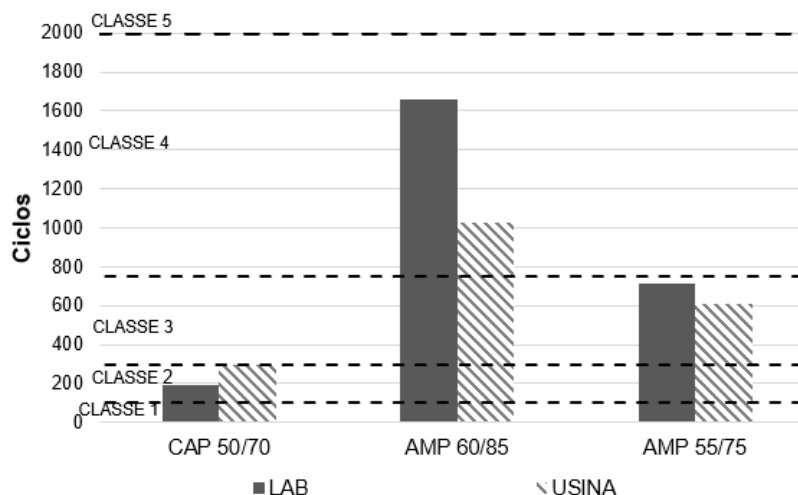
Para início, tem-se como base de análise a Tabela 6 de resultados obtidos por Santos (2025), seguido pela Figura 37, que representa os valores graficamente.

Tabela 6 - Valores de *Flow Number*

Mistura	LAB		USINA	
	FN médio (ciclo)	FN desvio padrão (ciclo)	FN médio (ciclo)	FN desvio padrão (ciclo)
CAP 50/70	194	29	294	93
AMP 60/85	1.660	73	1.024	281
AMP 55/75	713	47	611	110

Fonte: Santos (2025)

Figura 37 - Valores de *FLOW NUMBER*



Fonte: Adaptado de Santos (2025)

Conforme os resultados apresentados por Santos (2025), verificou-se que as misturas produzidas com CAP 50/70, tanto em laboratório quanto em usina, apresentaram o pior comportamento frente à deformação permanente, sendo enquadradas na classe 2 no ensaio *Flow Number*. Essa classificação indica que tais misturas são adequadas apenas para vias de tráfego leve, com número de repetições de carga entre  $10^6 \leq N < 10^7$  sob condições normais e  $N < 10^6$  em condições severas.

Os resultados encontrados por Pacheco (2024) para o CAP 50/70 usinado, extraído da mistura coletada em campo, corroboram com esse comportamento, onde o valor de  $Jnr_{3.2} = 3,656 \text{ kPa}^{-1}$  indica que o ligante é indicado em via de tráfego leve. Além disso, demonstra maior deformação não recuperável, com uma melhora após a usinagem, visto que houve uma redução de 61,8 % no valor de  $Jnr_{3.2}$  em relação ao ligante virgem, o que confirma a menor resistência reológica do ligante convencional.

Em contrapartida, as misturas produzidas com o ligante AMP 60/85 apresentaram o melhor desempenho global, sendo enquadradas na classe 4 no *Flow Number*, o que possibilita sua utilização em vias de tráfego intenso, classificadas como  $N \geq 10^8$  em condições normais e  $10^7 \leq N < 10^8$  em condições severas. A análise reológica corrobora esse comportamento, uma vez que o AMP 60/85 usina apresentou  $Jnr_{3.2} = 1,312 \text{ kPa}^{-1}$ , valor que indica elevada resistência à deformação permanente. Por outro lado, o AMP 60/85 em estado virgem apresentou  $Jnr_{3.2} = 0,135 \text{ kPa}^{-1}$ , evidenciando significativa sensibilidade ao processo de usinagem, possivelmente relacionada às temperaturas de produção e ao envelhecimento térmico decorrente do processamento.

As misturas produzidas com AMP 55/75 apresentaram desempenho intermediário, enquadrando-se na classe 3, adequadas para vias com tráfego médio a pesado com valores do intervalo de  $10^7 \leq N < 10^8$  sob condições normais e  $10^6 \leq N < 10^7$  sob condições severas. Pacheco (2024) obteve  $Jnr_{3.2} = 1,689 \text{ kPa}^{-1}$ , ou seja, próximo ao valor encontrado no AMP 60/85 usinado, sendo ambos os ligantes aptos a serem utilizados em vias de tráfego pesado.

Além disso, o AMP 55/75 virgem apresentou valor de  $Jnr_{3.2} = 3,033 \text{ kPa}^{-1}$ , ou seja, assim como o CAP 50/70, indica uso adequado apenas em vias de baixa solicitação. No entanto, o ligante extraído na mistura usinada apresentou redução de 44,3% no valor de  $Jnr$ , revelando melhora reológica após a usinagem, com menor deformação não recuperável e boa estabilidade térmica.

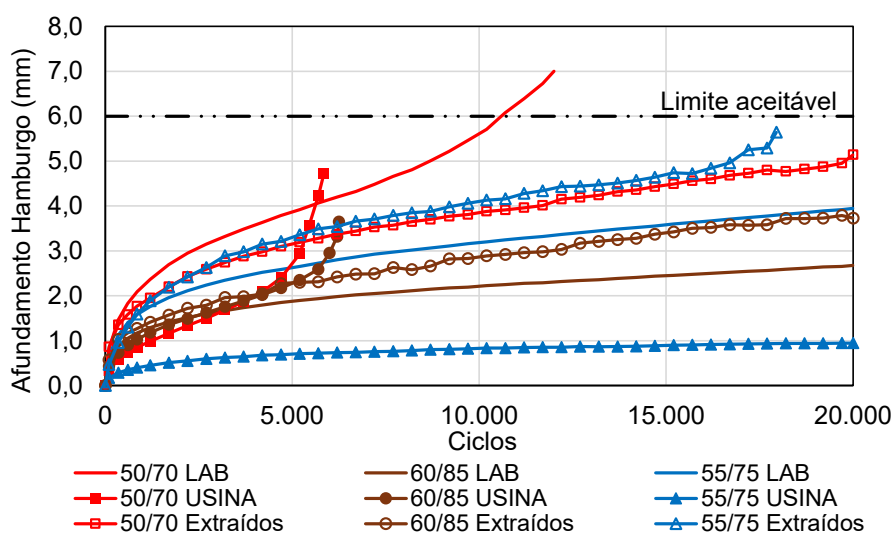
Dessa forma, observa-se uma correlação direta entre os resultados reológicos e mecânicos, em que menores valores de  $J_{nr3.2}$  estão associados a maior resistência à deformação permanente. Entre os materiais estudados destaca-se o AMP 60/85 por apresentar o maior valor de *Flow Number* e o menor  $J_{nr}$ , contudo, mostrou-se o material mais suscetível às variações ao processo de produção.

#### 4.2 HAMBURG WHEEL TRACKING TEST

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio de trilha de roda de Hamburgo, realizado nas amostras de concreto asfáltico usinado, moldadas em laboratório e extraídas em trechos experimentais, produzidas com os ligantes CAP 50/70, AMP 60/85 e AMP 55/75, as amostras extraídas do trecho experimental com aproximadamente 180 dias após a aplicação da mistura na pista. Os dados foram gerados pelo próprio dispositivo de Hamburgo e a partir deles, foi realizada a média das duas curvas correspondentes aos dois conjuntos de amostras ensaiadas para cada ligante.

Com base nesses valores médios, foram elaboradas curvas de acúmulo de deformação, ao longo dos ciclos de carregamento. Com isso, elaborou-se o gráfico disposto na Figura 38.

Figura 38 - Gráfico resumo de Hamburgo



Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados do ensaio de trilha de roda de Hamburgo, apresentados na Figura 38, demonstraram que a mistura produzida com CAP 50/70 em usina apresentou desempenho inferior em relação às demais misturas, quanto à resistência à deformação permanente. Uma vez que a amostra não atingiu o limite de ciclos adotado como referência para misturas de alto desempenho 20.000 passagens, observou-se um aumento progressivo do afundamento ao longo do ensaio, e alcançando uma ruptura prematura, como pode ser verificado com o aumento acentuado de afundamento com um pequeno número de solicitações.

A mistura feita em laboratório com o mesmo ligante asfáltico, também não alcançou as 20.000 passagens. Observa-se que a mistura apresentou deformação acentuada desde o início de passagens, atingindo valores de afundamento que ultrapassam o limite crítico de 6 mm com aproximadamente 12.000 ciclos.

Já a amostra extraída do Segmento A, que foi executado com CAP 50/70, apresentou aumento progressivo da deformação ao longo das passagens. No entanto, suportou as 20.000 passagens de referência, atingindo 5,0 mm ao final do ensaio. Apesar do crescimento contínuo do afundamento, o valor final permaneceu inferior ao limite aceitável, o que indica comportamento admissível frente à deformação permanente, embora com tendência de fluência plástica moderada.

O comportamento inferior das misturas produzidas com CAP 50/70 também foi confirmado no ensaio de *Flow Number*, no qual esse ligante resultou nos menores valores registrados entre as misturas avaliadas. De forma consistente, Pacheco (2024) identificou tendência semelhante, observando que o CAP 50/70 apresentou valores de  $Jnr_{3.2}$  superiores aos demais ligantes, indicando menor resistência à deformação permanente e restringindo sua aplicação a vias de tráfego leve.

É possível observar também na Figura 38 que a mistura feita com AMP 55/75 da usina apresentou o melhor comportamento ao longo das 20.000 passagens, evidenciando elevada resistência à deformação permanente, com tendência de fluência plástica próxima de 1 mm de deformação.

A mistura com AMP 55/75 feita no laboratório também completou as 20.000 passagens previstas pela norma, sem ultrapassar o limite de 6 mm, demonstrando bom comportamento. A amostra apresentou maior taxa inicial de afundamento, seguida por uma fase de estabilização, na qual a deformação manteve-se constante até atingir 4 mm.

A amostra extraída do Segmento C, feita com AMP 55/75 apresentou crescimento contínuo da deformação ao longo do ensaio, com afundamento final próximo de 6 mm ao aproximar-se do término das passagens. É observado também que o valor situou-se abaixo do limite de aceitabilidade, onde houve ruptura antes de alcançar as 20.000 passagens, não apresentando aceleração brusca da curva, o que indica fluência plástica controlada.

O comportamento superior das misturas produzidas com AMP 55/75 foi distinto do observado no ensaio de *Flow Number*, no qual essas misturas obtiveram valores intermediários na classificação deste método. De maneira coerente, Pacheco (2024) identificou tendência semelhante, observando que o AMP 55/75 apresentou valores de  $Jnr_{3.2}$  intermediários se comparado aos demais ligantes, indicando boa resistência à deformação permanente e ratificando sua aplicação a vias de tráfego pesado.

Verifica-se na Figura 38 que a mistura com AMP 60/85 usinada não completou o total de 20.000 passagens previsto pela norma, evidenciando um crescimento gradual da deformação ao longo do ensaio. Por volta de 6.000 ciclos, atingiu aproximadamente 4,0 mm, momento em que ocorreu um colapso, indicando uma deformação considerável nas etapas iniciais de carregamento.

A mistura asfáltica executada com ligante AMP 60/85 produzidas em laboratório apresentou comportamento progressivo e estável, atingindo deformação final próxima de 3,0 mm ao término das 20.000 passagens. O afundamento manteve-se abaixo do limite aceitável, indicando boa resistência à fluência plástica e ausência de colapso estrutural, essa estabilidade e baixa deformação evidencia a estabilidade do ligante AMP 60/85, refletindo consistência no desempenho mecânico da mistura.

A amostra extraída do Segmento B, que foi executado com AMP 60/85, apresentou aumento gradual da deformação ao longo dos 20.000 ciclos, atingindo aproximadamente 4,0 mm de afundamento ao final do ensaio. Apesar da deformação acumulada, o valor final permaneceu abaixo do limite aceitável, indicando bom desempenho frente à deformação permanente, com tendência de fluência controlada e ausência de colapso estrutural.

O desempenho das misturas produzidas com AMP 60/85 não foi semelhante no ensaio de *Flow Number*, no qual esse ligante resultou em valores excelentes na classificação 4 deste método. De modo coerente, Pacheco (2024) identificou

tendência semelhante ao FN, observando que o AMP 60/85 apresentou valores de  $Jnr_{3.2}$  superiores aos demais ligantes, indicando maior resistência à deformação permanente e confirmando sua adequação para vias de tráfego pesado.

Porém, Pacheco (2024) verificou também que o ligante extraído da mistura usinada apresentou aumento de 869,365 % no valor de  $Jnr_{3.2}$  em relação ao ligante virgem, o que confirma a perda de resistência na sua estrutura polimérica após a usinagem. Tal verificação corrobora com o comportamento inferior da mistura feita com AMP 60/85 usinada, encontrado no ensaio de Hamburgo.

#### 4.3 BARRA LASER

Para relacionar os valores de ATR com o número de solicitações equivalentes ao eixo padrão, foi utilizada a contagem de tráfego apresentada na Tabela 5. A partir desses dados, calculou-se o Fator de Equivalência de Carga pelo método da *United States Army Corps of Engineers* (USACE), obtendo-se assim o número de solicitações equivalentes ( $N_{USACE}$ ) para cada período de levantamento.

Foram realizados levantamentos de ATR nos segmentos A, B e C em diferentes períodos de avaliação, onde são apresentados na Tabela 7 os valores médios de ATR e seus respectivos desvios padrão para as pistas interna e externa de cada segmento experimental.

Tabela 7 - Valores de ATR obtidos com barra laser

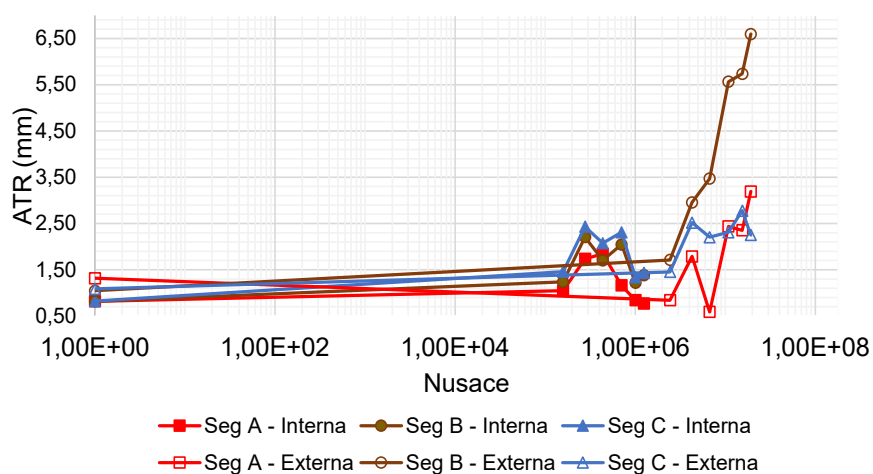
Segmento	Pista Interna			Pista Externa		
	$N_{USACE}$	ATR Médio (mm)	Desv. Pad. (mm)	$N_{USACE}$	ATR Médio (mm)	Desv. Pad. (mm)
A	0,00	0,8	0,56	0,00	1,30	0,61
	$1,58 \times 10^5$	1,1	0,51	$2,43 \times 10^6$	0,80	0,44
	$2,78 \times 10^5$	1,7	0,60	$4,27 \times 10^6$	1,8	0,85
	$4,36 \times 10^5$	1,8	1,59	$6,71 \times 10^6$	1,6	1,09
	$7,05 \times 10^5$	1,2	0,64	$1,09 \times 10^7$	2,4	1,83
	$1,00 \times 10^6$	0,8	0,43	$1,55 \times 10^7$	2,4	2,20
	$1,25 \times 10^6$	0,8	1,58	$1,92 \times 10^7$	3,2	1,58
B	0,00	0,8	0,52	0,00	1	0,61
	$1,58 \times 10^5$	1,2	0,51	$2,43 \times 10^6$	1,7	1,52

	$2,78 \times 10^5$	2,2	0,38	$4,27 \times 10^6$	3	1,55
	$4,36 \times 10^5$	1,7	3,46	$6,71 \times 10^6$	3,2	1,74
	$7,05 \times 10^5$	2	0,70	$1,09 \times 10^7$	5,6	2,80
	$1,00 \times 10^6$	1,2	0,47	$1,55 \times 10^7$	5,7	2,75
	$1,25 \times 10^6$	1,4	3,68	$1,92 \times 10^7$	6,6	3,68
C	0,00	0,8	0,39	0,00	1,1	0,56
	$1,58 \times 10^5$	1,5	0,57	$2,43 \times 10^6$	1,5	0,59
	$2,78 \times 10^5$	2,4	0,66	$4,27 \times 10^6$	2,5	0,59
	$4,36 \times 10^5$	2,1	1,93	$6,71 \times 10^6$	2,2	0,64
	$7,05 \times 10^5$	2,3	0,91	$1,09 \times 10^7$	2,3	0,72
	$1,00 \times 10^6$	1,3	0,40	$1,55 \times 10^7$	1,7	0,81
	$1,25 \times 10^6$	1,4	0,63	$1,92 \times 10^7$	2,3	0,62

Fonte: Autoria própria (2025)

São apresentados na Figura 39 os resultados obtidos por meio do ensaio de barra laser, utilizado para avaliar a deformação permanente das superfícies estruturais analisadas ao longo das solicitações. O gráfico permite visualizar os resultados de forma comparativa entre os trechos experimentais, onde as variações de altura facilitam a interpretação do comportamento do trecho experimental ensaiado.

Figura 39 - Resultados de barra laser



Fonte: Autoria própria (2025)

Nos segmentos A B e C, as trilhas internas apresentaram um aumento moderado do ATR, estabilizando-se em torno de 2,5 mm. Esse comportamento é explicado pelo fato de essas faixas terem sido submetidas a apenas 6,5% das solicitações aplicadas às trilhas externas, resultando em menor deformação acumulada. Contribuindo para essa tendência, observa-se que as faixas externas tendem a apresentar maiores valores de ATR, pois são mais solicitadas pelas cargas de roda.

De modo geral, observa-se que nas etapas iniciais de carregamento os valores de ATR permanecem estáveis e baixos, em torno de 1,0 a 1,5 mm, indicando boa resistência inicial à deformação permanente, uma vez que tais valores refletem a reduzida contabilização de tráfego nos dias iniciais em serviço.

A partir do  $N_{USACE} = 2 \times 10^6$ , nota-se um aumento do ATR, principalmente na faixa externa do segmento B, que alcança valores superiores a 6 mm, evidenciando maior suscetibilidade à deformação plástica sob tráfego repetido. Esse resultado está em consonância com os valores reológicos obtidos por Pacheco (2024) para o ligante AMP 60/85, cuja variação elevada do  $J_{nr3.2}$  do ligante virgem comparado ao ligante usinado indicou sensibilidade térmica e perda de estabilidade após a usinagem, indicando possível perda de resistência na estrutura polimérica do material, confirmando como possível causa para o crescimento acelerado da deformação nessa região.

De acordo com Santos (2025), a elevação dos valores de ATR observada no Segmento B possivelmente decorre também de o trecho estar localizado em uma área onde o perfil do terreno apresentava uma seção em corte. Soma-se a isso a presença de umidade excessiva nas sarjetas próximas à estrutura do pavimento, essas condições podem ter aumentado a umidade das camadas inferiores e, por consequência, reduzido a resistência ao afundamento.

Em síntese, fica evidenciado na Figura 39 que a faixa externa do segmento B é a mais crítica, apresentando desempenho inferior após determinado limite de carga, enquanto os segmentos A e segmento C mantem desempenho uniforme, refletindo melhor desempenho estrutural frente a solicitação do tráfego.

Apesar de o ensaio de *Flow Number* e a análise reológica dos ligantes asfálticos feitas por Pacheco (2024), mostrar que o AMP 60/85 apresenta boa resistência à deformação permanente, e que o CAP 50/70 apresentou comportamento inferior, este desempenho não se concretizou em campo, onde o

Segmento B feito com AMP 60/85 apresentou os maiores valores de ATR e o Segmento A teve valores de ATRs relativamente baixos.

Além disso, no ensaio de Hamburgo, o AMP 60/85 da mistura usinada apresentou comportamento inferior, rompendo antes de atingir os 20.000 ciclos de carga de referência. Logo, deve-se considerar outros fatores na análise geral de deformação permanente, como os materiais aplicados nas camadas inferiores, as condições estruturais das camadas subjacentes ao revestimento asfáltico e as características dos ligantes após a usinagem.

#### 4.4 TRELIÇA METÁLICA

Com os resultados obtidos com a treliça metálica, elaborou-se a Tabela 8, na qual são apresentadas as médias de ATR de cada segmento, bem como os respectivos valores de desvio padrão entre os pontos analisados.

Tabela 8 - Valores de ATR obtidos com treliça metálica

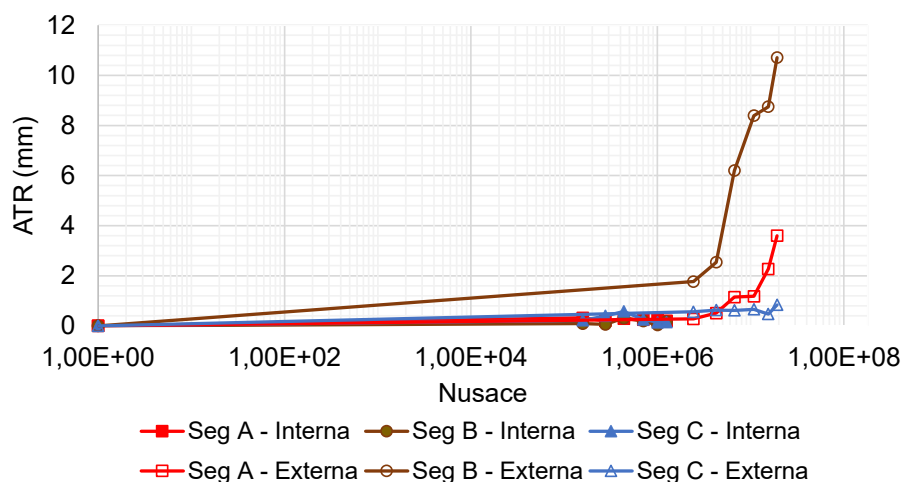
Segmento	Pista Interna			Pista Externa		
	N <sub>USACE</sub>	ATR Médio (mm)	Desv. Pad. (mm)	N <sub>USACE</sub>	ATR Médio (mm)	Desv. Pad. (mm)
A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,58x10 <sup>5</sup>	0,32	0,28	2,43x10 <sup>6</sup>	0,28	0,47
	2,78x10 <sup>5</sup>	0,20	0,22	4,27x10 <sup>6</sup>	0,51	0,72
	4,36x10 <sup>5</sup>	0,29	0,25	6,71x10 <sup>6</sup>	1,15	1,52
	7,05x10 <sup>5</sup>	0,24	0,20	1,09x10 <sup>7</sup>	1,18	1,49
	1,00x10 <sup>6</sup>	0,26	0,24	1,55x10 <sup>7</sup>	2,27	2,54
	1,25x10 <sup>6</sup>	0,20	0,30	1,92x10 <sup>7</sup>	3,60	3,20
B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,58x10 <sup>5</sup>	0,09	0,15	2,43x10 <sup>6</sup>	1,77	1,49
	2,78x10 <sup>5</sup>	0,06	0,16	4,27x10 <sup>6</sup>	2,54	1,42
	4,36x10 <sup>5</sup>	0,31	0,28	6,71x10 <sup>6</sup>	6,20	3,15
	7,05x10 <sup>5</sup>	0,19	0,23	1,09x10 <sup>7</sup>	8,39	3,80
	1,00x10 <sup>6</sup>	0,03	0,10	1,55x10 <sup>7</sup>	8,75	3,26
	1,25x10 <sup>6</sup>	0,17	0,24	1,92x10 <sup>7</sup>	10,71	3,68
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,58x10 <sup>5</sup>	0,22	0,24	2,43x10 <sup>6</sup>	0,56	0,35

	$2,78 \times 10^5$	0,40	0,52	$4,27 \times 10^6$	0,63	0,32
	$4,36 \times 10^5$	0,58	0,38	$6,71 \times 10^6$	0,62	0,42
	$7,05 \times 10^5$	0,26	0,39	$1,09 \times 10^7$	0,66	0,37
	$1,00 \times 10^6$	0,14	0,33	$1,55 \times 10^7$	0,47	0,44
	$1,25 \times 10^6$	0,15	0,37	$1,92 \times 10^7$	0,84	0,50

Fonte: Santos (2025)

A partir dos dados apresentados na Tabela 8, verifica-se que as pistas externas dos três segmentos registraram valores médios mais elevados de ATR em comparação às pistas internas. A distribuição desses resultados pode ser visualizada de forma mais clara no gráfico da Figura 40, que sintetiza as diferenças entre os trechos avaliados.

Figura 40 - Valores de ATR da treliça metálica



Fonte: Autoria própria (2025)

Nos três segmentos, as trilhas internas apresentaram desenvolvimento moderado do ATR, estabilizando-se em torno de 1 mm. Esse comportamento também foi observado na barra laser, apresentando tendência semelhante aos resultados obtidos, pelo fato de essas faixas terem sido submetidas a menores solicitações aplicadas em comparação às trilhas externas, resultando em menor deformação acumulada.

Nota-se um aumento do ATR, com destaque na faixa externa do segmento B, que alcança valores superiores a 10 mm, evidenciando maior suscetibilidade à

deformação plástica sob tráfego repetido. Esse comportamento está alinhado com os resultados reológicos obtidos para o ligante AMP 60/85, cuja elevada variação do  $J_{nr3.2}$  entre o ligante virgem e o ligante usinado evidenciou uma possível perda polimérica, maior sensibilidade térmica e perda de estabilidade após a usinagem.

Esse resultado é coerente com o que foi observado na treliça metálica, onde a mesma tendência de perda de desempenho foi identificada. No ensaio de *Flow Number* essa mistura obteve melhor comportamento e no Hamburgo as misturas apresentaram bom desenvolvimento, exceto a amostra extraída do seguimento feita com mistura coletada após a usinagem, onde a amostra extraída em campo tende a apresentar desempenho mais crítico, justamente por ter sido submetida às condições reais de usinagem.

No segmento A executado com CAP 50/70, encontrou-se com a barra laser menores deformações, enquanto a barra laser apresentou valores de ATR mais elevados. No *Flow Number*, a mistura também apresentou classificação desfavorável, reforçando essa tendência. Mesmo comportamento foi observado no ensaio Hamburgo, onde as misturas de laboratório e de usina apresentaram colapso antes de atingir 20.000 ciclos de carregamento. Enquanto a mistura extraída em campo completou o número de passagens, resultado que se alinha ao desempenho observado em campo na treliça. Por fim, os valores de  $J_{nr3.2}$  confirmam a tendência de desempenho inferior a esse desenvolvimento, visto que tanto o ligante de laboratório quanto o de usina apresentaram comportamento menos favorável, coerente com os demais ensaios.

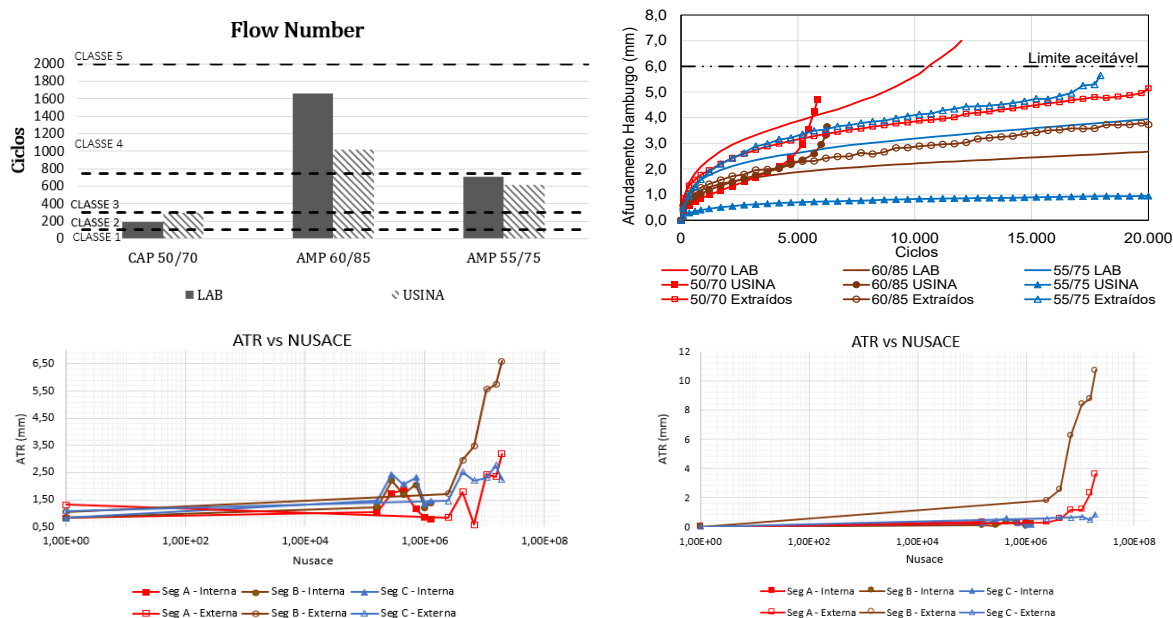
No seguimento C, feito com AMP 60/85 e AMP 55/75, as deformações de ATR são moderadas, de acordo com a classificação intermediária obtida no FN e com o desempenho consistente alcançado no Hamburgo. Esses valores justificam-se pelo fato de a estrutura ter sido construída com espessura de revestimento quase três vezes superior à espessura executada nos Segmentos A e B, além de as misturas aplicadas no trecho terem sido feitas com ligantes asfálticos que apresentaram os menores valores de  $J_{nr3.2}$  e de o AMP 55/75 ter apresentado uma variação favorável no  $\Delta J_{nr3.2}$  após a usinagem.

## 4.5 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

Neste tópico, realiza-se uma análise integrada dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de avaliação estudados. Busca-se, identificar possíveis correlações entre os parâmetros obtidos e verificar a consistência das respostas fornecidas por cada método em relação ao comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Na Figura 41, apresenta-se a composição conjunta dos quatro métodos de avaliação de deformação permanente, reunindo os resultados dos ensaios de campo e de laboratório. Será realizado o comparativo entre as misturas usinadas ensaiadas em laboratório, que são aquelas efetivamente aplicadas em campo, e os resultados de campo das faixas externas, visto que se trata da faixa mais carregada. Tal comparativo foi realizado a fim de avaliar a coerência entre o comportamento verificado em laboratório e o desempenho observado em campo.

Figura 41 - Análise conjunta dos métodos de avaliação de deformação permanente



Fonte: Autoria própria (2025)

No ensaio de trilha de roda de Hamburgo, a mistura usinada com ligante AMP 60/85 apresentou desempenho insatisfatório, evidenciado pelo colapso estrutural precoce e evolução progressiva da deformação plástica ao longo do carregamento com valores próximos de 4 mm de ATR. O que não condiz com o FN, pois nesse

ensaio o material foi considerado de Classe 4, ou seja, uma boa classificação segundo avaliação do método. Nos ensaios de campo com barra laser e treliça metálica, os valores de ATR obtidos confirmaram os resultados observados no ensaio Hamburgo, porém não apresentaram correlação com os valores de *Flow Number*. Apresentando os maiores valores de deformações que chegaram em aproximadamente 12 mm na treliça metálica e 6,50 mm na barra laser registrados no trecho experimental.

Para o ligante AMP 55/75, no ensaio de trilha de roda de Hamburgo, a mistura usinada apresentou comportamento excelente, evidenciado pela baixa deformação plástica, com valores de ATR que não ultrapassaram 1 mm. No ensaio de FN, o material foi enquadrado na Classe 3, indicando uma classificação mediana conforme os critérios do método. Já nos ensaios de campo, realizados com barra laser e treliça metálica, os afundamentos confirmaram o comportamento observado no FN, registrando valores próximos de 3 mm, caracterizando um ATR de proporção intermediária.

No ligante CAP 50/70, o ensaio de *Flow Number* resultou na classificação 1, o que indica baixo desempenho da mistura asfáltica. No ensaio de Hamburgo, o 50/70 apresentou ruptura estrutural, não atingindo os 20.000 ciclos previstos e exibindo elevada deformação plástica. Esse comportamento se confirma nos trechos avaliados em campo, onde os índices de ATR obtidos pela barra laser e pela treliça metálica registraram deformações próximas de 3,50 mm e 4 mm, respectivamente.

De modo geral, os ensaios de laboratório de FN e Hamburgo apresentaram resultados compatíveis entre si para as misturas com CAP 50/70 e AMP 55/75. Já para a mistura com AMP 60/85 essa compatibilidade não se confirmou. Com relação aos ensaios de barra laser e treliça metálica apresentaram comportamentos semelhantes, porém os valores de ATR obtidos com a treliça metálica foram quase duas vezes maiores do que os obtidos com a barra laser. Além disso, verificou-se que o ensaio de Hamburgo teve melhor correlação com os resultados de campo do que o ensaio de FN, por fim, na Tabela 9, tem-se o resumo da análise integrada dos resultados dos afundamentos das misturas usinadas, essa classificação da Tabela não deriva da comparação direta entre os métodos diferentes, mas sim da análise qualitativa do desempenho dentro do contexto dos ensaios.

Tabela 9 - Resumo dos resultados das amostras usinadas.

Metodologia	CAP 50/70 (mm)	AMP 60/85 (mm)	AMP 55/75 (mm)
Hamburgo	Insatisfatória	Insatisfatória	Adequada
<i>Flow Number</i>	Insatisfatória	Adequada	Regular
Barra laser	Regular	Insatisfatória	Adequada
Treliça metálica	Regular	Insatisfatória	Adequada

Fonte: Autoria própria (2025)

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo geral analisar o comportamento e o desempenhos frente a deformação permanente, de misturas feitas com diferentes ligantes asfálticos aplicados em trechos experimentais. Baseado nos ensaios realizados em campo e laboratório, pode-se concluir que:

O CAP 50/70 apresentou os resultados desfavoráveis, confirmando menor resistência ao afundamento previstas nas metodologias empregadas. Entre os ligantes modificados, o AMP 55/75 exibiu desempenho intermediário em relação ao afundamento, enquanto o AMP 60/85 apresentou a melhor resistência à deformação permanente no ensaio de *Flow Number*, com resultados superiores e consistentes no método empregado.

De forma geral, os resultados laboratoriais, especialmente no *Flow Number*, indicam que o concreto asfáltico com o ligante AMP 60/85 apresenta a maior resistência à deformação permanente, destacando-se como a mistura de melhor desempenho, o que é corroborado pelo valor de  $Jnr_{3.2} = 1,312 \text{ kPa}^{-1}$ . Contudo, quando aplicado no Segmento B, seu desempenho em campo foi prejudicado devido à elevada umidade nas camadas inferiores, que comprometeu a resposta estrutural do pavimento e pela perda polimérica verificada pela variação elevada desfavorável do  $Jnr_{3.2}$  após a usinagem.

Em seguida, o AMP 55/75 apresentou comportamento satisfatório, sobretudo no ensaio de Hamburgo, além de registrar os melhores resultados em campo no Segmento C. Por último, a mistura convencional CAP 50/70 mostrou o desempenho mais desfavorável, tanto nos ensaios laboratoriais quanto em seu valor de  $Jnr_{3.2} = 3,656 \text{ kPa}^{-1}$ , confirmando sua menor resistência à deformação permanente.

A comparação entre os métodos de ensaios *Flow Number* e Hamburgo demonstrou coerência na classificação da resistência à deformação permanente entre os diferentes ligantes. O CAP 50/70 apresentou o desempenho inferior em ambos os métodos, enquanto o AMP 55/75 ocupou posição intermediária nos dois métodos e o AMP 60/85 foi identificado como o ligante de melhor comportamento tanto pelo ensaio de FN quanto de Hamburgo, exceto a mistura usinada do AMP 60/85 no ensaio de Hamburgo. Portanto, pode-se concluir que os dois métodos

feitos em ambiente controlado, mostraram-se coerentes entre si, confirmando a mesma tendência de desempenho das misturas analisadas.

A comparação entre os ensaios realizados com barra laser e treliça metálica revelou concordância na identificação dos trechos com maior e menor suscetibilidade à deformação, em ambos os métodos o Segmento B apresentou o pior desempenho, registrando os maiores valores de afundamento. Os Segmentos A e C mostraram comportamento mais favorável, com o Segmento C destacando-se como o trecho de melhor desempenho, especialmente quando avaliado pela treliça metálica, assim, os dois procedimentos de avaliação de deformação permanente de campo convergiram na avaliação dos trechos.

Por fim, conclui-se que a análise conjunta dos ensaios laboratoriais e das avaliações de campo é fundamental, uma vez que o desempenho real das misturas é fortemente influenciado pela estrutura global do pavimento. Essa verificação ficou evidente, sobretudo, no comportamento observado no Segmento B, onde a mistura aplicada apresentou resultado favorável no ensaio de *Flow Number*, porém teve desempenho inadequado em campo.

Em contrapartida, o CAP 50/70 que apresentou o maior valor de  $Jnr_{3.2}$ , conforme verificado por Pacheco (2024), e cujas misturas foram classificadas na Classe 2 do FN, não sendo indicada para vias de tráfego pesado, entretanto demonstrou seu desempenho satisfatório em campo, contrariando parcialmente a previsão laboratorial.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) Aplicação de ensaios de deflexão com Viga Benkelman e Deflectômetro de Impacto (FW) em misturas com ligante convencional CAP 50/70 e modificados AMP 60/85 e AMP 55/75 aplicados em trechos experimentais, visando correlacionar a capacidade estrutural do pavimento com o desempenho observado em deformação permanente.
- b) Avaliar misturas com ligantes modificados submetidas a diferentes níveis de envelhecimento curto e longo prazo, relacionando o efeito do envelhecimento nas propriedades reológicas e na deformação permanente medida em ensaios como *Flow Number* e Hamburgo.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA CNT TRANSPORTE ATUAL. **Pesquisa CNT de Rodovias**.2023.
- AIDARA, M. L. C. **Le Module Complexe et l'Impact du Granulat sur la Prédiction du Module Dynamique des Enrobés Bitumineux. Application aux Dimensionnements Rationnel et Mécanistique-Empirique**. 2016. Tese de Doutorado. Université de Thiès (ED2DS).
- AL ROUSAN, TM. **Caracterização das propriedades de forma de agregados usando um sistema automatizado por computador**. Texas A&M University, 2004.
- BARROS, L. M., BRITO, L. A. T., & CERATTI, J. **Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes**. In: **Anais do XVIII CILA–Congresso Ibero Latino Americano del Asfalto**. Bariloche-Patagonia, Argentina. 2015.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **Standard method of test for Hamburg wheel-track testing of compacted asphalt mixtures**. AASHTO T324, 2023.
- BASTOS, J. B. D. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2017.
- BASTOS, S. D. V. **Estudo do comportamento mecanístico-empírico de materiais alternativos e cimentícios em camadas de pavimentos**. 2024.
- BERNUCCI, et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2022.
- BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.
- BORGES, R. L., E SOARES, J. B. **Utilização de um modelo viscoplástico para análise de deformação permanente em misturas asfálticas**. 2014.
- BRITO, L. A. T., HELLER, L. F. **Montagem e validação de um banco de dados climáticos para fins de avaliação do efeito da temperatura no desempenho de pavimentos flexíveis**. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 4, n. 1, p. 3-18, 2017.
- CARVALHO, M. A. R. D. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado por polímero reativo/não reativo e ácido polifosfórico**. 2018.
- CHOI, YT. **Desenvolvimento de um modelo de previsão mecanicista e protocolo de ensaio para a deformação permanente de concreto asfáltico**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Estadual da Carolina do Norte.

COLAVITE, A. S., & KONISHI, F. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, v. 12, p. 28, 2015.

COSTA, D. B. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de Mohr Coulomb**. 2018.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual do MeDiNa: Mecanistic-Empirical Design for National Asphalt Pavement**. Versão 1.1.6.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação das Relações entre Propriedades de Agregados Minerais com base nas Características do Processo de Britagem e da Rocha de Origem**. 2018.

DNIT-ME 184 **Pavimentação Misturas asfálticas Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, 2018.

DOS SANTOS, M. L. **ANÁLISE DO DESEMPENHO À FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM LIGANTE CONVENCIONAL E MODIFICADO EM TRECHOS EXPERIMENTAIS NO RIO GRANDE DO SUL**. Tese de Doutorado. Santa Maria, RS, 2025.

FACCIN, C., PIVOTO SPECHT, L., BORGES DE ALMEIDA JUNIOR, P. O., LISBOA SCHUSTER, S., E CHAVES PACHECO, L. **Comparison of Climate Data from NASA POWER Reanalysis and Data Measured at Surface Weather Stations for Application in Brazilian Paving Projects**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 47, 2024.

FACCIN, C., SPECHT, L. P., PEREIRA, D. D. S., SCHUSTER, S. L., BRONDANI, C., GUEX, G. G., & VESTENA, P. M. **Desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura de pavimento flexíveis**. Transportes, v. 32, n. 2, p. e2984-e2984, 2024.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FONTOURA, EDUARDA. **Incorporação de resíduos poliméricos em misturas asfálticas: análise técnica e potenciais impactos ambientais (2023)**.

FURLAN, A. P. **Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas**. 2006.

JUNG, SH. **Efeitos da oxidação do ligante asfáltico na reologia e no desempenho à fadiga da mistura de concreto asfáltico a quente.** 2009. Tese de Doutorado.

LIMA, C. D. A., E MOTTA, L. M. G. **Influência da variação granulométrica de brita graduada simples na deformação permanente.** In: ANPET–Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2015. p. 2015.

LUCENA, M. D. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros.** 2005.

MAHBOUB, KAMYAR; LITTLE, DALLAS N. **Procedimento aprimorado de projeto de mistura de concreto asfáltico.** 1988.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – École Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Velin, 2014.

MANOEL, G. F. **Caracterização físico-química e estudo reológico de asfaltos modificados pelos polímeros PEAD, PEBD e PELBD e contribuição ao estudo do envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo.** 2015.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais.** 2016.

MOREIRA, A. A. G. **Propriedades Reológicas e Resistência a Oxidação de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) Modificado com Cardanol.** 2013.

MOTA, B. C., ARAGÃO, F. T. S., E ESPÍNDOLA, R. P. **Caracterização da resistência à fadiga de materiais de pavimentação asfáltica a partir de técnicas de inteligência artificial: uma revisão sistemática da literatura.** In: Anais do 36 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2022. p. 1-12.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOURA, L. S. D. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: uma análise mecânica, microscópica e ambiental.** 2021.

NGUYEN, D,T E LE, X,L. **Research of Asphalt Pavement Rutting on National Roads in Vietnam.** University of Transport and Communications, p 33. 2016.

ONOFRE, F. C., CASTELO BRANCO, V. T. F., SOARES, J. B., E FAXINA, A. L. **Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas.** 2013.

PACHECO, Chaves. **Impact of asphalt mixture plant production on the rheological properties and performance of asphalt binders**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2024.

PAIVA, P. S. D. **Caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas para uso em pavimentação de agregados de rochas vulcânicas da porção central do Rio Grande do Sul**. Tese (Mestrado em engenharia civil) 2017.

PEREIRA, MHN. **Análise comparativa do comportamento mecânico de concreto asfáltico usando ligante modificado por via seca e por via umidade com mistura de exaustão industrial: borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa de petróleo**. 2020.

RATH, Punyaslok et al. **Avaliação laboratorial e de campo de ligantes asfálticos modificados com borracha e pré-tratados por processo a seco e misturas de granulometria densa**. Transportation Research Record , v. 2675, n. 10, p. 381-394, 2021.

RODRIGUES<sup>1</sup>, A. L. N., SOARES<sup>1</sup>, F. L., & SOARES, J. B. **Influência da forma e dos parâmetros granulométricos no resultado de Flow Number**. 2019.

SHELL BITUMEN. **Asphalt mixture design – an overview**. Haia, 2016.

SILVA, S. C., BASTOS, J. B. D. S., E SOARES, J. B. **O efeito da seleção granulométrica na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (2015).

SIMÕES, GL. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas com granulometria determinada pela faixa de agregados dominantes**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SOHM, JULIETTE. **Prédictions des déformations permanentes des matériaux de chaussées**. Autre. Ecole Centrale de Nantes (ECN). França, 2011.

ROSA, Andressa Zampieri et al. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM BORRACHA E POLÍMERO SBS: PROPRIEDADES REOLÓGICAS E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DA MISTURA**.

THIEL, D. A. **Desempenhos de misturas e ligantes asfálticos modificados com borracha moída de pneus e copolímero SBS quanto à fadiga e à deformação permanente: estudo de caso na rodovia SC-163**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

WESSELING, D. H. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. 2005.

WOLDEKIDAN, M F. **Modelleren van het responsgedrag van bitumen, bitumineuze mastiek en mortel**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Technische Universiteit Delft, Delft, 2011.