



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PAULO HENRIQUE DE JESUS CARVALHO**

**COLETA, ESTRUTURAÇÃO E ANÁLISE DE UM BANCO DE DADOS DE ENSAIOS**  
**SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS E SEUS COMPONENTES**

**CRATEÚS**

**2025**

PAULO HENRIQUE DE JESUS CARVALHO

**COLETA, ESTRUTURAÇÃO E ANÁLISE DE UM BANCO DE DADOS DE ENSAIOS  
SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS E SEUS COMPONENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, campus de Crateús, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Carlos David Rodrigues  
Melo

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C327c    Carvalho, Paulo Henrique de Jesus.  
          Coleta, estruturação e análise de um banco de dados de ensaios sobre misturas asfálticas e seus componentes / Paulo Henrique de Jesus Carvalho. – 2025.  
          89 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2025.  
          Orientação: Prof. Me. Carlos David Rodrigues Melo.
1. ensaio. 2. ligantes. 3. agregados. 4. mistura. 5. banco de dados. I. Título.

CDD 620

---

PAULO HENRIQUE DE JESUS CARVALHO

COLETA, ESTRUTURAÇÃO E ANÁLISE DE UM BANCO DE DADOS DE ENSAIOS  
SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS E SEUS COMPONENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, campus de Crateús, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 12/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Carlos David Rodrigues Melo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jardel Andrade De Oliveira  
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Infraestrutura (INCT-Infra)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pela saúde, coragem e sabedoria para enfrentar os desafios. Por não me deixar desistir em nenhum momento, sempre mostrando o caminho correto a seguir.

À Instituição Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de estudar e concluir um curso de muito prestígio na sociedade brasileira que é a Engenharia Civil, o que irá agregar muito na minha vida profissional.

Ao Prof. Carlos David Rodrigues Melo por ter me dado a oportunidade de participar desse belo trabalho e ter aceitado ser meu orientador nesta caminhada final da minha formação.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores de todas as disciplinas que cursei durante o curso, agradeço por todo o conhecimento repassado durante esses anos.

Aos meus colegas de trabalho por sempre me incentivar e por muitas vezes flexibilizar o horário de trabalho para ter tempo de assistir às aulas da faculdade.

Aos meus pais, familiares e amigos pelo apoio durante essa longa jornada e também pelo amor e companheirismo de minha esposa Yara Evillyn que sempre me apoiou e incentivou a continuar mesmo nos momentos mais adversos.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos  
é um oceano.”

Isaac Newton

## RESUMO

Este trabalho apresenta a estruturação de um banco de dados para ensaios laboratoriais de misturas asfálticas, incluindo informações sobre ligantes, agregados e diferentes tipos de misturas, como convencionais, modificadas e recicladas (com RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*, pavimento asfáltico reciclado). O objetivo é organizar e disponibilizar esses dados de forma estruturada e acessível, facilitando estudos e aplicações na pavimentação. A construção do banco de dados envolveu a coleta, padronização e organização de informações de diversos ensaios laboratoriais, garantindo um sistema eficiente para armazenar, consultar e analisar os resultados. Ao todo, foram coletadas 355 misturas asfálticas. O banco de dados reúne uma ampla variedade de ligantes, classificados por grau de desempenho (PG), penetração, viscosidade, ponto de amolecimento, suscetibilidade térmica, ductilidade e resistência à fadiga. Ele também inclui dados sobre agregados, como granulometria e adesividade ao ligante betuminoso. Para as misturas asfálticas, são registrados diferentes teores de ligante, módulos de resiliência e módulo dinâmico, além de curvas de comportamento mecânico, que consideram coeficientes da curva sigmoideal e fatores de *shift* de temperatura para o ensaio de módulo complexo. Além dos resultados armazenados, há um glossário dos ensaios, elencando as principais informações como descrição, normas e procedimentos de execução. Além de armazenar os resultados brutos, o banco permite análises estatísticas, auxiliando na interpretação de tendências e variabilidade dos materiais. Essas informações podem ser usadas na avaliação do desempenho das misturas, otimização de dosagens e modelagem preditiva. A sistematização dos dados melhora a organização das informações laboratoriais e cria uma base para pesquisas futuras, contribuindo para novas técnicas de pavimentação e melhoria da infraestrutura viária. O banco é um recurso aberto para pesquisadores e profissionais, impulsionando o avanço da engenharia de pavimentos.

**Palavras-chave:** ensaio; ligantes; agregados; mistura; banco de dados.

## ABSTRACT

This study presents the structuring of a database for laboratory tests on asphalt mixtures, including information on binders, aggregates, and different types of mixtures, such as conventional, modified, and recycled ones (with RAP – Reclaimed Asphalt Pavement). The objective is to organize and make this data available in a structured and accessible manner, facilitating studies and applications in pavement engineering. The construction of the database involved collecting, standardizing, and organizing information from various laboratory tests, ensuring an efficient system for storing, retrieving, and analyzing results. A total of 355 asphalt mixtures were collected. The database gathers a wide variety of binders, classified by performance grade (PG), penetration, viscosity, softening point, thermal susceptibility, ductility, and fatigue resistance. It also includes data on aggregates, such as gradation and adhesion to the bituminous binder. For asphalt mixtures, different binder contents, resilient modulus, and dynamic modulus are recorded, along with mechanical behavior curves that consider sigmoidal curve coefficients and temperature shift factors for complex modulus testing. In addition to the stored results, the database includes a glossary of tests, listing key information such as descriptions, standards, and execution procedures. Besides storing raw results, the database enables statistical analyses, assisting in the interpretation of trends and material variability. This information can be used to evaluate mixture performance, optimize dosage, and develop predictive modeling. The systematization of data improves the organization of laboratory information and establishes a foundation for future research, contributing to new pavement techniques and the enhancement of road infrastructure. The database is an open resource for researchers and professionals, driving progress in pavement engineering.

**Keywords:** test; binders; aggregates; mixture; database.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Camadas constituintes do pavimento.....	19
Figura 2.2 - Classificação dos pavimentos no Brasil.....	21
Figura 2.3 - Condição da superfície do pavimento.....	21
Figura 2.4 - Destilação fracionada do petróleo.....	22
Figura 2.5 - Ensaio de penetração.....	23
Figura 2.6 - Viscosímetro capilar a vácuo Cannon-Manning.....	24
Figura 2.7 - Ilustração da análise por peneiramento.....	28
Figura 2.8 - Exemplo de equipamento Los Angeles.....	31
Figura 2.9 - Equipamentos usados para determinar o índice de forma.....	32
Figura 2.10 - Corpos de prova extraídos do pavimento.....	34
Figura 2.11 - Exemplos dos tipos de misturas a quente.....	35
Figura 2.12 - Equipamento utilizado para determinação do MR de misturas asfálticas.....	39
Figura 2.13 - Ensaio uniaxial de carga repetida.....	40
Figura 2.14 - Prensa para o Ensaio de Estabilidade Marshall.....	41
Figura 2.15 - Corpos de prova antes, durante e após a ruptura no ensaio de fadiga por compressão diametral.....	42
Figura 3.1 - Parte da planilha explicativa (glossário), destacando as três abas de ensaios.....	48
Figura 3.2 - Parte da planilha expositiva, destacando as abas e as células vazias.....	49
Figura 3.3 - Parte de tabela de resultados do ensaio de módulo dinâmico.....	50
Figura 3.4 - Padronização dos separadores decimal e de milhar.....	51
Figura 3.5 - Resultados de ensaio de peneiramento padronizado com o percentual retido nas peneiras.....	51
Figura 4.1 - Parte do banco de dados mostrando o parâmetro de frequência reduzida para determinação do módulo dinâmico.....	55
Figura 4.2 - Valores de módulo dinâmico em função de temperatura e frequência.....	55
Figura 4.3 - Quantitativo de misturas por ensaio de ligantes.....	58
Figura 4.4 - Quantitativo de misturas por ensaio de agregados.....	58
Figura 4.5 - Quantitativo de misturas por ensaio de agregados.....	59
Figura 4.6 - Diagrama de caixa do ensaio de ponto de amolecimento.....	59
Figura 4.7 - Diagrama de caixa do ensaio de análise granulométrica, percentual retido na peneira $\frac{3}{4}$ ".....	60
Figura 4.8 - Histograma do ensaio de penetração.....	61
Figura 4.9 - Histograma do ensaio de viscosidade.....	62
Figura 4.10 - Histograma do Performance Grade máximo.....	62
Figura 4.11 - Histograma da peneira de $\frac{1}{2}$ ".....	63
Figura 4.12 - Histograma do tamanho máximo nominal das amostras.....	64
Figura 4.13 - Histograma do volume de vazios.....	64
Figura 4.14 - Histograma do módulo de resiliência a 25°C.....	65
Figura 4.15 - Histograma teor de ligante.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Ensaios da metodologia <i>superpave</i> .....	25
Tabela 2.2	Série de peneiras.....	30
Tabela 2.3	Vantagens e desvantagens da adição de polímeros ao asfalto.....	36
Tabela 3.1	Lista de ensaios incluídos no banco de dados.....	47
Tabela 4.1	Amostras por referência consultada.....	52
Tabela 4.2	Ensaios sem dados registrados.....	57
Tabela 4.3	Valores de frequência reduzida para o ensaio de módulo dinâmico.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CCR	Centro de Pesquisas Rodoviárias
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Test</i>
NBR	Norma Brasileira
PAV	<i>Pressurized Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
<i>Superpave</i>	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
VR	Viscosímetro Rotacional - <i>Rotational Viscometer</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Fundamentos da Pavimentação Asfáltica.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Materiais e Ensaio em Pavimentação.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1 Ligantes Asfálticos.....</b>	<b>22</b>
2.2.1.1 <i>Classificação dos Ligantes.....</i>	23
2.2.1.1.1 <i>Classificação por penetração.....</i>	23
2.2.1.1.2 <i>Classificação por viscosidade.....</i>	24
2.2.1.1.3 <i>Classificação por desempenho (PG - performance grade).....</i>	24
2.2.1.2 <i>Propriedades relevantes para ensaios.....</i>	26
<b>2.2.2 Agregados.....</b>	<b>26</b>
2.2.2.1 <i>Definição e importância dos agregados.....</i>	26
2.2.2.2 <i>Características e classificações dos agregados.....</i>	27
2.2.2.3 <i>Ensaio relevantes.....</i>	29
2.2.2.3.1 <i>Análise Granulométrica.....</i>	29
2.2.2.3.2 <i>Abrasão Los Angeles.....</i>	31
2.2.2.3.3 <i>Índice de forma.....</i>	32
2.2.2.3.4 <i>Adesividade ao ligante betuminoso.....</i>	33
<b>2.2.3 Misturas asfálticas .....</b>	<b>33</b>
2.2.3.1 <i>Definição e composição.....</i>	33
2.2.3.2 <i>Classificação das misturas.....</i>	34
2.2.3.3 <i>Misturas modificadas por polímeros.....</i>	35
2.2.3.4 <i>Propriedades importantes.....</i>	37
2.2.3.4.1 <i>Teor de ligante asfáltico.....</i>	37
2.2.3.4.2 <i>Densidade da mistura.....</i>	37
2.2.3.4.3 <i>Resistência mecânica.....</i>	38
2.2.3.5 <i>Ensaio relevantes.....</i>	38
2.2.3.5.1 <i>Módulo de resiliência.....</i>	38
2.2.3.5.2 <i>Ensaio uniaxial de carga repetida - deformação permanente.....</i>	39
2.2.3.5.3 <i>Ensaio Marshall.....</i>	41
2.2.3.5.4 <i>Resistência à fadiga.....</i>	41
<b>2.3 Fundamentos de Banco de dados.....</b>	<b>43</b>
2.3.1 <i>Importância de estruturar dados.....</i>	43
2.3.2 <i>Tratamento de dados faltantes.....</i>	44
2.3.3 <i>Gestão de Dados.....</i>	45
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>52</b>
4.1 <i>Descrição geral dos ensaios e estatística básica.....</i>	52

<b>4.2 Organização dos atributos no Banco de Dados.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3 Quantitativos e Análise de vazios no Banco de Dados.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4 Identificação e tratamento de outliers.....</b>	<b>59</b>
<b>4.5 Histogramas e estatísticas dos ensaios.....</b>	<b>61</b>
<i>4.5.1 Ensaios de ligantes.....</i>	<i>61</i>
<i>4.5.2 Ensaios de agregados.....</i>	<i>62</i>
<i>4.5.3 Ensaios de misturas.....</i>	<i>64</i>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1 Considerações finais.....</b>	<b>67</b>
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A pavimentação asfáltica desempenha um papel crucial na infraestrutura de transporte, sendo essencial para o desenvolvimento econômico e social de qualquer região. As rodovias pavimentadas facilitam o deslocamento de pessoas e mercadorias, contribuindo significativamente para a eficiência logística e a integração territorial. Elas permitem não apenas o transporte rápido e seguro, mas também fomentam o comércio, o turismo, e outras atividades econômicas, conectando áreas urbanas e rurais e facilitando o acesso a serviços essenciais como saúde e educação.

Os primeiros registros de uso da pavimentação datam de mais de 4000 anos, na antiga Mesopotâmia (ABRAMS, 2013), mas as principais estradas começaram a ser construídas por volta de 2600 anos a.C., quando foram construídas as pirâmides do Egito (SAUNIER, 1936). Nessa época, os egípcios necessitavam transportar materiais para construção das pirâmides e utilizavam basicamente pedras e água para construção das estradas.

Ao longo dos séculos, o conhecimento e as técnicas de pavimentação evoluíram significativamente. Na Roma antiga, por exemplo, as estradas pavimentadas com pedras eram construídas com técnicas avançadas para a época, garantindo durabilidade e eficiência no transporte de tropas e mercadorias. Com o passar do tempo e o aumento do tráfego devido, a necessidade de estradas mais duráveis e pavimentadas tornou-se evidente.

Com o crescimento do número de automóveis no século XX, a construção de estradas tornou-se indispensável para o desenvolvimento da economia, inclusive pela necessidade de os veículos alcançarem maior velocidade, o que provocou o surgimento do sistema de auto-estradas (Santos, 2002).

A durabilidade e a qualidade dos pavimentos estão diretamente relacionadas aos materiais utilizados e às técnicas empregadas em sua construção. Nesse contexto, os ensaios na pavimentação asfáltica surgem como ferramentas indispensáveis para garantir a eficiência e durabilidade dos pavimentos.

Os ensaios de laboratório são procedimentos essenciais para os campos da engenharia, ciência e tecnologia, sendo cruciais para validação de hipóteses e teorias, assim como no desenvolvimento de novos materiais e produtos, além de fornecerem garantia de qualidade e segurança em diversos setores da indústria.

Considerando que há uma grande quantidade de ensaios relacionados aos pavimentos, sejam eles sobre ligantes, agregados, solos ou misturas asfálticas, a quantidade de informações sobre materiais utilizados, procedimentos e resultados envolvidos é enorme. Então, torna-se ainda mais importante organizar todos os métodos e procedimentos de todos os ensaios necessários de maneira precisa e segura.

Pensando nisso, o objetivo deste trabalho é o gerenciamento dos métodos, procedimentos e expressão de resultados dos principais ensaios sobre pavimentação asfáltica, por meio do processo de curadoria de dados, que nada mais é que a organização e gerenciamento de dados de acordo com necessidades e interesses específicos. Ou seja, trata-se de um banco de dados contendo informações pertinentes relativas aos ensaios, como descrição do ensaio, normas técnicas de execução e variáveis de entrada e saída.

Os bancos de dados têm como objetivo proporcionar agilidade, uniformidade e segurança no armazenamento e recuperação de informações. Eles permitem que usuários e aplicações acessem dados de forma eficiente e consistente, garantindo a integridade e a confiabilidade das informações armazenadas (Univesp, 2025). No contexto da pavimentação asfáltica, um banco de dados específico facilita a consulta e aplicação prática dos ensaios, agilizando o acesso às informações essenciais. Esse banco de dados serve como uma ferramenta complementar, auxiliando na organização e interpretação dos resultados.

Fonseca et al. (2020) fez algo semelhante quando juntou vários dados de ensaio de misturas, agregados e ligantes. Porém, os resultados se restringem ao estado do Ceará, mais especificamente às pesquisas e ensaios realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará.

Em seu trabalho, Fonseca et al. (2020) apresentou dados referentes a 84 amostras de misturas asfálticas, compondo seu banco de dados com ensaios de rigidez, por meio dos módulos dinâmico e/ou de resiliência; vida de fadiga por compressão diametral, deformação permanente, além de resistência à tração.

Mota et al. (2023) também juntou informações de ensaios para montar um banco de dados, contudo, contou com uma maior variabilidade, coletando dados de algumas universidades do país, UFC, UFCG, UFJF, UFRGS, UFRJ, UFSM e UNB. Ainda, utilizou-se de algumas análises estatísticas para melhor estruturar seu banco de dados.

Em seu trabalho, Mota et al. (2023) observou muitas células (informações) vazias, ou seja, nem todas as amostras listadas possuem informações para todos os ensaios, ou por falta de acesso ou por terem sido realizados ensaios específicos para cada tipo de amostra. O que é esperado, já que nem todos os trabalhos pesquisados realizaram os mesmos ensaios.

Diferentemente dos trabalhos de Fonseca et al. (2020) e Mota et al. (2023), este trabalho não possui restrições tipos de ensaios ou fonte de dados, podendo apresentar dados de todo o país e até dados internacionais, apesar de no momento o Brasil está sendo o foco. Além disso, este banco de dados será continuamente alimentado com novas informações ao passo que elas estejam sempre disponíveis e sem restrições de acesso a comunidades. Os autores acreditam que o compartilhamento de dados de ensaios de misturas asfálticas e seus componentes, de forma abrangente como se faz aqui, tem um potencial muito grande de incentivar pesquisas e desenvolvimento tecnológicos na área da pavimentação asfáltica.

Além dos trabalhos nacionais de Fonseca et al. (2020) e Mota et al. (2023), estudos internacionais também ressaltam a importância da organização de dados de ensaios de pavimentação asfáltica. A *Federal Highway Administration* (FHWA), nos Estados Unidos, mantém o programa *Specific Pavement Studies* (SPS), que coleta e analisa dados de pavimentos para avaliar o desempenho de diferentes materiais e técnicas de construção. Além disso, a *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) desenvolve recursos que resumem procedimentos de ensaio, resultados esperados e equipamentos necessários, facilitando a padronização e a comparação de dados em nível nacional.

## 1.1 Objetivo Geral

Compilar, estruturar e disponibilizar um banco de dados contendo informações sobre ensaios de ligantes, agregados e misturas asfálticas, organizando e padronizando as variáveis relevantes para facilitar o acesso e a análise das informações a toda a comunidade.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Reunir e organizar dados de ensaios de ligantes, agregados e misturas asfálticas provenientes de diferentes fontes nacionais e internacionais.
- Estruturar as informações do banco de dados em categorias claras, criando dois grandes blocos de informações, um com resultados de ensaios e outro com resumos explicativos para facilitar a compreensão (Glossário de Ensaio de Misturas Asfálticas).
- Disponibilizar o banco de dados de forma acessível e gratuita para a comunidade acadêmica e não acadêmica.
- Analisar possíveis lacunas nos dados coletados e sugerir caminhos para futuras

pesquisas na área de pavimentação asfáltica relacionados a isso.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Fundamentos da Pavimentação Asfáltica**

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al, 2022). Essas camadas trabalham em conjunto para suportar as cargas do tráfego, garantindo estabilidade e prolongando a vida útil do pavimento.

Os pavimentos são classificados em rígidos ou flexíveis. De acordo com Senço (2007), pavimentos rígidos são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento Portland. Geralmente, rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações.

Pavimentos flexíveis são aqueles em permitem maiores deformações sem levar ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga SENÇO (2007).

As camadas constituintes em um pavimento geralmente são subleito, sub-base, base e revestimento, nessa sequência de baixo para cima, podendo haver um reforço do subleito de acordo com necessidade de projeto, como pode ser observado na Figura 2.1. As camadas superiores, mais próximas da superfície, representam maior custo devido seus materiais serem mais caros.

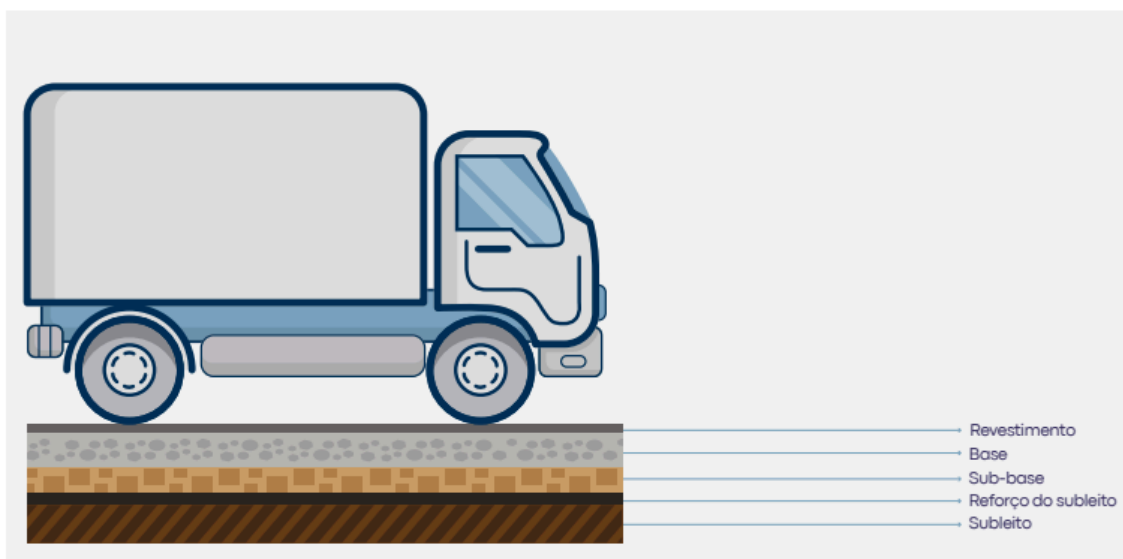


Figura 2.1 - Camadas constituintes do pavimento. Fonte: Pesquisa CNT 2024.

De acordo com Oda (2000), do ponto de vista estrutural, a camada mais importante é a base. Sobre ela está o revestimento com a função de suportar os efeitos destrutivos do tráfego e das intempéries. Em complemento a isso, pode-se dizer que as camadas sub-base e reforço do subleito, quando necessário, também são muito importantes para a função estrutural. Assim, a qualidade dos materiais utilizados em cada camada torna-se crucial para assegurar o desempenho estrutural esperado.

As camadas abaixo do revestimento são compostas geralmente pelo próprio solo do local e material de aterro desde que atendam às exigências de características e qualidade, observando alguns ensaios como o de CBR (Índice de Suporte Califórnia). De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para a sub-base o CBR deve ser maior ou igual a 20% e para a base deve ser maior que 80%.

Em relação ao revestimento, esta é a camada que possui contato direto com o tráfego de veículos, absorvendo os impactos e transmitindo para as camadas inferiores. É a camada que mais sofre os danos causados pelo tráfego, e segundo Bernucci et al. (2022) entre os danos tem-se como os mais importantes de serem estudados para benefício de maior durabilidade dos pavimentos, o trincamento por fadiga e os afundamentos por deformação permanente.

Bernucci et al. (2022) complementa que a camada asfáltica ainda pode apresentar trincamento por envelhecimento do ligante asfáltico, processo executivo inadequado, tensões cisalhantes como tem-se no processo de reflexão de trincas de camadas subjacentes, ação

climática etc. Ou seja, o revestimento asfáltico está sujeito a vários danos e por isso é importante sempre realizar manutenções preventivas.

A pavimentação asfáltica é de suma importância para o desenvolvimento social e econômico de uma sociedade, impactando diretamente no transporte de bens e pessoas, reduzindo custos e melhorando a segurança viária para os usuários. Por isso, é essencial uma correta execução e monitoramento da qualidade dos pavimentos, para isso há necessidade de grandes investimentos na área de infraestrutura viária.

O desempenho das atividades econômicas e sociais está amplamente atrelado à qualidade das rodovias, portanto, é fundamental que a infraestrutura esteja adequada para o tráfego de pessoas e mercadorias (CNT, 2024).

Tendo em vista que as rodovias possuem um alto custo referente à manutenção e aplicação, associada aos elevados índices de acidentes veiculares, muitas vezes ocasionados devido ao mal estado de conservação dos pavimentos rodoviários, há necessidade de investimentos em novas tecnologias que possam ser aplicadas para o desenvolvimento de vias pavimentadas que possuam melhor qualidade e sejam mais seguras e econômicas (TEIXEIRA, 2018).

Sabe-se que uma via com melhor qualidade de rolamento, automaticamente proporciona aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, tendo em vista que os custos de operação e de manutenção dos veículos estão associados às condições de superfície dos pavimentos (SILVA, 2021).

Logo, percebe-se os inúmeros benefícios de um pavimento bem estruturado e com manutenções periódicas. Por outro lado, execuções inapropriadas e ausência ou manutenções inadequadas comprometem significativamente a vida útil e a segurança das pavimentações.

Segundo Silva (2021), entre as rodovias pavimentadas, constituídas principalmente por pavimentos flexíveis, é comum o aparecimento de patologias na superfície, tais como: trincas, afundamentos, ondulações, exsudações, desgastes e remendos. Esses problemas não apenas comprometem o conforto e a segurança dos usuários, mas também acarretam custos elevados com manutenções corretivas e interrupções no tráfego.

Em complemento, a Pesquisa da CNT de Rodovias em 2024, CNT (2024), afirma que rodovias em más condições elevam as despesas com manutenção de veículos, combustível e tempo de viagem, além de gerarem ineficiências no transporte de cargas que afetam toda a cadeia produtiva, reduzindo a competitividade econômica. Em relação a isso, a pesquisa mostra a qualidade dos pavimentos nas rodovias nas áreas estudadas, o que pode ser verificado na Figura 2.2.

### Classificação do Pavimento

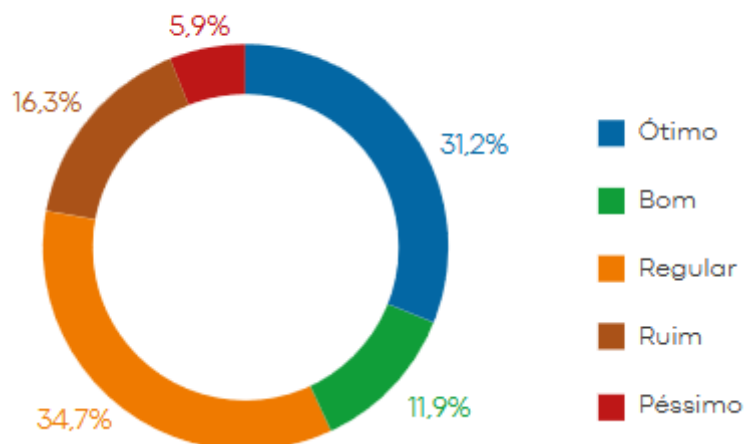


Figura 2.2 - Classificação dos pavimentos no Brasil. Fonte: CNT 2024.

Em se tratando da superfície, ou seja, a camada mais acima do pavimento, a pesquisa mostra resultados preocupantes, onde apenas 4,9% da quilometragem estudada de todo o território nacional apresenta a superfície do pavimento em perfeito estado. Os dados completos podem ser verificados na Figura 2.3.

### Condição da superfície do pavimento

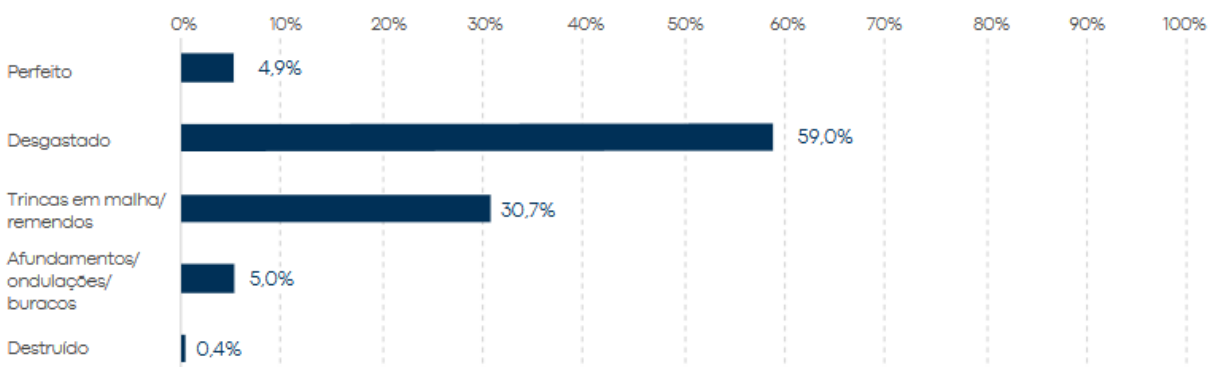


Figura 2.3 - Condição da superfície do pavimento. Fonte CNT 2024.

## 2.2 Materiais e Ensaio em Pavimentação

A seleção dos materiais utilizados na execução de um pavimento depende de vários fatores como tipo de solo, carga a ser suportada, tipo de estrada etc. Senço (2007) complementa que a construção de um pavimento exige o conhecimento não só dos materiais constituintes das camadas desse pavimento, mas também dos materiais constituintes do

subleito e dos materiais que possam interferir na construção dos drenos, acostamentos, cortes e aterros.

Um dos principais e o mais antigo material utilizado na pavimentação é o próprio solo. Senço (2007) diz que o solo é o mais antigo, mais usado, mais complexo e mais desconhecido dos materiais de construção. Outros materiais empregados são os agregados e os ligantes asfálticos, que quando unidos formam as misturas asfálticas.

O desempenho de um pavimento asfáltico depende diretamente das características de cada um desses componentes, bem como de sua interação no contexto da mistura. Nesse trabalho serão abordadas apenas as principais características relacionadas às misturas asfálticas e seus componentes, ligantes asfálticos (que conferem coesão e flexibilidade à mistura) e agregados (responsáveis pela resistência e estrutura).

### 2.2.1 Ligantes Asfálticos

A destilação fracionada do petróleo é responsável por extrair vários produtos essenciais ao nosso dia a dia como gasolina, querosene, diesel, plásticos etc. Entre eles, está o asfalto, segundo Bernucci et al. (2022) os petróleos distinguem-se pela maior ou menor presença de asfaltenos em sua composição. A destilação pode ser melhor compreendida observando a Figura 2.4.

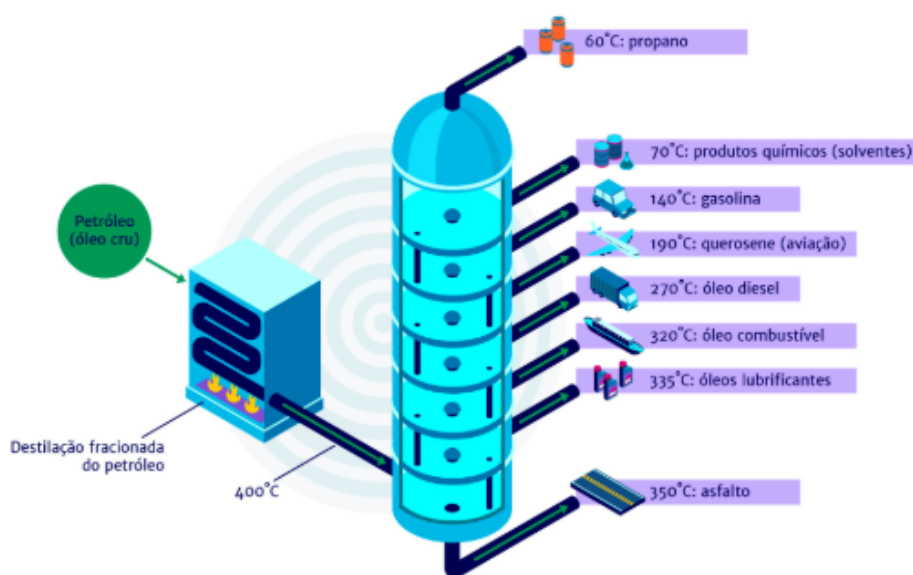


Figura 2.4 - Destilação fracionada do petróleo. Fonte: MegaWhat 2019.

### 2.2.1.1 Classificação dos Ligantes

Os ligantes asfálticos podem ser classificados com base em diferentes métodos e critérios que refletem suas propriedades físico-químicas e seu desempenho sob condições específicas.

Bernucci et al. (2022) diz que para se especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, classicamente se utilizam medidas simples de características físicas do ligante, pela facilidade de execução nos laboratórios de obras. As duas principais características utilizadas são: a dureza, medida pela penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida por ensaios de viscosidade. Assim, neste documento, os ligantes serão classificados por penetração, viscosidade e desempenho.

#### 2.2.1.1.1 Classificação por penetração

De acordo com a ABNT (2007), penetração é a distância em décimos de milímetros que uma agulha penetra verticalmente na amostra de material sob condições determinadas de carga (100g), tempo (5s) e temperatura (25°C).

O objetivo é verificar a dureza do ligante, quanto menor a penetração, melhor, ou seja, mais consistente é o ligante. Esse teste de consistência pode ser melhor compreendido observando a Figura 2.5. A norma de execução desse ensaio no Brasil é a ABNT NBR 6576.

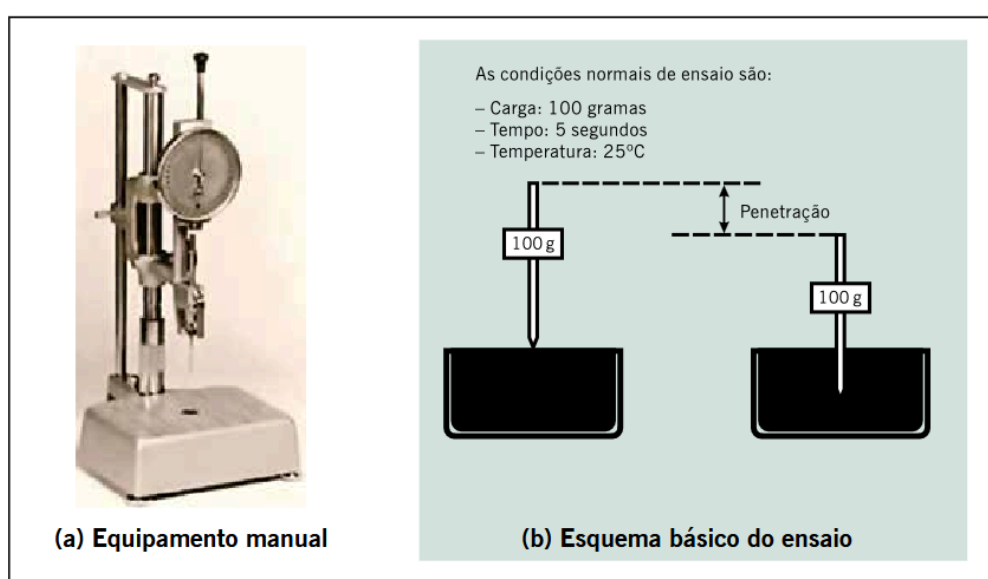


Figura 2.5 - Ensaio de penetração. Fonte: Bernucci et al, 2022.

### 2.2.1.1.2 Classificação por viscosidade

Viscosidade dinâmica é a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e taxa de cisalhamento ABNT (2015). Essa relação fornece um coeficiente de viscosidade, que é uma medida de consistência de um líquido que determina sua resistência ao escoamento.

Em termos de ligantes asfálticos, quanto menor a viscosidade, mais fluido é o ligante. Maior fluidez pode ser uma vantagem para adesão aos agregados, por outro lado, sua resistência é menor, principalmente em regiões com clima mais quente.

O ensaio de viscosidade no Brasil é normatizado pela ABNT NBR 5847, onde verifica-se o tempo necessário para que um fluido escorra em um tubo padronizado. A Figura 2.6 mostra um aparelho tradicional usado para medir a viscosidade, o viscosímetro *Cannon-Manning*. Nesse viscosímetro capilar, para a determinação da viscosidade, se media o tempo que um volume fixo do material leva para escoar em um tubo capilar, de baixo para cima, sob condição preestabelecida e controlada de temperatura e de vácuo (BERNUCCI et al, 2022).

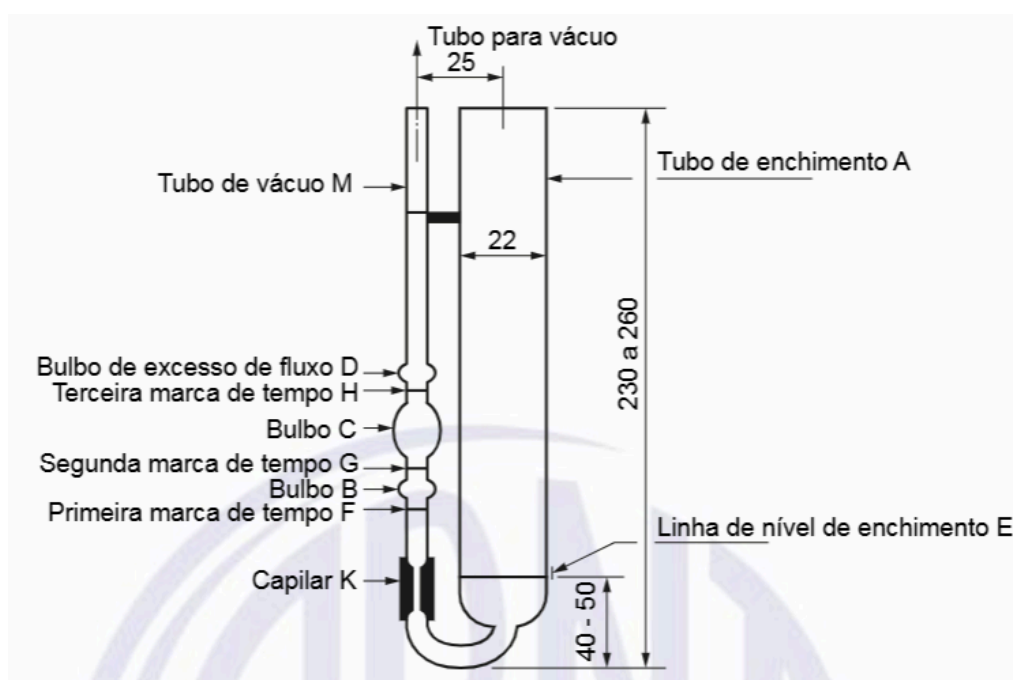


Figura 2.6 - Viscosímetro capilar a vácuo Cannon-Manning. Fonte: ABNT 2015.

### 2.2.1.1.3 Classificação por desempenho (PG - *performance grade*)

Em 1987 foi criado nos Estados Unidos o Programa Estratégico de Pesquisas em Rodovias (*Strategic Highway Research Program - SHRP*) com o objetivo de melhorar o

desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. Esse programa propôs a criação de novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos. De acordo com Bernucci et al. (2022), as primeiras especificações usam ensaios simples e empíricos e as mais recentes buscam usar ensaios fundamentais, baseados em caracterização da viscoelasticidade e do dano, alcançando avanços significativos nas últimas décadas.

Sendo assim, a classificação dos ligantes por desempenho pode ter diferentes parâmetros como os avaliados nos ensaios de penetração, viscosidade e ponto de amolecimento, porém mais voltado para analisar propriedades reológicas. Essas novas especificações, métodos e estudos formam o *Superpave*, do inglês *Superior Performing Asphalt Pavements*, que significa pavimentos asfálticos de desempenho superior.

A especificação *Superpave* avalia o ligante asfáltico em uma ampla faixa de temperaturas, que cobre todas as etapas do processo de mistura, espalhamento e compactação, também associada às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde aquele material será utilizado (BERNUCCI et al, 2022).

Os ligantes são classificados em graus de temperaturas máximas e mínimas, onde apresentam propriedades e características de interesse. Nessas temperaturas são classificados com a sigla PG (*performance grade*) seguido das temperaturas máxima e mínima encontradas. Por exemplo PG 70-22, o primeiro número é a temperatura mais alta dos 7 dias consecutivos mais quentes do ano (70°C) e o segundo número é a menor temperatura no dia mais frio do ano (-22°C). Temperaturas medidas em campo a 20 mm da superfície do revestimento.

Os principais ensaios e suas respectivas normas realizados na metodologia do *superpave* estão descritos na Tabela 2.1.

Ensaio	Norma
Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR	ASTM D 7175
Viscosímetro Rotacional – RV	ASTM D 4402
Reômetro de Fluência em Viga - BBR	ASTM D 6648
Prensa de Tração Direta – DTT	ASTM D 6723
Estufa de Película Delgada Rotacional – RTFOT	ASTM 2872
Vaso de Pressão de Envelhecimento - PAV	ASTM 6521

Tabela 2.1 - Ensaios da metodologia *superpave*. Fonte: Adaptado de Bernucci et al. 2022.

### 2.2.1.2 Propriedades relevantes para ensaios

Conforme visto nas seções anteriores, independente do método utilizado, empírico, tradicional ou na metodologia do *superpave*, os ensaios com ligantes asfálticos têm como objetivo avaliar propriedades fundamentais que determinam o desempenho dos pavimentos em diferentes condições de tráfego e clima.

Para os principais ensaios com ligantes asfálticos apresentados neste trabalho, algumas propriedades possuem maior relevância. Uma delas é a dureza, que está relacionada à consistência do ligante, ou seja, sua resistência ao fluxo ou deformação sob uma carga ou temperatura específica, quanto maior a dureza de um material mais difícil de penetrá-lo. É uma propriedade determinante no ensaio de penetração.

Outra propriedade importante é a fluidez, característica do ensaio de viscosidade, quanto mais fluido um ligante é, menor é a sua resistência ao escoamento, ou seja, o material escoar com maior facilidade.

O ensaio de ponto de amolecimento tem como objetivo verificar a resistência do ligante ao calor, determinando a temperatura na qual o material amolece. Já no ensaio de ductilidade, é verificada a capacidade máxima de alongamento do ligante.

Para ensaios RTFOT (*rolling thin-film oven test* - estufa de filme fino rotativo) e PAV (*pressure aging vessel* - vaso de envelhecimento sob pressão), é simulado o envelhecimento do ligante para que sejam verificadas suas características com o passar do tempo. No caso do RTFOT é simulado apenas até o período de usinagem e compactação, já o PAV simula por um tempo maior, cerca de 10 anos.

## 2.2.2 Agregados

### 2.2.2.1 Definição e importância dos agregados

Agregado é um termo genérico para os materiais que estão nas dimensões da fração areia, dos pedregulhos, e maiores dimensões, decorrentes da britagem de rochas minerais ou de cascalheiras de ocorrência natural (BERNUCCI et al, 2022). Possui a função de propiciar estabilidade e resistência às misturas asfálticas.

Os agregados podem ser utilizados em diversas aplicações, como elementos constituintes na composição de argamassas e concretos, composição de revestimentos

betuminosos e revestimentos de uma maneira geral. São adicionados aos solos para pavimentação, bases para calçamento e lastro de vias férreas, contribuindo para o aumento da resistência mecânica e redução de custo na obra que for utilizado (ASSIS, 2015).

Em torno de 70% a 90% da composição da mistura asfáltica em peso é composta por agregados, podendo variar de acordo com o tipo de mistura. Logo, grande parte da mistura é formada por agregados que são, portanto, cruciais na resistência e estabilidade da mistura.

#### *2.2.2.2 Características e classificações dos agregados*

Há diferentes formas de classificar os agregados, onde a seleção desse constituinte irá depender da composição, finalidade, entre outros aspectos desejados para a mistura asfáltica. De acordo com o DNIT (2019), uma mistura asfáltica é composta por agregados de diferentes tamanhos em proporções convenientemente escolhidas com teor de cimento asfáltico que atenda aos requisitos de desempenho previstos, nos seus vários aspectos.

O nível de desempenho em serviço de um determinado agregado depende também das propriedades geológicas da rocha de origem. São importantes, portanto, informações sobre o tipo de rocha ou processo de formação, sua composição mineralógica, sua composição química, sua granulação, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície (BERNUCCI et al, 2022).

Para determinação do tamanho e outras características dos agregados são utilizados ensaios de análise granulométrica. Essa análise é muito importante pois é responsável pela determinação do tamanho e da forma das partículas, assim como demais características importantes como teor de vazios, adesividade ao ligante, resistência ao desgaste etc. que são determinadas em ensaios específicos.

A análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do solo. Para as partículas maiores do que 0,075 mm (peneira nº 200 da ASTM) o ensaio é feito passando uma amostra do solo por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas (DNIT, 2006).

As peneiras são classificadas de acordo com o tamanho da abertura e o DNIT (2006) listou as mais usadas nos ensaios rodoviários: peneira nº 200, 100, 40, 10 e 4, com aberturas em milímetros de 0.075; 0.15; 0.42; 2.09 e 4.8, respectivamente. Existem vários outros tamanhos de peneiras, podendo ser utilizadas de acordo com a necessidade.

Além da classificação por tamanho, os agregados também podem ser classificados segundo sua natureza, distribuição dos grãos ou pela forma. Quanto à natureza, podem ser naturais, artificiais ou reciclados.

O agregado natural inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios (BERNUCCI et al, 2022). São agregados artificiais os resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida (BERNUCCI et al, 2022). Já os agregados reciclados são os provenientes de reuso de materiais.

Quanto ao tamanho dos grãos, o DNIT (2006) classifica: agregado graúdo é o material retido na peneira nº 10. Exemplos: britas, cascalhos, seixos, etc. Agregado miúdo é o material que passa na peneira nº 10 e fica retido na peneira nº 200. Exemplos: pó-de-pedra, areia, etc. E agregado de enchimento (filler) é o que passa pelo menos 65 % na peneira nº 200. Exemplos: cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, etc. A Figura 2.7 ilustra como é feita a análise dos agregados por peneiramento.



Figura 2.7 - Ilustração da análise por peneiramento. Fonte: DYNAPAC, 2023.

Quanto à distribuição dos grãos, DNIT (2006) :

a) Agregado de graduação densa é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

b) Agregado de graduação aberta é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

c) Agregado tipo macadame é aquele que possui partículas de um único tamanho, o chamado "*one size aggregate*". Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

### 2.2.2.3 Ensaios relevantes

#### 2.2.2.3.1 Análise Granulométrica

Para realizar um ensaio de análise granulométrica, inicialmente, é necessário conhecer as características do material, principalmente o tamanho dos grãos. Sampaio e Silva (2007) afirmam: nos ensaios de peneiramento, é essencial o conhecimento dos tamanhos das amostras global e final a serem obtidas com a devida representatividade.

O tamanho dos grãos é obtido convencionalmente por processo de peneiramento em uma série de peneiras de malhas quadradas de aberturas pré-definidas e padronizadas. Este procedimento permite definir a composição granulométrica dos vários conjuntos de agregados definidos em faixas denominadas de graúdo, miúdo e de enchimento (DNIT, 2019).

A norma técnica utilizada na pavimentação asfáltica para realização desse ensaio é a DNIT 412/2019 - ME, onde são estabelecidas as diretrizes de execução e apuração de resultados.

Por meio desse ensaio é possível identificar o tamanho máximo nominal (TMN) do agregado, onde também é possível classificá-lo como agregado graúdo, miúdo ou de enchimento (*filler*). Para o peneiramento é utilizada uma série de peneiras padronizadas conforme a Norma DNER – EM 035/95 exposta na Tabela 2.2.

Série normal - mm	Série normal - polegada	Peneira nº
50,00	2	-
37,50	1 1/2	-
25,00	1	-
19,00	3/4	-
12,50	1/2	-
9,50	3/8	-
6,30	1/4	-
4,75	-	4
2,36	-	8
2,00	-	10
1,18	-	16
0,60	-	30
0,425	-	40
0,30	-	50
0,15	-	100
0,075	-	200

Tabela 2.2 - Série de peneiras. Fonte: DNER, 1995.

O tamanho máximo nominal (TMN) é o tamanho de abertura da peneira imediatamente acima daquela que retém mais que 10 % acumulado ou o tamanho da peneira acima da que passa menos que 90 % dos grãos (DNIT, 2019).

Agregado graúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira de 3 polegadas (3”), com abertura de malha de 75 mm, e ficam retidos na peneira nº 4, com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio de determinação da composição granulométrica de agregados ou misturas de agregados por peneiramento (DNIT, 2019).

Agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira nº 4, com abertura de malha de 4,75 mm, e ficam retidos na peneira nº 100, com abertura de malha de 0,15 mm, em

ensaio de determinação da composição granulométrica de agregados ou misturas de agregados por peneiramento (DNIT, 2019).

#### 2.2.2.3.2 Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles verifica o desgaste sofrido pelo agregado quando colocado em um equipamento chamado de Los Angeles (Figura 2.8). De acordo com Cavalcanti (2014) o ensaio de abrasão mede a resistência ao desgaste superficial dos grãos de agregado quando é submetido ao atrito. Assim, determina-se a resistência à fragmentação do agregado por choque ou atrito das partículas do agregado graúdo, ou seja sua capacidade de não se alterar (dissolver) quando manipulado, o que poderia diminuir seu diâmetro.



Figura 2.8 - Exemplo de equipamento Los Angeles. Fonte: DNIT, 2024.

A partir dos resultados obtidos no ensaio, que na pavimentação asfáltica é normatizado pela DNIT 451/2024 – ME, é possível verificar se o agregado sofre muito desgaste por abrasão.

### 2.2.2.3.3 Índice de forma

Segundo Bernucci et al. (2022), a forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade.

A determinação da distribuição granulométrica é feita através da análise das porcentagens das massas de agregados, retidas em um conjunto de peneiras com aberturas progressivamente menores (PENICHE; PINHEIRO, 2023).

Normatizado pela 424/2020 - ME DNIT (2020), utilizando o método com crivos, esta norma estabelece o método que fixa o modo pelo qual se determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado, definindo-a pelo índice de forma.

A forma das partículas pode ser também caracterizada segundo a norma DNIT 425/2020 - ME, onde são medidas por meio de um paquímetro duas dimensões das partículas: comprimento (c), espessura (e) e determinado o índice de forma (I). Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando  $f$  ou  $I = 1,0$  e lamelar quando  $f$  ou  $I = 0,0$  (BERNUCCI et al, 2022). A Figura 2.9 apresenta um exemplo de equipamento que é utilizado para determinar o índice de forma.



Figura 2.9 - Equipamentos usados para determinar o índice de forma. Fonte: DNIT, 2020.

#### 2.2.2.3.4 Adesividade ao ligante betuminoso

Bernucci et al. (2022) afirma que o efeito da água de separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Completa que agregados com alta adesividade em presença de água são em geral priorizados para utilização em misturas asfálticas.

Adesividade de agregado a material betuminoso é a propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso. É verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40 °C, à ação de água destilada, durante 72 horas (DNER, 1994). A norma para esse ensaio é a DNER-ME 078/94.

Basicamente, o ensaio tem o objetivo de verificar se um agregado tem boa adesividade a uma película de ligante e o resultado, de acordo com a norma, é considerado satisfatório não houver deslocamento da película depois de 72 horas.

### 2.2.3 Misturas asfálticas

#### 2.2.3.1 Definição e composição

O pavimento possui múltiplas camadas sendo o revestimento a mais superficial. É a camada que recebe contato direto com os veículos e que mais sofre com ações climáticas. O revestimento é uma mistura entre ligante, agregados e, opcionalmente, aditivos, chamado de mistura asfáltica. A figura 2.10 mostra um corpo de prova extraído do pavimento, onde é possível observar o ligante e os agregados compondo a mistura asfáltica.

A mistura de agregados e ligante asfáltico, com adição ou não de outros aditivos, é realizada em usina estacionária, onde os componentes (agregados e o ligante) entram em temperatura adequada para promover o recobrimento completo dos agregados e a mistura para boa homogeneidade (BERNUCCI et al, 2022).



Figura 2.10 - Corpos de prova extraídos do pavimento. Fonte: JEM CONTROLE DE QUALIDADE, 2022.

Na concepção tradicional, o revestimento asfáltico deve ser tanto quanto possível impermeável para restringir a entrada direta de águas pluviais e resistente aos esforços do contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a magnitude de carga, a área de contato dos pneus na superfície e a velocidade dos veículos (BERNUCCI et al, 2022).

A durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a sua habilidade em manter as propriedades reológicas, coesão e a adesão ao longo do tempo de serviço. Entre os principais fatores que afetam a durabilidade de um revestimento asfáltico, podemos citar os endurecimentos oxidativo, evaporativo e exsudativo (LIMA, 2003).

Assim, existe uma grande preocupação se as misturas asfálticas terão boa resistência e durabilidade devido aos fatores citados anteriormente. Por isso, existem inúmeros ensaios que avaliam e simulam o desgaste da mistura com o tempo, clima e intempéries.

#### *2.2.3.2 Classificação das misturas*

As misturas a quente e as mornas distinguem-se em vários tipos, de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destinam (BERNUCCI et al, 2022). Podem ser divididas de acordo com

suas composições granulométricas, em três graduações: densa, aberta e descontínua. No fim deste tópico, na Figura 2.11, é possível observar as três classificações de misturas a quente.

As misturas de graduação densa são as que possuem curva granulométrica contínua e índice de vazios menores. Bernucci et al (2022) diz que a curva granulométrica é bem graduada, de forma a proporcionar um esqueleto mineral de grande intertravamento. Já Leite et al. (2021) fala que, de modo geral, as misturas contínuas são caracterizadas pela sua classificação granulométrica com proporções aproximadas de agregados em todas as peneiras, e têm fácil densificação. Quando adequadamente projetada e construída, uma mistura densa é relativamente impermeável. São adequadas para todas as camadas do pavimento e para todas as condições de tráfego. Funcionam bem para as necessidades estruturais, de atrito, nivelamento e correção.

As misturas de graduação aberta possuem granulometria uniforme com agregados quase que exclusivamente do mesmo tamanho. O esqueleto mineral possui muitos vazios interconectados, o que possibilita a percolação de água no interior da mistura. Um exemplo é a camada porosa de atrito (CPA) ou mistura asfáltica drenante (MADUREIRA, 2022).

As misturas asfálticas descontínuas, por sua vez, por terem uma porcentagem elevada de agregados de dimensão similar, formam um esqueleto com estes agregados que se tocam entre si, deixando elevado volume de vazios entre os mesmos, comparativamente à mistura asfáltica densa (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).



Figura 2.11 - Exemplos dos tipos de misturas a quente. Fonte: Ceratti, Bernucci e Soares, 2015.

### 2.2.3.3 Misturas modificadas por polímeros

A busca sempre constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos levou ao desenvolvimento e uso de asfaltos modificados. A adição de polímeros aos ligantes asfálticos tradicionais, vêm mostrando: maior coesão do ligante e adesão aos

agregados, maior resistência ao envelhecimento e a redução da susceptibilidade térmica (D'Antona; Frota, 2011).

De acordo com a ANTT (2019), os asfaltos podem ser modificados por dois tipos de polímeros: Plastômeros e Elastômeros termoplásticos. A Figura 2.12 mostra uma tabela resumo dos dois tipos de polímeros com exemplos, vantagens e desvantagens.

Categorias	Exemplos	Vantagens	Desvantagens
Plastômeros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polietileno (PE)</li> <li>• Polipropileno (PP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boas propriedades em temperaturas elevadas</li> <li>• Custo relativamente baixo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria limitada na elasticidade</li> <li>• Problemas de separação de fase</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etileno-vinil acetato (EVA)</li> <li>• Etileno-butil acrilato (EBA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilidade à estocagem relativamente boa</li> <li>• Elevada resistência à deformação permanente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria limitada na elasticidade</li> <li>• Limitada melhoria nas propriedades de desempenho em temperaturas baixas</li> </ul>
Elastômeros Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estireno-butadieno-estireno (SBS)</li> <li>• Estireno-isopreno-estireno (SIS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada rigidez</li> <li>• Sensibilidade térmica reduzida</li> <li>• Retorno elástico elevado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de compatibilidade com alguns asfaltos</li> <li>• Baixa resistência a temperaturas elevadas, à oxidação e aos raios ultravioleta</li> <li>• Custo relativamente alto</li> </ul>

Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens da adição de polímeros ao asfalto. Fonte: ANTT, 2019.

O emprego de asfalto base de boa qualidade ajuda a potencializar os efeitos positivos da modificação com polímeros, enquanto que asfaltos base de baixa qualidade podem tornar fútil a modificação com polímeros (ANTT, 2019). Assim, uma simples adição

de um polímero a uma mistura asfáltica não significa que irá melhorar a qualidade, há que se fazer análises e ensaios que justifiquem a escolha.

Os ensaios que são utilizados para as propriedades de asfaltos modificados por polímeros, de acordo com Bernucci et al (2022), são: recuperação elástica, ensaio de separação de fases, coesividade vialit e o ensaio de fragilidade e tenacidade.

O ensaio de recuperação elástica busca verificar o quanto um fio de asfalto mudou seu tamanho após ser tracionado. O ensaio de separação de fases é empregado para quantificar a estabilidade à estocagem (BERNUCCI et al, 2022). O ensaio de coesividade vialit estima o grau de adesão entre um agregado e um ligante quando sujeitos a um impacto repentino. Já sobre o último ensaio: a fragilidade é a medida do trabalho total para tracionar uma amostra de ligante numa prensa de laboratório e a tenacidade é o trabalho requerido para alongar a amostra depois que a resistência inicial foi superada.

#### *2.2.3.4 Propriedades importantes*

##### *2.2.3.4.1 Teor de ligante asfáltico*

Trata-se da porcentagem de ligante asfáltico presente na mistura em relação à massa total dos agregados. O ligante asfáltico atua como um agente aglutinante, unindo os agregados e proporcionando coesão à mistura. Deve ser escolhido um teor de acordo com a necessidade de dosagem da mistura, sendo importante para sua estabilidade, durabilidade e flexibilidade.

Dosar uma mistura asfáltica trata de escolher, por meio de procedimentos experimentais, um teor “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica definida. O teor ótimo é definido conforme o teor do projeto e varia conforme o critério utilizado na sua avaliação. O teor do projeto é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros (MADUREIRA, 2022).

##### *2.2.3.4.2 Densidade da mistura*

Densidade é a relação entre massa e volume da mistura asfáltica. A densidade indica o grau de compactação alcançado durante a construção e é crucial para avaliar a qualidade da pavimentação.

É possível verificar a densidade de uma mistura através de algumas relações como a razão entre a massa seca e o volume real da partícula sólida do agregado, que é chamada de densidade real. A densidade aparente é calculada como a razão entre a massa seca e o volume aparente do sólido (volume do sólido mais o volume do poro permeável à água) (MADUREIRA, 2022). E a densidade efetiva é calculada como a razão entre a massa seca e o volume efetivo (volume do sólido mais o volume do poro permeável à água não preenchidos pelo ligante) (MADUREIRA, 2022).

Conhecer a densidade de uma mistura é importante pois uma densidade adequada assegura que a mistura tenha a resistência necessária para suportar as cargas aplicadas, reduz a permeabilidade da mistura, protegendo-a contra a infiltração de água e consequente deterioração. E ainda influencia diretamente na vida útil do pavimento, prevenindo problemas como deformações e trincas.

#### 2.2.3.4.3 Resistência mecânica

Quanto à resistência mecânica, pode-se avaliar a capacidade das misturas resistirem às tensões e deformações impostas pelo tráfego e variações ambientais sem sofrer falhas estruturais por meio de ensaios como resistência à tração e compressão.

Outros ensaios importantes como de deformação permanente avaliam a resistência da mistura asfáltica por meio de aplicações de tensões simulando o que ocorre no tráfego real das rodovias. Afundamentos por deformação permanente são um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica.

A determinação das propriedades mecânicas do concreto asfáltico, além de necessária para a elaboração dos modelos de previsão de desempenho, é muito útil para caracterizar, selecionar, dosar e projetar adequadamente esse material (CCR, 2018).

#### 2.2.3.5 Ensaio relevantes

##### 2.2.3.5.1 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é o módulo elástico utilizado na teoria elástica de dimensionamento de pavimentos (CCR, 2018). Definido pelo DNIT (2018) como a relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável, por ciclo.

Em resumo, este ensaio avalia a elasticidade da mistura e sua capacidade de retornar à forma original após a aplicação de carga. É um parâmetro essencial para o dimensionamento de pavimentos, pois reflete o comportamento elástico da mistura sob carregamentos repetitivos, simulando os provocados pelo tráfego de veículos. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes estabelece na Norma DNIT 135/2018 – ME os procedimentos metodológicos para determinar o módulo de resiliência de misturas asfálticas na temperatura de 25° C (CCR, 2018). A Figura 2.12 mostra um exemplo de equipamento usado para determinar o módulo de resiliência.

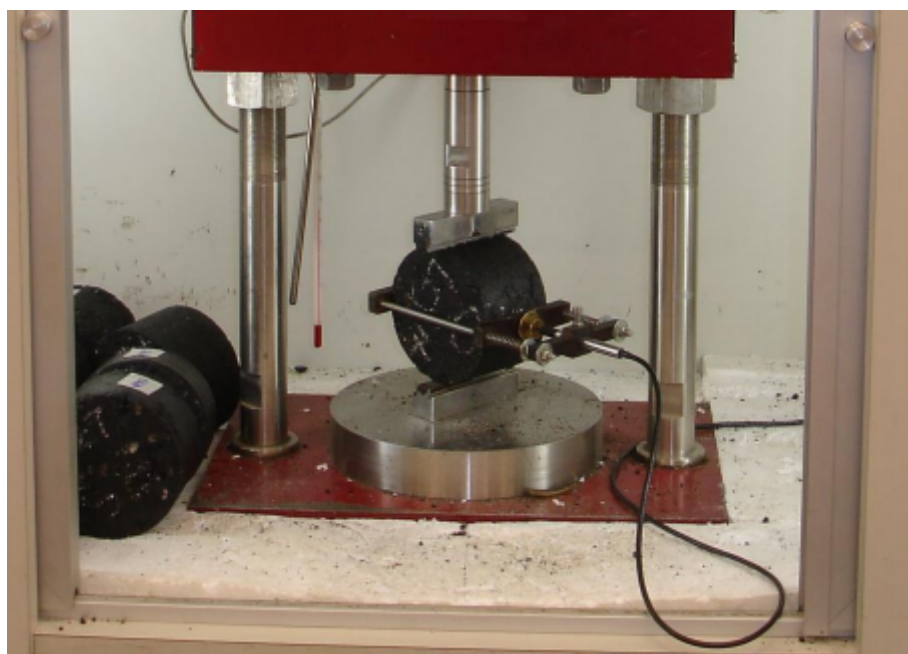


Figura 2.12 - Equipamento utilizado para determinação do MR de misturas asfálticas. Fonte: DNIT, 2018.

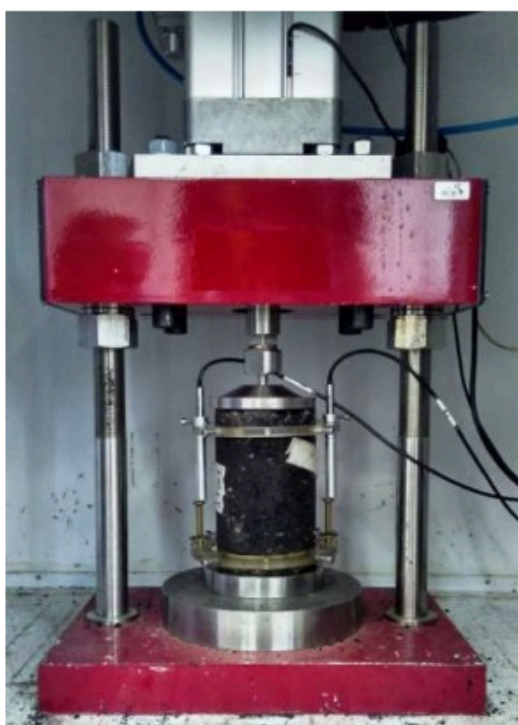
#### 2.2.3.5.2 Ensaio uniaxial de carga repetida - deformação permanente

Afundamentos por deformação permanente são um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuídos ao revestimento ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos diversos. As camadas não asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma seleção dos materiais e compactação adequada e um bom projeto estrutural de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros (BERNUCCI et al, 2022).

Para prever esta falha em revestimentos, por meio de ensaios laboratoriais, é frequentemente utilizado o ensaio de *creep* dinâmico cujo resultado final é apresentado em termos do chamado *flow number* (BORGES, 2014)

O ensaio de uniaxial de carga repetida é realizado quase da mesma maneira que o ensaio de *creep* estático, o que os diferencia é o carregamento e o tempo de duração do ensaio. Neste ensaio os corpos de provas são submetidos a cargas de compressão uniaxiais dinâmicas (pulsos de carga com duração de 1,0 s, sendo o carregamento de 0,1 s e o de recuperação de 0,9 s) durante 3600 s (NG, 2013).

No Brasil existem duas normas técnicas para realização do ensaio, a ABNT NBR 16505 - resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida e a norma DNIT 184/2018 - ME - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. As duas utilizam o mesmo parâmetro que é o número de fluxos (*flow number*). O *flow number* é o número de ciclos correspondente à taxa de deformação mínima. A Figura 2.13 mostra em (a) o esquema de montagem do ensaio e em (b) o comparativo entre uma amostra antes e depois de passar pelos carregamentos.



**(a) esquema de montagem do ensaio**



**(b) corpo de prova antes e depois do ensaio**

Figura 2.13 - Ensaio uniaxial de carga repetida. Fonte: DNIT, 2018.

### 2.2.3.5.3 Ensaio Marshall

Trata-se de um ensaio de estabilidade e fluência de misturas asfálticas utilizando um equipamento chamado de Marshall. De acordo com o DNIT (2024), a estabilidade Marshall é a resistência à compressão radial máxima apresentada pelo corpo de prova ensaiado e a fluência Marshall é a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima. A Figura 2.14 mostra os equipamentos utilizados para execução do ensaio.



Figura 2.14 - Prensa para o Ensaio de Estabilidade Marshall. Fonte: Garcia, 2014.

As etapas do Ensaio Marshall são: compactação dos corpos de prova com diferentes teores de ligante, após o esfriamento por completo dos corpos de prova moldados, temos a submersão destes na água a 60°C por 30 minutos e por fim a compressão mecânica na prensa Marshall que irá pressionar o molde e monitorar a carga exercida sobre ele até que o corpo de prova se deforme ou rompa, medindo assim a estabilidade e a fluência (ROUMANOS; SANTOS, 2023).

### 2.2.3.5.4 Resistência à fadiga

O fenômeno de fadiga é caracterizado pela deterioração estrutural que um material está sujeito quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas,

resultando assim, em um trincamento do pavimento, que pode até culminar na sua ruptura após um número suficiente de repetições de carregamento (COLPO, 2014)

Normatizado no Brasil pela norma DNIT 183/2018 - ME, o ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada tem o objetivo de determinar o comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob um carregamento repetido, à tensão constante.

O ensaio de fadiga normatizado pelo DNIT em 2018 tem sido realizado no país à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. Utiliza-se uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. Para manter a temperatura controlada utiliza-se uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato (BERNUCCI et al, 2022). A Figura 2.15 mostra as fases do ensaio.

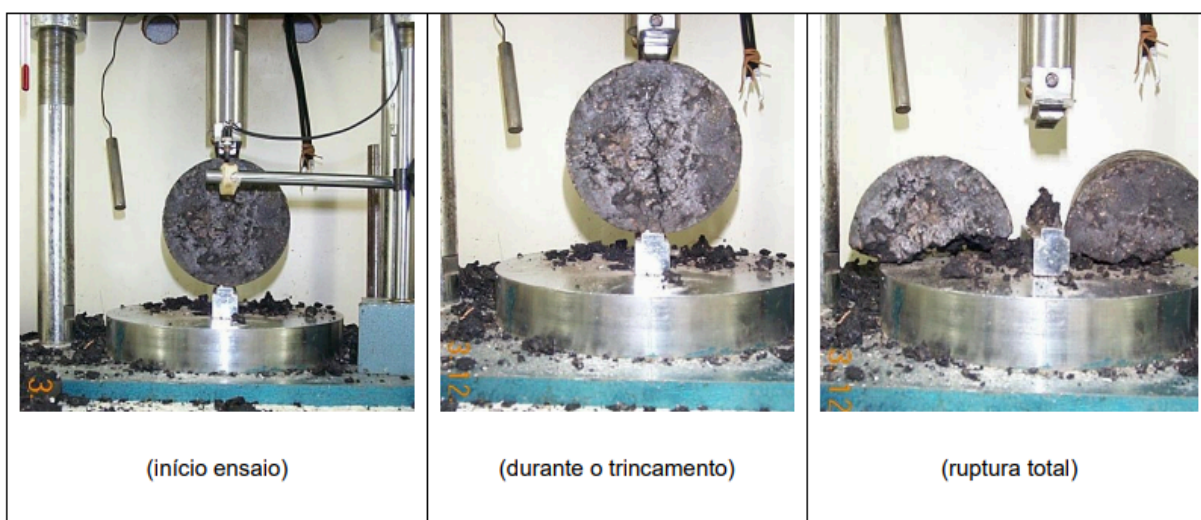


Figura 2.15 - Corpos de prova antes, durante e após a ruptura no ensaio de fadiga por compressão diametral.

Fonte: DNIT, 2018.

É possível determinar a fadiga da mistura por meio de outros ensaios como o de fadiga à flexão em viga quatro pontos que é mais utilizado nos Estados Unidos, Europa e Austrália. Conforme mencionado por Tayebali et al. (1994, apud COLPO, 2014), o ensaio consiste em submeter um corpo de prova, em formato prismático bi-apoiado, a cargas verticais nos dois terços médios da viga originando, assim, um estado de tração uniforme na parte central da amostra, entre os dois pontos de carregamento, zona onde o momento fletor é constante com esforços cortantes nulos.

## 2.3 Fundamentos de Banco de dados

### 2.3.1 Importância de estruturar dados

Pode-se dizer que um banco de dados é um sistema que armazena e organiza informações de forma estruturada, Costa (2021) complementa dizendo que é válido usar como analogia um armário eletrônico de arquivamentos, ou seja, um repositório ou recipiente para uma coleção de arquivos de dados computadorizados, onde os usuários ou os programadores irão fazer as requisições de dados. Trata-se, portanto, de um repositório informatizado que permite o armazenamento, a manipulação e a consulta de dados de forma estruturada.

A estruturação adequada dos dados é essencial para garantir que as informações possam ser acessadas de maneira rápida, confiável e eficiente. Bancos de dados bem organizados seguem princípios como a normalização, que reduz redundâncias e melhora a integridade dos dados, facilitando a navegação entre tabelas relacionadas (ELMASRI; NAVATHE, 2016).

Com os dados organizados, é mais fácil realizar consultas usando linguagens como SQL (*Structured Query Language*) ou mesmo em planilhas eletrônicas, como o *Microsoft Excel* e *Google Planilhas*. Isso é crucial para responder rapidamente a perguntas específicas e consultar dados relevantes. Dessa forma, mesmo usuários com conhecimento básico conseguem acessar informações relevantes por meio de ferramentas de consulta e interfaces simplificadas construídas sobre o banco de dados.

Dados bem estruturados são mais fáceis de preparar para análises estatísticas, reduzindo o esforço necessário para limpeza e transformação. A organização permite que ferramentas de análise ou algoritmos identifiquem padrões ou tendências nos dados, como frequência de dados ou anomalias.

Além disso, bancos de dados bem estruturados permitem a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*), possibilitando a identificação de padrões, tendências e anomalias nos dados. A capacidade de gerar *insights* a partir dessas análises é crucial para a tomada de decisões fundamentadas em dados, especialmente em áreas que exigem monitoramento contínuo, como a engenharia de pavimentação.

A qualidade de um banco de dados depende não apenas da sua organização, mas também da confiabilidade dos dados armazenados. Um dos desafios mais comuns em análise de dados é a presença de viés, que pode distorcer resultados e levar a conclusões errôneas. O

viés pode surgir de diversas formas, incluindo erros de medição, seleção inadequada da amostra e influência de fatores externos na coleta dos dados (MITCHELL, 1997).

Para diminuir o viés, é fundamental garantir a diversidade da amostra e utilizar métodos estatísticos que reduzam a influência de dados desbalanceados. Em bancos de dados relacionados a ensaios de pavimentação, o viés pode ser reduzido garantindo que os ensaios sejam realizados sob condições padronizadas e controladas, ou seja, devem seguir os mesmos procedimentos, independente da região onde são realizados.

### 2.3.2 Tratamento de dados faltantes

Outro problema recorrente em bancos de dados é a presença de dados faltantes ou incompletos, que podem comprometer a precisão das análises. Em estudos experimentais, a ausência de determinados valores pode ocorrer devido a falhas na medição, erros de registro ou até limitações dos equipamentos utilizados (LITTLE; RUBIN, 2019). No caso dos dados relativos aos ensaios, os dados faltantes se explicam pelo fato de que nem todas as amostras foram submetidas aos mesmos ensaios ou metodologias de execução, ou se foram, não tivemos acesso aos resultados.

Para lidar com esse problema, algumas abordagens comuns incluem:

- **Remoção de entradas incompletas:** útil quando o volume de dados ausentes é pequeno e sua remoção não impacta significativamente a análise;
- **Imputação de valores:** técnica que substitui os dados ausentes por valores estimados com base em médias, medianas ou técnicas mais avançadas, como regressão e algoritmos de aprendizado de máquina;
- **Uso de modelos estatísticos robustos:** abordagens que lidam diretamente com dados faltantes sem necessidade de imputação, como regressão múltipla e técnicas bayesianas.

A escolha da melhor abordagem depende do contexto e da quantidade de dados disponíveis. Neste banco de dados de pavimentação, a imputação com valores médios de ensaios similares poderia ser uma solução prática para minimizar o impacto dos dados ausentes, porém, como a quantidade de dados faltantes para esse caso é muito grande, optou-se por não preencher os vazios.

Os *outliers* são valores atípicos que se desviam significativamente do restante dos dados e podem indicar erros experimentais, variações naturais ou fenômenos inesperados.

Identificá-los corretamente é essencial para evitar distorções na análise estatística (AGGARWAL, 2017).

Esses valores podem ser detectados por meio de métodos estatísticos como desvio padrão, técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*) e por meio de gráficos de dispersão que podem identificar pontos fora do padrão. Outro ponto interessante, é diferenciar outliers de valores raros. O segundo, apesar de também parecer discrepante, representa um valor real possível, mas pouco explorado no banco de dados. Ao contrário do primeiro, esses dados raros tendem a melhorar a generalidade do modelo.

Em bancos de dados experimentais, *outliers* podem indicar tanto erros de medição quanto fenômenos físicos relevantes. Por isso, ao identificar um valor atípico, é necessário avaliar se ele deve ser corrigido, removido ou tratado como um dado relevante para a pesquisa. Assim, no caso de ensaios de pavimentação, encontrar um valor atípico para um mesmo ensaio entre amostras diferentes, pode indicar que provavelmente tal dado é inconsistente ou as características das amostras são bastante diferentes. Uma possível solução é verificar se existem especificações com valores de referência para comparação dos resultados.

### **2.3.3 Gestão de Dados**

Como visto, a organização dos dados desempenha um papel muito importante na eficiência de consultas e na extração de informações relevantes. No presente estudo, o banco de dados foi estruturado considerando três grupos: ligantes, agregados e misturas. Cada um deles possui informações organizadas separadamente, facilitando a análise dos dados.

A metodologia de agrupamento dos dados será detalhada na Seção 3 (METODOLOGIA) deste trabalho. De forma geral, os dados foram divididos em dois grandes grupos: planilha explicativa, que inclui descrições e procedimentos dos ensaios laboratoriais e planilha de resultados, que contém os resultados dos ensaios. A relação entre esses dois conjuntos de dados permite uma análise integrada e estruturada dos resultados obtidos.

A gestão eficiente de bancos de dados envolve o uso de ferramentas que permitem a organização, o armazenamento e a manipulação das informações de maneira estruturada. Uma das ferramentas mais comuns é o *Microsoft Excel*, que possibilita a criação de tabelas, filtros e fórmulas para análise de dados. Sua interface simplificada permite a manipulação intuitiva das informações, sendo amplamente utilizado para armazenar dados em pequena e média escala (WALKENBACH, 2019).

Para bases de dados mais complexas e volumosas, linguagens como SQL (*Structured Query Language*) e ferramentas como *Python* são mais apropriadas. O SQL permite a criação e consulta de grandes volumes de dados estruturados, enquanto o *Python* se destaca na automação de tarefas, análises avançadas e integração com outras plataformas (MCKINNEY, 2017).

No contexto deste estudo, a base preliminar de armazenamento de dados é o *Microsoft Excel*, pois oferece uma maneira simplificada e acessível para organização e gestão das informações. No entanto, à medida que novos dados forem incluídos, pode-se considerar a utilização de sistemas mais robustos e eficientes que permitam maior automação e integração.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo final compilar, estruturar e disponibilizar os resultados de ensaios de ligantes, agregados e misturas asfálticas em um banco de dados amplo e unificado. A proposta é consolidar essas informações em um formato acessível e estruturado, facilitando a criação de novos bancos de dados menores e específicos para estudos diversos, incluindo aqueles que utilizam técnicas de aprendizado de máquinas.

Além disso, o banco de dados foi concebido para permitir a incorporação contínua de novos dados, promovendo a expansão e atualização do acervo. Tudo é disponibilizado gratuitamente, criando um hub centralizado que concentra e padroniza os dados, simplificando o acesso e impulsionando pesquisas. Para isso, planilhas do *Microsoft Excel* são utilizadas.

Para atingir esse objetivo, o trabalho inclui a definição dos ensaios, bem como das variáveis mais relevantes, e a coleta de um número significativo de ensaios disponíveis, maximizando a abrangência e a utilidade do banco de dados. A definição dos ensaios e das suas variáveis foi realizada por meio de uma extensa pesquisa bibliográfica, abrangendo livros, trabalhos acadêmicos, artigos científicos e relatórios técnicos. Na Tabela 3.1 os ensaios incluídos são apresentados.

<b>Ensaio Incluído no Banco de Dados</b>		
<b>Ligantes</b>	<b>Agregados</b>	<b>Misturas</b>
Penetração	Análise Granulométrica	Teor de ligantes
Viscosidade	Densidade Relativa Aparente	Módulo de resiliência
Ponto de amolecimento	Massa Específica Aparente	Módulo dinâmico
Dutilidade	Abrasão Los Angeles	Resistência à deformação permanente
Solubilidade	Resistência ao Esmagamento	Resistência à tração
Ponto de fulgor	Resistência mecânica pelo método dos 10% de finos	Danos por fadiga
Espuma	Determinação do índice de forma com crivos	Densidade relativa aparente e massa específica aparente de corpos de prova compactados
Massa específica	Porcentagem de partículas achatadas e alongadas em agregados graúdos	Microrrevestimentos a frio e Lama Asfáltica — determinação de perda por abrasão úmida (wtat)
Ponto de ruptura de Frass	Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	Ensaio de estabilidade e fluência Marshall
RTFOT	Adesividade a ligante betuminoso	
Cromatografia de permeação em gel (GPC)		
Análise térmica (TGA e DSC)		
Efeito do calor e do ar (ECA)		
Recuperação elástica		
Separação de fases		
Coesividade Vialit		
Fragilidade e tenacidade		
Fluência e recuperação de ligantes asfálticos determinados sob tensões múltiplas (MSCR)		
LAS – Linear Amplitude Sweep		

Tabela 3.1 – Lista de ensaios incluídos no banco de dados, agrupados em: Ligantes, Agregados e Misturas. Fonte: Autoria Própria, 2025.

Os dados coletados foram organizados em três categorias principais para facilitar a análise e a compreensão: ligantes asfálticos, agregados e misturas asfálticas. Para cada uma dessas categorias, foram criadas tabelas que agrupam as variáveis dos respectivos ensaios.

Foram criados dois grupos de dados, o primeiro apresenta um glossário de ensaios e o segundo mostra os dados dos ensaios catalogados. Os dois grupos possuem três abas para melhor organização (Ligantes, Agregados e Misturas).

O glossário contém todos os ensaios e todas as informações pertinentes sobre eles, como nome do ensaio, descrição, variáveis de entrada e saída, com suas respectivas unidades, normas técnicas de execução e um breve resumo do procedimento de execução do ensaio. Ressaltando que essa planilha não substitui a leitura e consulta da norma, servindo apenas como facilitador de consulta dentro do contexto do banco de dados desenvolvido. O formato do glossário é ilustrado na Figura 3.1.

ID	Ensaio	Descrição	Normas	Variáveis de entrada	Unidade	Proced
Lig_1	Penetração	Teste de consistência do ligante. Quanto menor a penetração, melhor.	NBR 6576	Temperatura, tempo e carga	Temperatura em graus Celsius (°C), tempo em segundos (s) e carga em gramas (g)	Mantem-se o ligante padrão de 25°C e aplica através de uma agulha seg
Lig_2	Viscosidade	Determinção da viscosidade absoluta. Mede a resistência do ligante ao escoamento.	NBR 5847	Tempo e fator de calibração do viscosímetro	Tempo em segundos (s) e fator do viscosímetro em poise (pascal segundo) por segundo. (Poise/s) ou ((Pa*s)/s)	Verifica-se o tempo qu ligante escoo totalme vácuo e temperatura t (Tempo x fator
Lig_3	Ponto de amolecimento	Determina a temperatura na qual o ligante amolece.	NBR 6560	Temperatura	Graus Celsius (°C)	Aquecer a amostra e fluidez e inseri-la em ar os anéis, novamente : recipiente com água, c os anéis até que elas : recipiente. Verifica-mento que as esfer
Lig_4	Dutibilidade	Verificação do alongamento máximo de um corpo de prova do ligante até a ruptura.	NBR 6293	Temperatura e velocidade de tracionamento	Temperatura em graus Celsius (°C) e velocidade em centímetros por minuto (cm/min)	É medida a distância er corpo de prova do liga um aparelho chama

Figura 3.1 - Parte da planilha explicativa (glossário), destacando as três abas de ensaios.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

Conforme a Figura 3.1 acima, os dados apresentados relativos aos ensaios sobre ligantes asfálticos.

Já a planilha expositiva, traz os dados de todos os ensaios coletados de várias amostras diferentes. Nem todas as amostras têm resultados em todos os ensaios, pois os dados não foram encontrados ou eles não foram realizados.

Para facilitar a consulta e a inclusão de novos dados, que é efetuada de maneira controlada, cada linha da tabela representa uma amostra e esta possui um identificador que permite identificar os mais diversos tipos de ensaios ao longo das diferentes abas. Por exemplo, a amostra identificada como *Am\_1* está presente nas três abas (ligantes, agregados e misturas), com os resultados específicos para cada tipo de ensaio. Dessa forma, é possível concatenar os resultados dos diferentes ensaios realizados para uma mesma amostra. Isso é ilustrado na Figura 3.2.

ID							
	Penetração	Viscosidade	Ponto de amolecimento	Dutibilidade	Solubilidade	Ponto de fulgor	Espuma
		135°C					
Am_1	54,0	1258,0	58,8				
Am_2	28,0	587,5	53,2				
Am_3	28,0	587,5	53,2				
Am_4	69,0	1732,0	55,6				
Am_5	43,0	445,0	48,7	Células vazias Não há resultados do ensaio para a amostra			
Am_6	43,0	445,0	48,7				
Am_7	51,0	810,0	55,1				
Am_8	44,0	1048,7	59,6				
Am_9	53,0	1229,0	60,9				
Am_10	53,0	1229,0	60,9				
Am_11	47,0	460,8	52,6				
Am_12	46,0	458,3	50,2				
Am_13	46,0	458,3	50,2				

< >
Ligantes
Agregados
Misturas
+

Figura 3.2 – Parte da planilha expositiva, destacando as abas e as células vazias.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

Ao selecionar os dados disponibilizados, verificou-se que cada trabalho de onde os dados foram retirados, muitas vezes se utilizam de maneiras diferentes de organizar os dados, mesmo com as normas e demais documentos regulatórios existentes. Dentre as divergências encontradas encontram-se: alguns usam o separador decimal e de milhar, em alguns casos como vírgula e em outros como ponto, ver Figura 3.3. Outro exemplo é na própria definição das variáveis apresentadas. Por exemplo, no ensaio de módulo complexo da

mistura asfáltica, alguns apresentam os dados dos eixos x e y da curva completa, outros apenas os coeficientes da curva sigmóide que representa essa curva etc. Essas divergências dificultam a unificação do banco de dados e ressaltam a necessidade de uma padronização, como a proposta por esse trabalho.

Mistura Asfáltica	1	2	3	4	5	6	7
Ligante Asfáltico	CAP 30/45	CAP 50/70	AMP1	AMP2	AMP3	AMP4	AB1
Frequência Reduzida (Hz)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)
3,92E+05	21.528	20.988	19.976	20.033	21.182	20.836	18.908
1,57E+05	21.344	20.690	19.511	19.606	20.964	20.527	18.366
7,84E+04	21.169	20.412	19.102	19.226	20.757	20.243	17.898
1,57E+04	20.604	19.543	17.937	18.126	20.097	19.381	16.596
7,84E+03	20.273	19.050	17.332	17.546	19.715	18.905	15.936
1,57E+03	19.228	17.565	15.667	15.922	18.527	17.502	14.174
3,42E+03	19.788	18.349	16.519	16.758	19.160	18.236	15.067
1,37E+03	19.119	17.414	15.509	15.766	18.404	17.362	14.009
6,84E+02	18.504	16.586	14.666	14.930	17.719	16.597	13.147

Mistura Asfáltica	61	62	63	64	65	66	67
Ligante Asfáltico	CAP 30/45	CAP 50/70	AMP1	AMP2	AMP3	AMP4	AB1
Frequência Reduzida (Hz)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)	E* (MPa)
3,92E+05	21,827	21,336	20,950	21,984	21,287	21,905	19,474
1,57E+05	21,668	21,072	20,583	21,736	20,974	21,692	18,985
7,84E+04	21,517	20,828	20,253	21,505	20,684	21,485	18,560
1,57E+04	21,024	20,071	19,270	20,782	19,794	20,792	17,371
7,84E+03	20,733	19,645	18,740	20,370	19,297	20,375	16,764
1,57E+03	19,807	18,361	17,215	19,116	17,817	19,026	15,117
3,42E+03	20,305	19,039	18,007	19,780	18,594	19,753	15,956
1,37E+03	19,709	18,230	17,065	18,988	17,668	18,883	14,962
6,84E+02	19,157	17,510	16,255	18,277	16,853	18,077	14,139

Figura 3.3 – Parte de tabela de resultados do ensaio de módulo dinâmico. No primeiro caso o separador decimal é a vírgula e o separador de milhar é o ponto; no segundo caso é o inverso. Fonte: Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR), 2018.

Observadas essas divergências, neste trabalho foram adotados separadores de decimal com vírgula e não foram utilizados separadores de milhar, os ajustes foram feitos de forma manual. Ver Figura 3.4.

ID	Módulo dinâmico												
	Frequência Reduzida (Hz)												
	6,84E+02	1,37E+02	6,84E+01	1,37E+01	2,50E+01	1,00E+01	5,00E+00	1,00E+00	5,00E-01	1,00E-01	3,10E-01	1,24E-01	6,20E-02
Am_55	18504	16656	15661	12903	14005	12304	10929	7663	6334	3727	5479	4028	3117
Am_56	16586	14244	13068	10069	11223	9465	8139	5300	4262	2411	3629	2613	2010
Am_57	14666	12478	11457	9006	9929	8530	7496	5287	4456	2873	3934	3056	2499
Am_58	14930	12730	11691	9175	10125	8684	7615	5333	4478	2864	3944	3049	2487
Am_59	17719	15705	14650	11825	12937	11230	9890	6844	5658	3409	4910	3664	2895
Am_60	16597	14472	13415	10721	11760	10175	8964	6286	5257	3298	4610	3523	2840
Am_61	13147	10979	10001	7731	8573	7303	6385	4479	3780	2470	3346	2620	2163
Am_62	13700	11511	10509	8155	9033	7707	6743	4733	3994	2610	3534	2769	2287
Am_63	13040	10762	9737	7385	8253	6947	6015	4125	3451	2224	3038	2362	1945
Am_64	17705	15698	14646	11826	12936	11232	9892	6846	5659	3410	4911	3665	2895
Am_65	17503	15601	14612	11965	13008	11406	10137	7191	6009	3685	5250	3955	3132
Am_66	13200	11423	10632	8791	9477	8439	7675	6020	5374	4062	4956	4222	3726

Figura 3.4 – Padronização dos separadores decimal e de milhar. Fonte: Autoria Própria, 2025.

Outros exemplos que podem ser citados são alguns dados de granulometria coletados, em alguns casos apresentando porcentagem retida na peneira, em outros casos apresentando porcentagem passante na peneira, e sem padronização no tamanho das peneiras, ou seja, não há um padrão na exposição dos dados. Em outros casos a formatação das tabelas não uniforme, com falta de clareza nas informações apresentadas, necessitando um conhecimento prévio para entender do que se trata.

Neste trabalho foram padronizados os dados referentes aos percentuais retidos nas peneiras. Foram selecionadas todas as peneiras de aberturas citadas nos trabalhos pesquisados, apesar de algumas amostras não terem sido ensaiadas nelas, conforme mostrado na Figura 3.5.

ID	Análise Granulométrica														
	Peneiras/percentual retido (%)														
	50,80	37,50	25,40	19,00	12,70	9,50	4,75	2,36	2,00	1,18	0,60	0,425	0,30	0,18	Fundo
Am_1	0,00	0,00	0,00	2,56	18,24	6,62	18,09	16,76	7,80	7,57		7,70		6,50	4,28
Am_2	0,00	0,00	0,00	2,56	18,24	6,62	18,09	16,76	7,80	7,57		7,70		6,50	4,28
Am_3	0,00	0,00	0,00	0,88	6,27	2,28	36,20	22,90	6,55	6,31		6,40		5,42	3,55
Am_4	0,00	0,00	0,00	2,56	18,24	6,62	18,09	16,76	7,80	7,57		7,70		6,50	4,28
Am_5	0,00	0,00	0,00	0,88	6,27	2,28	36,20	22,90	6,55	6,31		6,40		5,42	3,55
Am_6	0,00	0,00	0,00	2,56	18,24	6,62	18,09	16,76	7,80	7,57		7,70		6,50	4,28
Am_7	0,00	0,00	0,00	3,49	13,74	6,65	25,31	11,58	8,65	7,49		7,04		6,62	4,77
Am_8	0,00	0,00	0,00	3,49	13,74	6,65	25,31	11,58	8,65	7,49		7,04		6,62	4,77
Am_9	0,00	0,00	0,00	4,16	13,15	17,99	18,11	14,94	6,53	6,50		5,23		5,48	3,58
Am_10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,88	23,48	23,69	10,86	10,76		8,45		8,81	5,64
Am_11	0,00	0,00	0,00	4,16	13,15	17,99	18,11	14,94	6,53	6,50		5,23		5,48	3,58
Am_12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	7,62	13,73	23,45	7,46	7,57	9,88		9,90	4,55

Figura 3.5 – Resultados de ensaio de peneiramento padronizado com o percentual retido nas peneiras. Fonte: Autoria Própria, 2025.

Para padronização dos percentuais retidos nas peneiras, para os dados coletados que apresentavam apenas percentuais passantes, foi necessário utilizar uma simples operação de subtração.

$PR = Pant - P_{atual}$

PR: Percentual retido

Pant: percentual passante na peneira anterior

P atual: percentual passante na peneira atual

Vale ressaltar que os resultados dos demais ensaios não necessitaram de ajustes, pois já estavam nos mesmos parâmetros do banco de dados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Descrição geral dos ensaios e estatística básica

Neste trabalho foram estudados um total de 36 ensaios, sendo 19 sobre ligantes, representando 52,78% do total, 10 sobre agregados - 27,78% e 7 sobre misturas asfálticas - 19,44%. A relação de todos os ensaios pode ser consultada na tabela 3.1.

Foram reunidas 355 amostras de 25 referências de diferentes partes do país, 54 amostras foram disponibilizadas pela Petrobrás, 144 pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias e as demais foram pesquisadas em teses e dissertações de universidades brasileiras. A tabela 4.1 mostra a quantidade de amostras por referência consultada.

ID	Referência Bibliográfica
Am_1 - Am_54	Dados da Petrobrás
Am_55 - Am_198	Relatório CCR-ND-MOD-RF-MAR/2018
Am_199 - Am_205	Rodrigues (2010)
Am_206 - Am_219	Onofre (2012)
Am_220 - Am_221	Bessa (2012)
Am_222 - Am_224	Ponte (2013)
Am_225 - Am_227	Wargha Filho (2013)
Am_228 - Am_243	Oliveira (2015)

Am_244 - Am_247	Borges (2014)
Am_248 - Am_253	Xavier (2016)
Am_254 - Am_259	Gouveia (2016)
Am_260 - Am_264	Bastos (2016)
Am_265 - Am_269	Lucas Júnior (2018)
Am_270 - Am_277	Ferreira (2016)
Am_278 - Am_279	Nascimento (2008)
Am_280 - Am_295	Almeida Jr (2016)
Am_296 - Am_301	Pazos (2015)
Am_302 - Am_304	Oliveira (2022)
Am_305 - Am_308	Nunes (2017)
Am_309 - Am_313	Queiroz (2022)
Am_314 - Am_323	Barros (2017)
Am_324 - Am_329	Mocelin (2018)
Am_330 - Am_334	Colpo (2019)
Am_335 - Am_341	Zappe (2019)
Am_342 - Am_347	Dapper (2020)
Am_348 - Am_355	Autor (*)

Tabela 4.1 - Amostras por referência consultada. \*Dados não publicados e cedidos pelos autores Fonte: Autoria Própria, 2025.

A diversidade das referências utilizadas garante uma visão abrangente sobre os ensaios, contemplando estudos desenvolvidos em diferentes contextos regionais e institucionais. Além disso, a presença de dados provenientes da Petrobrás e do Centro de Pesquisas Rodoviárias reforça a confiabilidade e representatividade das informações reunidas.

A média de amostras por referência foi de 14,2, ou seja, cada referência contribuiu em média com 14,2 amostras e a referência que mais contribuiu, com 40,56% das amostras, foi o Centro de Pesquisas Rodoviárias.

## 4.2 Organização dos atributos no Banco de Dados

Conforme mostrado na seção 3, os dados foram organizados por meio de identificadores (IDs), de modo a facilitar a pesquisa e a extração das informações. No glossário de ensaios, os identificadores são as siglas *Lig*, *Agr* e *Mis*, seguido do número do ensaio, conforme mostrado na Figura 3.1. O critério de ordenação dos ensaios foi iniciar com os ensaios empíricos e conhecidos e depois seguir para os ensaios mais reológicos.

Além dos IDs, no glossário, o usuário terá acesso a uma breve descrição do ensaio, normas de execução e dados de saída e entrada. Isso facilita a compreensão sobre o que é o ensaio e para que serve.

Já no bloco de dados de ensaios, os identificadores são compostos pela sigla *Am* seguido do número da amostra, conforme mostrado na Figura 3.2. Nesse caso, não há uma ordenação lógica, visto que as informações inseridas no banco de dados foram atualizadas conforme a disponibilidade e serão continuamente atualizadas.

Alguns ensaios possuem maneiras diferentes de expressar os resultados, como é o caso do ensaio de determinação do módulo dinâmico. Geralmente se usam parâmetros de frequência e temperaturas padrões, porém em outros casos usa-se frequências reduzidas sem atribuição de temperatura.

Ao longo das várias pesquisas por novos dados nos deparamos com resultados nesses dois modelos, alguns com frequência reduzida, outros com parâmetro de temperatura. Assim, neste banco de dados reunimos, a princípio, apenas resultados com módulo dinâmico expressos com o parâmetro de frequência reduzida, os parâmetros da curva sigmóide que aproxima a curva, e os coeficientes de shift de temperatura. A Figura 4.1 mostra uma parte do banco de dados na tabela do módulo dinâmico. Outras fontes de dados que fornecem uma tabela de valores de módulo dinâmico para algumas frequências e temperaturas ainda não foram incluídos, pois precisam ser tratados para ficar no formato adotado. Um exemplo disto pode ser visto na Figura 4.2.

Módulo dinâmico									
Frequência Reduzida (Hz)									
1	1,00E+01	5,00E+00	1,00E+00	5,00E-01	1,00E-01	3,10E-01	1,24E-01	6,20E-02	1
	11232	7072	3640	2039	1110	4911	3003	2039	
	11406	10137	7191	6009	3685	5250	3955	3132	
	8439	7675	6020	5374	4062	4956	4222	3726	
	10700	9382	6395	5230	3018	4495	3269	2513	
	10132	8721	5637	4492	2437	3789	2661	1996	
	8023	6922	4645	3826	2349	3326	2513	2019	
	8232	7012	4510	3627	2087	3097	2253	1757	
	10089	8623	5512	4400	2484	3734	2687	2084	
	10960	9543	6383	5182	2976	4437	3220	2488	
	7161	6297	4490	3818	2535	3396	2684	2228	
	8600	7573	5339	4482	2825	3939	3018	2429	
	7709	6718	4640	3874	2442	3397	2605	2110	

Figura 4.1 - Parte do banco de dados mostrando o parâmetro de frequência reduzida para determinação do módulo dinâmico. Fonte: Autoria própria, 2025.

Frequência (Hz)	$ E^* $ (MPa)				
	Temperatura (°C)				
	-10	4	21	37	54
25	47165	32141	17737	6599	2580
10	45487	29282	14712	4748	1656
5	43855	27084	12588	3691	1231
1	39941	21900	8370	2041	632
0,5	38068	19757	6837	1541	498
0,1	33616	15150	4170	905	371

Figura 4.2 - Valores de módulo dinâmico em função de temperatura e frequência. Fonte: Borges, 2014.

Além do módulo complexo, outro ensaio que não apresentou dados padronizados foi o de análise granulométrica. Nesse caso, é mais compreensível, pois cada autor utilizou as peneiras de acordo com a necessidade de sua pesquisa.

Por exemplo, apenas uma amostra possui resultados de percentual retido na peneira de uma polegada (25,0 mm) e nenhuma amostra apresentou dados de peneiramento para as peneiras de duas polegadas (50,0 mm) e uma polegada e meia (37,5 mm). Contudo, esses parâmetros foram mantidos, pois futuramente pode-se ter acesso a novas amostras que

tenham esses dados.

Em casos como esses citados, há a necessidade de mais estudo para adaptar diferentes formatos à estrutura proposta neste banco de dados, pois não é viável que a cada novo formato, novas colunas de atributos sejam incluídas.

#### **4.3 Quantitativos e Análise de vazios no Banco de Dados**

Como já citado algumas vezes, esse banco de dados possui muitos vazios, ou seja, informações faltantes. Isso é completamente normal para essa área de estudo, já que cada trabalho irá apresentar apenas resultados que lhe convém. Por exemplo, um estudo sobre deformação permanente de uma mistura irá apresentar apenas resultados relacionados a isso.

Sendo assim, vale destacar que todas as amostras aqui apresentadas são incompletas, ou seja, apresentam pelo menos um dado de ensaio faltante.

Os índices que mais apresentaram dados foram teor de ligantes e volume de vazios, ambos presentes em 310 amostras. Já os ensaios que não apresentaram dados foram os descritos na Tabela 4.2.

Ensaio sem dados registrados		
Ligantes	Agregados	Misturas
Dutilidade	Resistência ao Esmagamento	Densidade relativa aparente e massa específica aparente de corpos de prova compactados
Espuma	Resistência mecânica pelo método dos 10% de finos	Microrrevestimentos a frio e Lama Asfáltica — determinação de perda por abrasão úmida (wtat)
Solubilidade	Determinação do índice de forma com crivos	
Ponto de ruptura de Frass	Porcentagem de partículas achatadas e alongadas em agregados graúdos	
Cromatografia de permeação em gel (GPC)	Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	
Análise térmica (TGA e DSC)	Adesividade a ligante betuminoso	
Recuperação elástica		
Separação de fases		
Coesividade Vialit		
Fragilidade e tenacidade		

Tabela 4.2 - Ensaio sem dados registrados. Fonte: Autoria própria, 2025.

A Figura 4.3 apresenta um gráfico que fornece uma visão geral da quantidade de amostras por tipo de ensaio presentes no grupo de ligantes asfálticos.

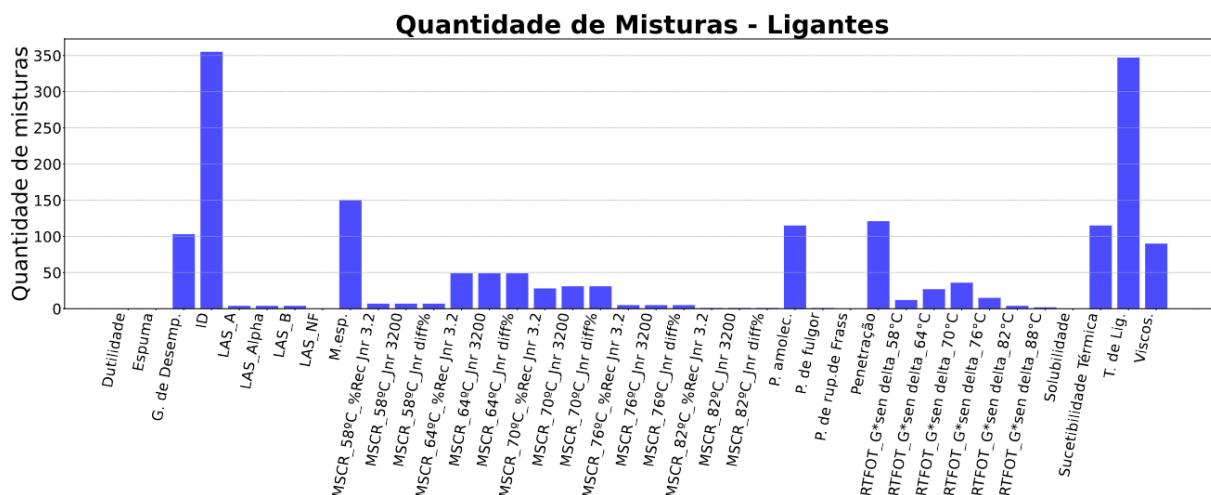


Figura 4.3 - Quantitativo de misturas por ensaio de ligantes. Fonte: Autoria própria, 2025.

Para os ensaios sobre agregados e misturas asfálticas também foram feitos gráficos para melhor análise dos dados, os mesmos estão nas Figuras 4.4 e 4.5.

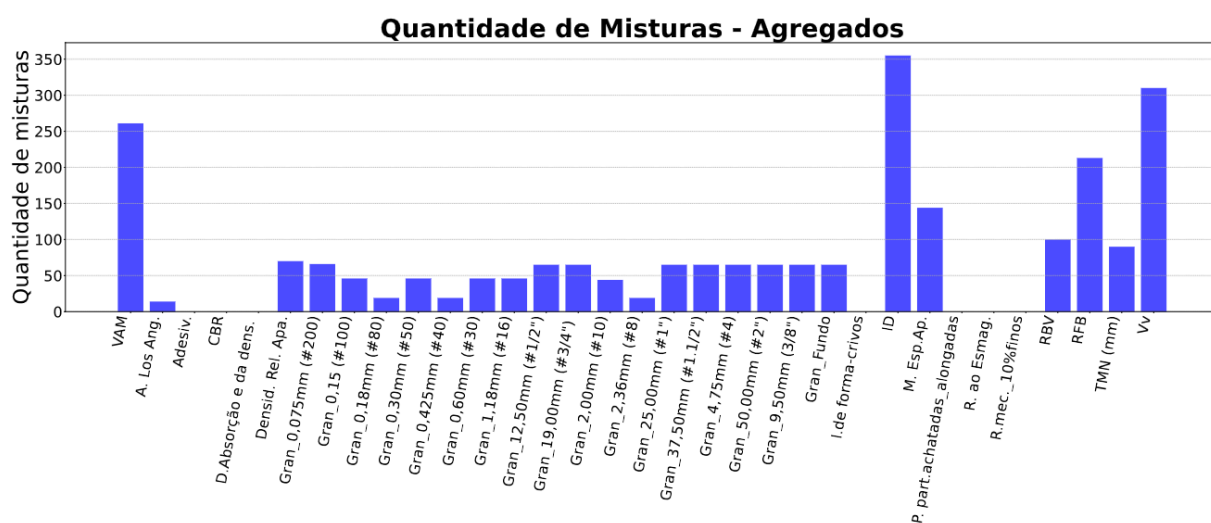


Figura 4.4 - Quantitativo de misturas por ensaio de agregados. Fonte: Autoria própria, 2025.

Em destaque no gráfico acima o volume de vazios (Vv) presente em mais de 300 amostras. Também vale destacar o volume de vazios no agregado mineral (VAM) presente em mais de 250 amostras. Isso mostra a importância desses índices em estudos de misturas asfálticas.

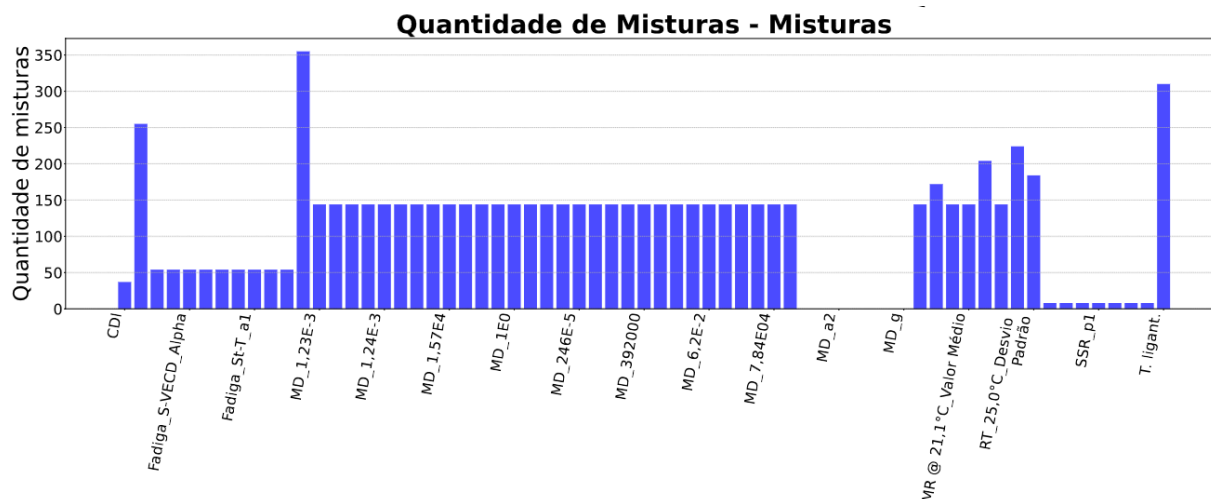


Figura 4.5 - Quantitativo de misturas por ensaio de agregados. Fonte: Autoria própria, 2025.

Em destaque na Figura 4.5 o teor de ligante presente em mais de 300 amostras e também os valores de módulo dinâmico presente em quase 150 amostras.

#### 4.4 Identificação e tratamento de outliers

Os outliers são valores que estão muito distantes da maioria dos dados em um conjunto. Eles podem indicar erros de medição, variações naturais ou até mesmo fenômenos inesperados. No caso deste trabalho, foram feitas análises por meio de diagramas de caixa (*Boxplots*) para todos os ensaios.

Para o grupo dos ligantes, verificou-se por meio do diagrama de caixa, apresentado na Figura 4.6, que os valores de ponto de amolecimento estão mais dispersos que o normal.

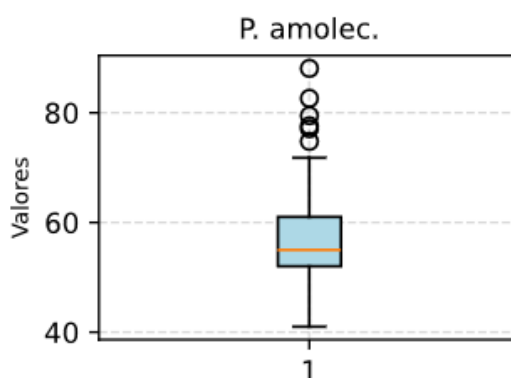


Figura 4.6 - Diagrama de caixa do ensaio de ponto de amolecimento. Fonte: Autoria própria, 2025.

A linha laranja no centro da caixa representa a mediana dos valores, ou seja, o valor central entre todos os encontrados para ponto de amolecimento, que está entre 50°C e



Em resumo, verificou-se que não é aconselhável utilizar técnicas de preenchimento de vazios ou de correção de *outliers*. Vale ressaltar que todos os diagramas de caixa estão disponíveis para consulta na seção de anexos.

## 4.5 Histogramas e estatísticas dos ensaios

Neste tópico serão apresentados histogramas dos principais ensaios e parâmetros constituintes do banco de dados. Esses gráficos permitem visualizar como os valores estão concentrados, identificando tendências e variações típicas de cada propriedade avaliada. A listagem completa dos histogramas está disponível para consulta na seção de anexos.

### 4.5.1 Ensaios de ligantes

O grupo de ligantes totalizam até agora 17 ensaios, o primeiro a ser analisado é o ensaio de penetração, a Figura 4.8 apresenta o histograma referente a esse ensaio.

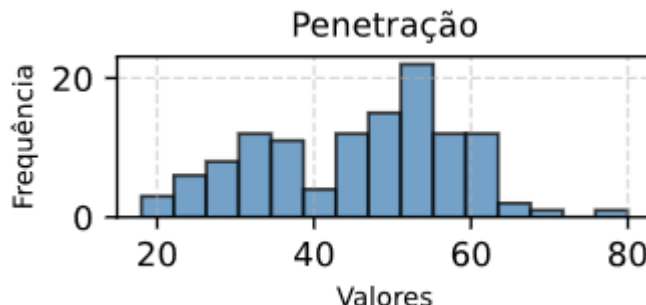


Figura 4.8 - Histograma do ensaio de penetração. Fonte: Autoria própria.

Analisando o gráfico, nota-se uma maior frequência (acima de 20) de valores um pouco acima de 50, isso significa que em mais de 20 amostras, o valor de penetração ficou em torno de 50,0 mm. A média dos valores foi de 45,8 mm e a moda, ou seja, o valor que mais se repetiu foi 55,0 mm. Já a mediana ficou em 48,0 mm, valor bem próximo da média, isso sugere que os valores do ensaio estão bem distribuídos e não há muitos valores extremos influenciando a análise.

O próximo histograma traz informações sobre o ensaio de viscosidade e pode ser visualizado na Figura 4.9.

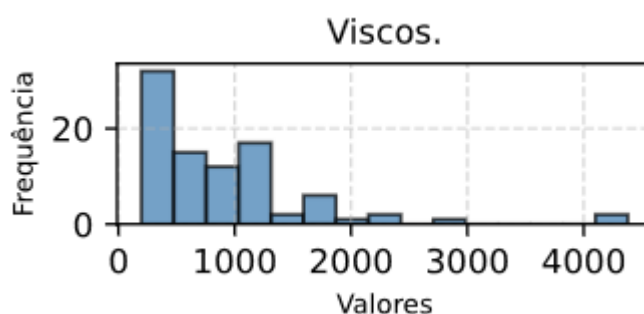


Figura 4.9 - Histograma do ensaio de viscosidade. Fonte: Autoria própria, 2025.

Para o ensaio de viscosidade percebe-se uma maior frequência de valores em torno de 300 cP, a média ficou em 931,1 cP, a mediana em 738,8 cP e a moda 1024,0 cP.

Agora será apresentado o histograma do PG (*performance grade*), nele é possível verificar a frequência dos valores de temperatura para o PG máximo das amostras catalogadas. Observar a Figura 4.10.

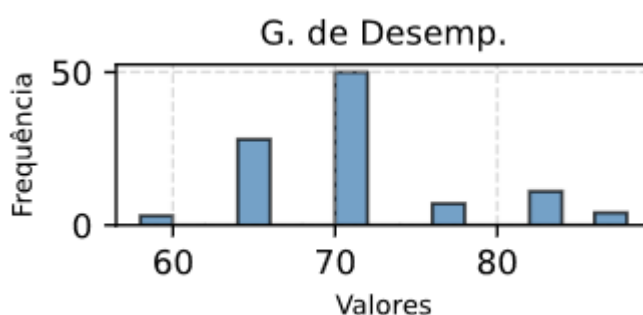


Figura 4.10 - Histograma do *Performance Grade* máximo. Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao observar o gráfico, de imediato é perceptível que os valores mais frequentes para o PG é algo em torno de 70°C, presente em cerca de 50 amostras diferentes, seguido pelos valores em torno de 65°C que estão presentes em cerca de 25 amostras. O valor médio encontrado foi de 70,4°C e a mediana e a moda apresentaram o mesmo valor de 70°C, valores praticamente iguais que sugerem uma distribuição bem equilibrada.

#### 4.5.2 Ensaios de agregados

Na aba de agregados foram disponibilizados 11 ensaios considerados mais relevantes para a área de pavimentação asfáltica, destacando-se o ensaio de análise granulométrica. Nele foram criados histogramas para todas as peneiras apresentadas no banco

de dados. Como a quantidade de gráficos é extensa, optou-se por apresentar as principais peneiras, deixando as demais para serem consultadas na seção de anexos.

A primeira peneira analisada é a de  $\frac{1}{2}$  " ( 12,5 mm). Lembrando que os dados são referentes ao percentual retido, podendo ser observado na Figura 4.11.

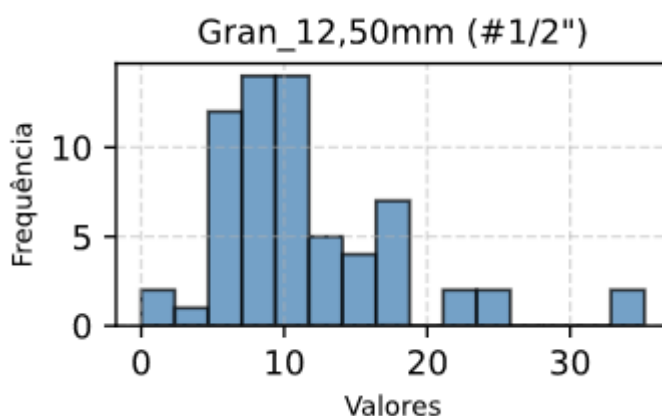


Figura 4.11 - Histograma da peneira de  $\frac{1}{2}$ ". Fonte: Autoria própria, 2025.

A maior frequência está entre valores próximos a 10% de percentual retido, mediana e moda apresentaram o mesmo valor 10,9 % e a média geral de percentual retido nessa peneira foi de 11,72 %.

Grande parte das amostras apresentaram tamanho máximo nominal de 19 mm ou 12,5 mm, tanto que o diagrama de caixa da Figura 4.6 aponta um percentual bem pequeno retido na peneira de  $\frac{3}{4}$ " e trata os valores acima disso como *outliers*. Além disso, em números, a média de percentual retido na peneira de  $\frac{3}{4}$ " foi de apenas 0,97%, a mediana foi 0,60% e a moda 0%, ou seja, o valor mais comum nessa peneira demonstra que, na maioria das amostras, os agregados passaram em 100% nessa peneira.

De modo a comprovar essas informações, a Figura 4.12 apresenta o histograma do TMN das amostras.

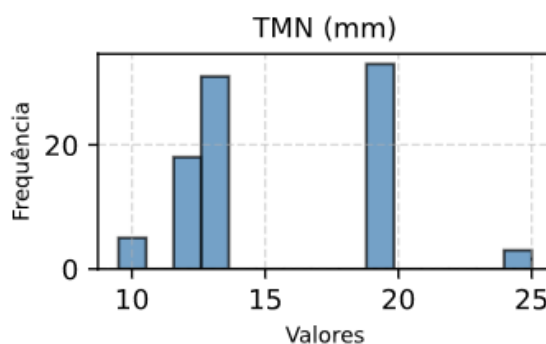


Figura 4.12 - Histograma do tamanho máximo nominal das amostras. Fonte: Autoria própria, 2025.

Outro índice bastante presente no banco de dados é o volume de vazios ( $V_v$ ), presente em mais de 87% das amostras. Em média as amostras apresentaram  $V_v$  de 4,25%, mediana 4,10% e moda 4,00 %. A Figura 4.13 mostra o histograma desse índice.

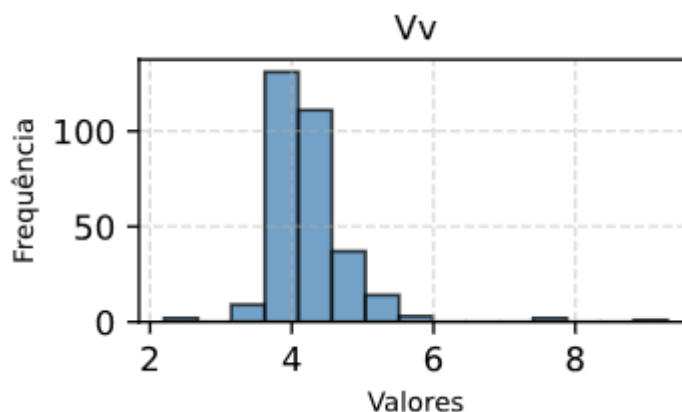


Figura 4.13 - Histograma do volume de vazios. Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.5.3 Ensaios de misturas

Para as misturas asfálticas foram selecionados 7 ensaios e alguns índices característicos deles. Entre os principais estão o de módulo de resiliência, módulo dinâmico e além desses, um índice que está presente na maioria das amostras, o teor de ligante.

O ensaio de módulo de resiliência está presente até o momento em 204 das 355 amostras catalogadas, isso para o ensaio a 25°C. Já o ensaio de módulo dinâmico está presente em 144 amostras e o ensaio de danos por fadiga está em 54.

Para o ensaio de módulo de resiliência, foram encontradas amostras com esse ensaio realizado em três temperaturas diferentes, 21,1°C, 25°C e 37,8°C. Para as temperaturas

de 21,1°C e 37,8°C foram catalogadas apenas 144 amostras. A Figura 4.14 apresenta o histograma para o ensaio mais frequente, 25°C.

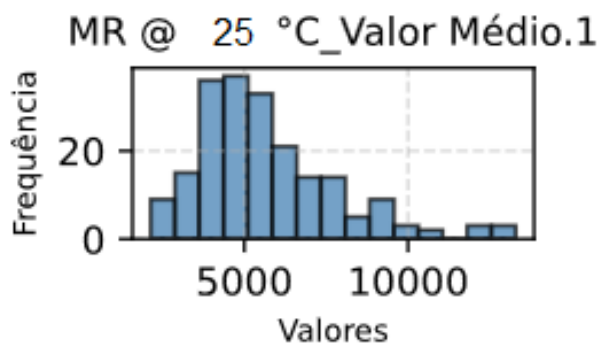


Figura 4.14 - Histograma do módulo de resiliência a 25°C. Fonte: Autoria própria.

Para esse ensaio o valor mais frequente foi 7128, a média dos valores das amostras foi de 5698 e a mediana 5263.

Os dados referentes ao módulo dinâmico foram agrupados por frequência reduzida, todos eles provenientes do Centro de Pesquisas Rodoviárias. Conforme dito anteriormente, há outros dados de módulo dinâmico disponíveis, porém não estão parametrizados por frequência reduzida, nesse caso será avaliada uma nova metodologia para incluí-los no banco de dados nas próximas atualizações.

Como foram gerados vários histogramas, um para cada frequência, esses gráficos serão expostos apenas na seção de anexos. A Tabela 4.3 mostra os valores de frequência reduzida utilizados.

Módulo Dinâmico	
Frequência Reduzida (Hz)	
392.000,0	1,0
157.000,0	0,5
78.400,0	0,1
15.700,0	0,31
7.840,0	0,124
1.570,0	0,062
3.420,0	0,0124
1.370,0	0,0062
684,0	0,00124
137,0	0,00615
68,4	0,00246
13,7	0,00123
25,0	0,000246
10,0	0,000123
5,0	0,0000246

Tabela 4.3 - Valores de frequência reduzida para o ensaio de módulo dinâmico. Fonte: Autoria própria, 2025.

O teor de ligante está presente em 310 amostras (87%), é um índice importante para verificar a quantidade de ligante presente na mistura asfáltica, sendo essencial na dosagem das misturas. A Figura 4.16 mostra o histograma desse índice.

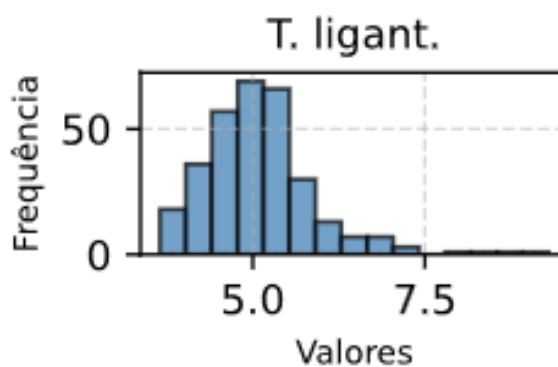


Figura 4.15 - Histograma teor de ligante. Fonte: Autoria própria, 2025.

A grande maioria das amostras possuem teor de ligante em torno de 5,0%, sendo a média dos valores 5,1%, a mediana 5,0% e a moda 5,5%.

## **5 CONCLUSÃO**

### **5.1 Considerações finais**

Este criou um banco de dados para armazenar informações sobre os principais ensaios da área de pavimentação asfáltica e disponibilizá-lo gratuitamente para qualquer interessado. Outros trabalhos já fizeram algo parecido, mas não foi disponibilizado ou, se foi, não foi encontrado banco de dados disponível para consulta aberta.

Ao longo das extensas pesquisas por amostras em trabalhos acadêmicos e relatórios pelo Brasil afora, ficou visível uma necessidade de ter resultados dos ensaios de uma maneira mais ágil e completa. Todos os trabalhos acadêmicos que trazem execuções e resultados desses ensaios necessitam de uma bibliografia para comparação de resultados. Assim, acredita-se que reunir a maior quantidade possível de dados pode ajudar pesquisadores a ter mais agilidade e assertividade em suas análises.

Cabe ressaltar que este banco de dados ao ser disponibilizado via *internet*, poderá ser continuamente atualizado ao passo que novas amostras forem disponibilizadas para inclusão. O usuário tem a opção de selecionar os dados de seu interesse e baixá-los, criando o seu próprio banco de dados. Tem ainda, acesso a um glossário de ensaios, onde pode obter as principais informações sobre eles.

Apesar de o banco de dados não estar disponível imediatamente após a publicação deste trabalho, pois ainda passará por ajustes finais, considerou-se que o objetivo do foi alcançado, já que foi possível reunir um total de 355 amostras com dados de 37 ensaios diferentes.

### **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros, outros pesquisadores podem se utilizar das informações disponibilizadas neste trabalho para criar outros bancos de dados de acordo com o interesse de sua área de pesquisa, selecionando apenas as amostras ou ensaios de interesse.

Uma outra questão interessante seria verificar a possibilidade de unificar os parâmetros de módulo dinâmico de modo a agrupar o maior número de informações em um único lugar, não necessitando da criação de outros blocos de informações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, S. **The unseen history of our roads**. 2013. Roadandtrack.com
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Avaliação do emprego de polímeros do tipo RET em misturas asfálticas**. Relatório final. CCR Nova Dutra, 26 jun. 2019.
- AGGARWAL, C. C. **Outlier analysis**. 2. ed. Cham: Springer, IBM T.J. Watson Research Center Yorktown Heights, New York, USA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5801: Standard Test Method for Toughness and Tenacity of Asphalt Materials**. 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 6084: Standard Test Method for Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer**. 1997.
- ASSIS, Sérgio Ricardo Honório de. **Utilização de agregados de rochas calcárias em misturas asfálticas usinadas a quente**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11341: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14736: Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar - método da película delgada**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14855: Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15086: Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro de cimentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos ou borracha**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15166: Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15184: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5847: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade absoluta.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6293: Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6560: Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9895: Solo - Índice de suporte califórnia (ISC) - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9938: Agregados — Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A Contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage.** 2014. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

Barros, L. M. (2017). **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho conforme critério de flow number de misturas quentes e mornas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico.** 2016. Tese – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BERNUCCI, Liedi *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 2. ed. atual. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022. 750 p. v. 1. ISBN 978-85-69658-02-3.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas.** 2012. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BORGES, Rômulo Luiz. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do Shift Model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2014.

CAVALCANTI, Nathalie Lundgren de Q. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com agregados reciclados da construção civil.** Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2014. 108 f.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação.** Rio de Janeiro: ABEDA, 2015. 144 f.

COLPO, G. B. **Comportamento à fadiga de misturas asfálticas: ensaios laboratoriais e instrumentação in situ.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

COLPO, Gracieli Bordin. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos.** 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2024.** Brasília: CNT, SEST SENAT, ITL, 2024. 224 p. ISBN 978-85-68865-23-1.

COSTA, Alan Nicolas Da. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA WEB PARA GESTÃO A INSTITUIÇÃO CT CRUZ AZUL DE PANAMBI.** Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Farroupilha. Panambi - RS, 2021.

D'ANTONA, Daniela M. G.; FROTA, Consuelo A. Da. **Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado pelo Polímero EVA para Pavimentos Urbanos de Manaus - AM** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 21, núm. 1, 2011, pp. 13-18 Associação Brasileira de Polímeros, São Paulo.

DAPPER, H. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas a quente e mornas com utilização de asfalto borracha**. 2020. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-ME 078/94: Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-ME 081/98: Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-ME 096/98: Agregado graúdo - avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 172/2016 - ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Brasília, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 412/2019 - ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento**. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 415/2019 - ME: Pavimentação – Mistura asfáltica – Teor de vazios de agregados miúdos não compactados – Método de ensaio**. Brasília, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 424/2020 - ME: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio**. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 429/2020 - ME: Agregados – Determinação da porcentagem de partículas achatadas e alongadas em agregados graúdos - Método de ensaio**. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 451/2024 - ME: Agregados – Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento “Los Angeles” – Método de ensaio.** Brasília, 2024.

DYNAPAC. **Granulometria, consistência e sedimentação: o que você precisa conhecer para obter melhores resultados na compactação.** *Dynapac Blog*, 2023. Disponível em: <https://dynapac.blog/mobile/compactacao/granulometria-consistencia-e-sedimentacao-o-que-voce-precisa-conhecer-para-obter-melhores-resultados-na-compactacao/>. Acesso em: 2 fev. 2025.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Fundamentals of database systems.** 7. ed. Boston: Pearson, 2016.

EUROPEAN STANDARD (EN). **EN 12593: Tracked Changes. Bitumen and bituminous binders. Determination of the Fraass breaking point.** 2015.

FERREIRA, J. L. S. **Novas diretrizes para a seleção granulométrica de misturas asfálticas densas com foco na deformação permanente.** 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FERREIRA, Jorge Luis Santos; SOARES, Jorge Barbosa; BASTOS, Juceline Batista dos Santos. **Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente.** Transportes, São Paulo-SP, v. 24, n. 2, p. 46-52, 2016.

GARCIA, E. S. H. **Avaliação laboratorial da utilização do resíduo (areias) de fundição no concreto asfáltico convencional.** Trabalho de Conclusão de Curso. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2014.

GOUVEIA, B. C. S. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras.** 2016. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: concepts and techniques.** 3. ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2012.

JEM CONTROLE DE QUALIDADE. **Obras – Galeria de Imagens.** *JEM Controle de Qualidade*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.jemcontroledequidade.com.br/obras-galeria-de-imagens/#bwg1/4>. Acesso em: 2 fev. 2025.

LEITE, Leni Mathias Figueiredo; MOTTA, Laura Maria Goretti da; COSTA, Evanilda Cohim; TEIXEIRA, Luiz Henrique; MORILHA, Armando; MARTINS, Lídia Dinis.

**A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas** [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: IBP, 2021.

LIMA, André Theophilo. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Fortaleza, 2003. XII, 99 fl., Dissertação (mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LITTLE, R. J.; RUBIN, D. B. **Statistical analysis with missing data**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas**. 2018. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. **Misturas asfálticas: conceituação, materiais e dosagem – Módulos 1, 2, 3 e 4**. Escola Nacional de Administração Pública. Instituto de Pesquisas em Transportes, maio de 2022.

MEGAWHAT. **Óleo Pesado**. Disponível em: <https://megawhat.energy/glossario/oleo-pesado/>. Acesso em: 4 jan. 2025.

MITCHELL, T. **Machine learning**. New York: McGraw-Hill, 1997.

MOCELIN, D. M. **Avaliação do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Através do Modelo de Dano Contínuo Viscoelástico**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

MOTA, Bruno Cavalcante et al., **CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE BANCO DE DADOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**. In: ANAIS DO CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2023, Santos. Anais eletrônicos, Galoá, 2023.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com o uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NUNES, Letícia Cardoso. **Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com Asfalto-borracha de 4ª geração**. 2017. xviii, 142 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes

Junior. 2001. 280 p. Tese (Doutorado em Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

OLIVEIRA, A. D. (2022) **Modelagem numérico-experimental de reflexão de trincas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, A. H. **Avaliação do potencial antioxidante do líquido da castanha de caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento**. 2015. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente**. 2012. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

PAZOS, A. G. (2015) **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PENICHE, Kim Farias.; PINHEIRO, Rafael Augusto de Lima. **CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DOS AGREGADOS BRITA 0, PÓ DE PEDRA E AREIA PARA FINS DE USO EM CONCRETO ASFÁLTICO. ESTUDO DE CASO: OBRA DO BRT METROPOLITANO DE BELÉM**. 2023. 80 p. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém).

PONTE, R. S. **Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas**. 2013. Monografia - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

QUEIROZ, Rita Flávia Régis. **Avaliação do dano por fadiga de misturas asfálticas modificadas por adição de polímero a partir do modelo S-VECD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2022.

RELATÓRIO CCR. **Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e flow number de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas**. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR. Março de 2018. 241 p.

RIBEIRO, Ricardo de Sousa. **Análise da execução de um revestimento asfáltico utilizando diferentes medidas de qualidade**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

RODRIGUES, F. B. **Efeito do líquido da Castanha do Caju (LCC) nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por SBS**. 2010. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, 2010.

ROUMANOS, Elias; SANTOS, Caio Rubens Gonçalves. **Avaliação do tipo de ligante asfáltico e da granulometria nas características mecânicas de algumas misturas asfálticas**. Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, 2023.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G.. **Análise granulométrica por peneiramento**. IN: **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 55-72.

SANTOS, João Almeida. **Revista Ibero - Americana de Estratégia; São Paulo** Vol. 1, Ed. 1, (2002): 27-32.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p.

SILVA, Eduarda Oliveira. **Avaliação de patologias em pavimentos flexíveis: estudo de caso - Avenida Beira-Mar Norte, Florianópolis, SC**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

TEIXEIRA, Heloise Sasso. **Estudo e caracterização de pavimentação asfáltica modificada empregando os polímeros elastoméricos látex de borracha natural (NRL) e estireno-butadieno-estireno (SBS) em sua composição**. 2018. 98 f., il. color. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2018.

UNIVESP. **Introdução a banco de dados**. Disponível em: <https://apps.univesp.br/novotec/introducao-a-banco-de-dados>. Acesso em: 7 mar. 2025.

WARGHA FILHO, N. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. 2013. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

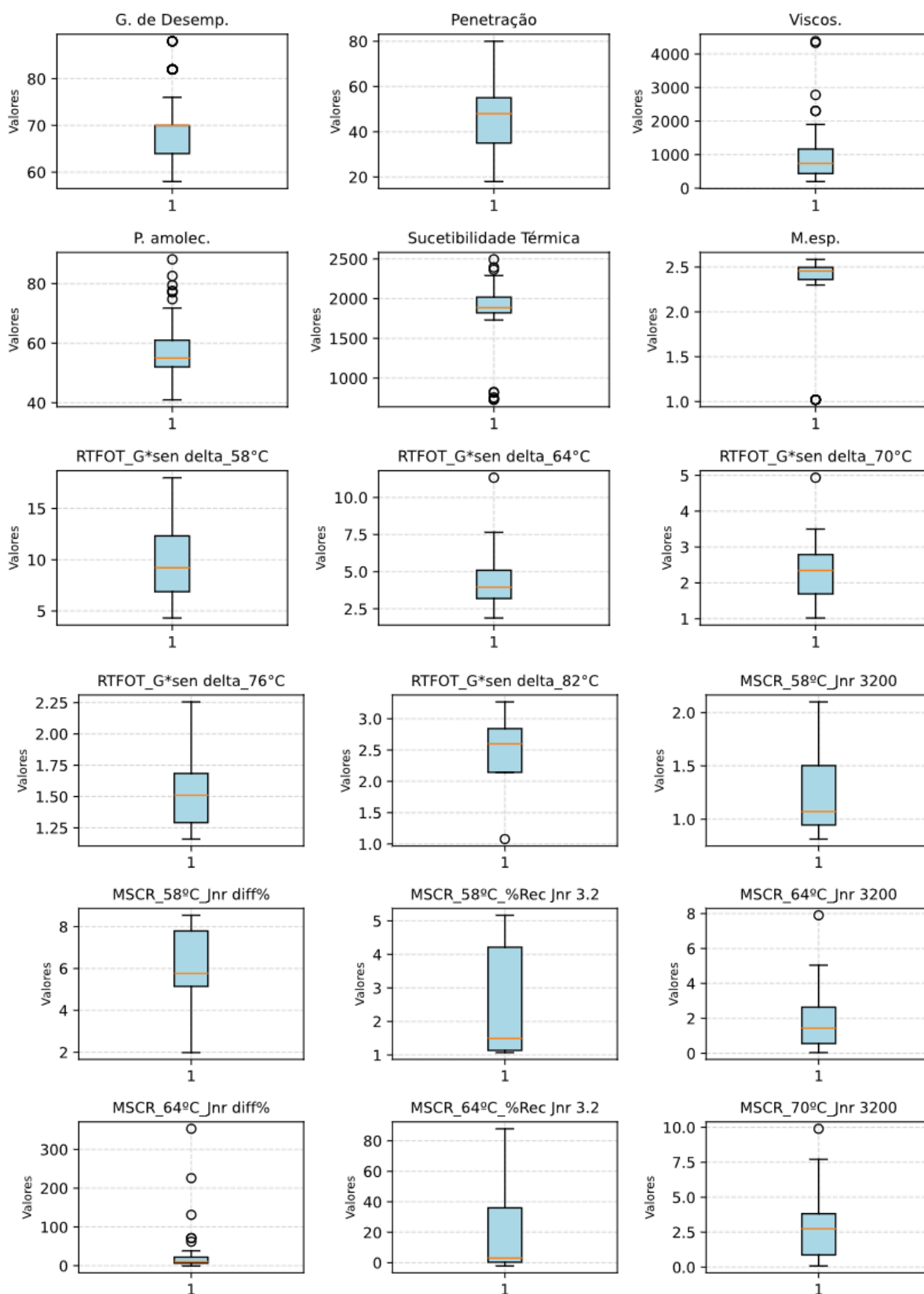
XAVIER, M. F. **Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas**. 2016. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016

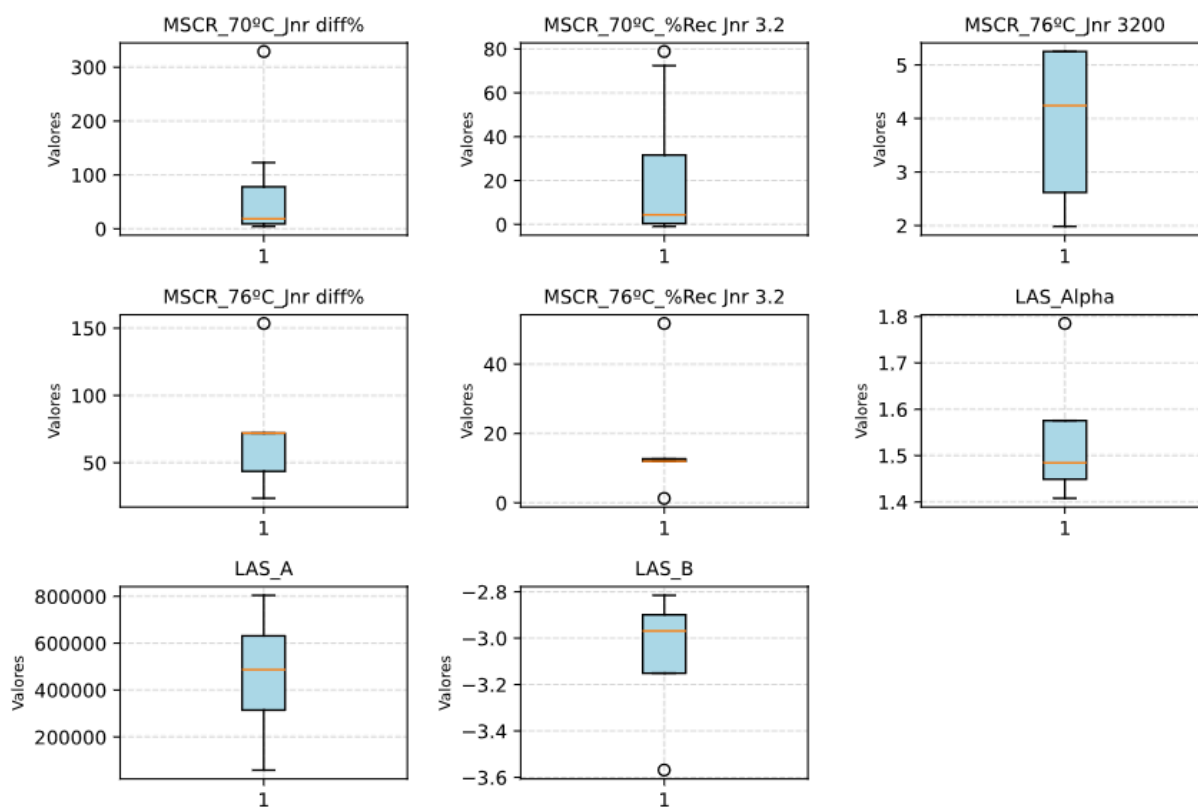
ZAPPE, A. P. S. **Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não convencionais na reciclagem à quente**. 2020. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

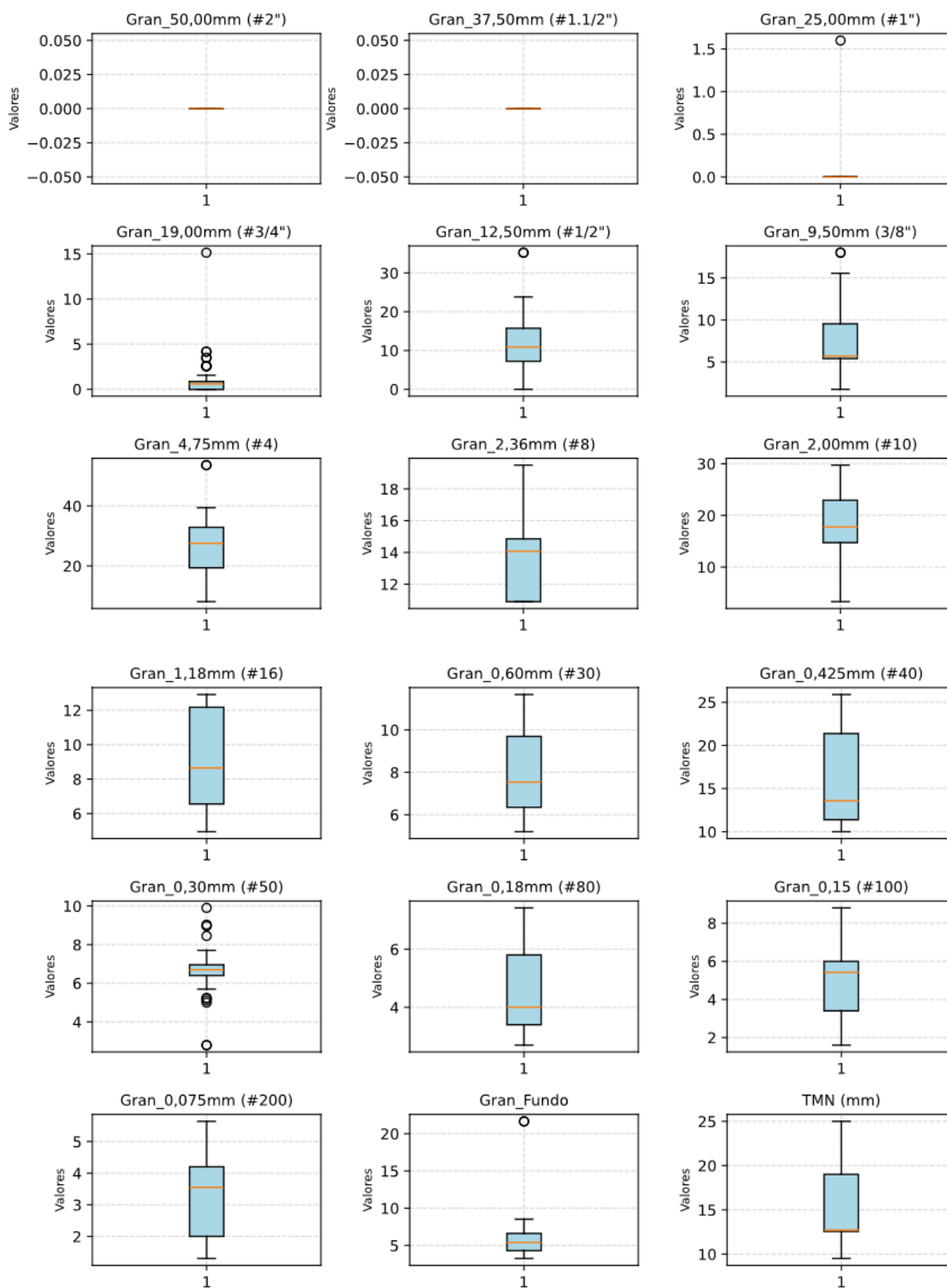
## ANEXOS

## Anexo A - Diagramas de caixa - Ligantes

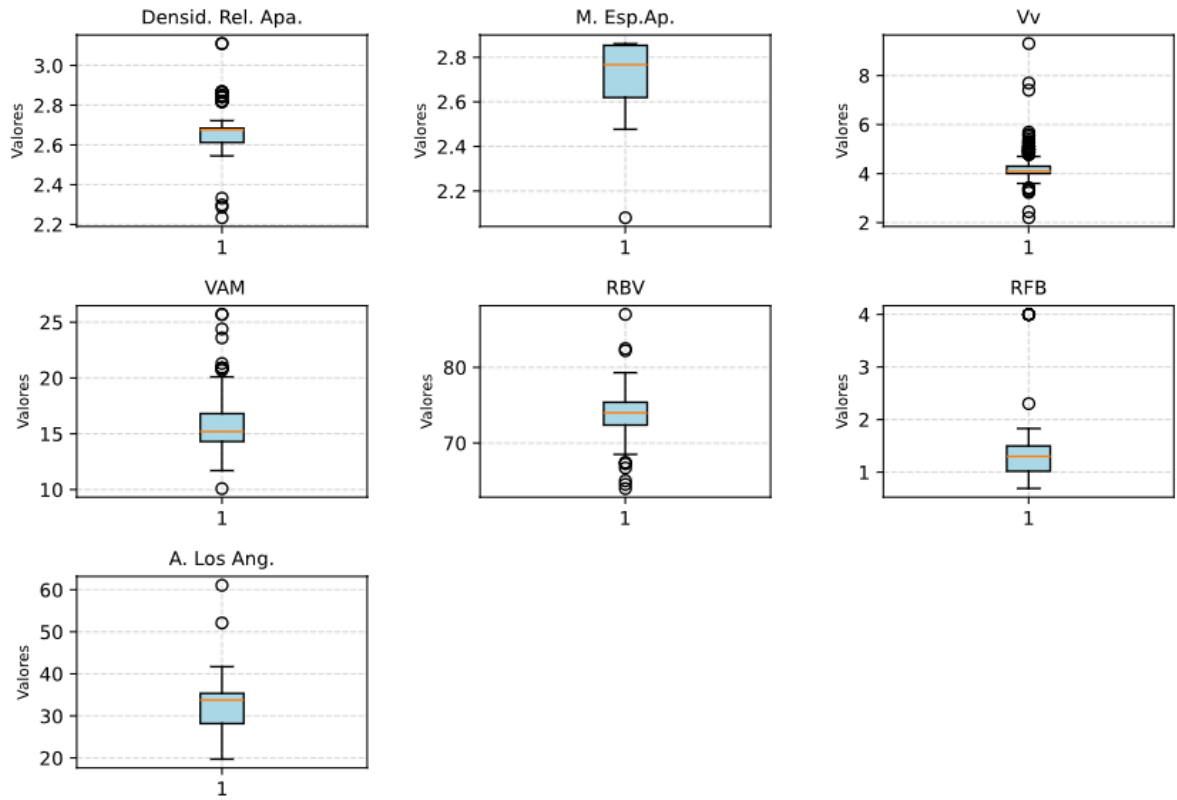


**Anexo A - Diagramas de caixa - Ligantes (continuação)**

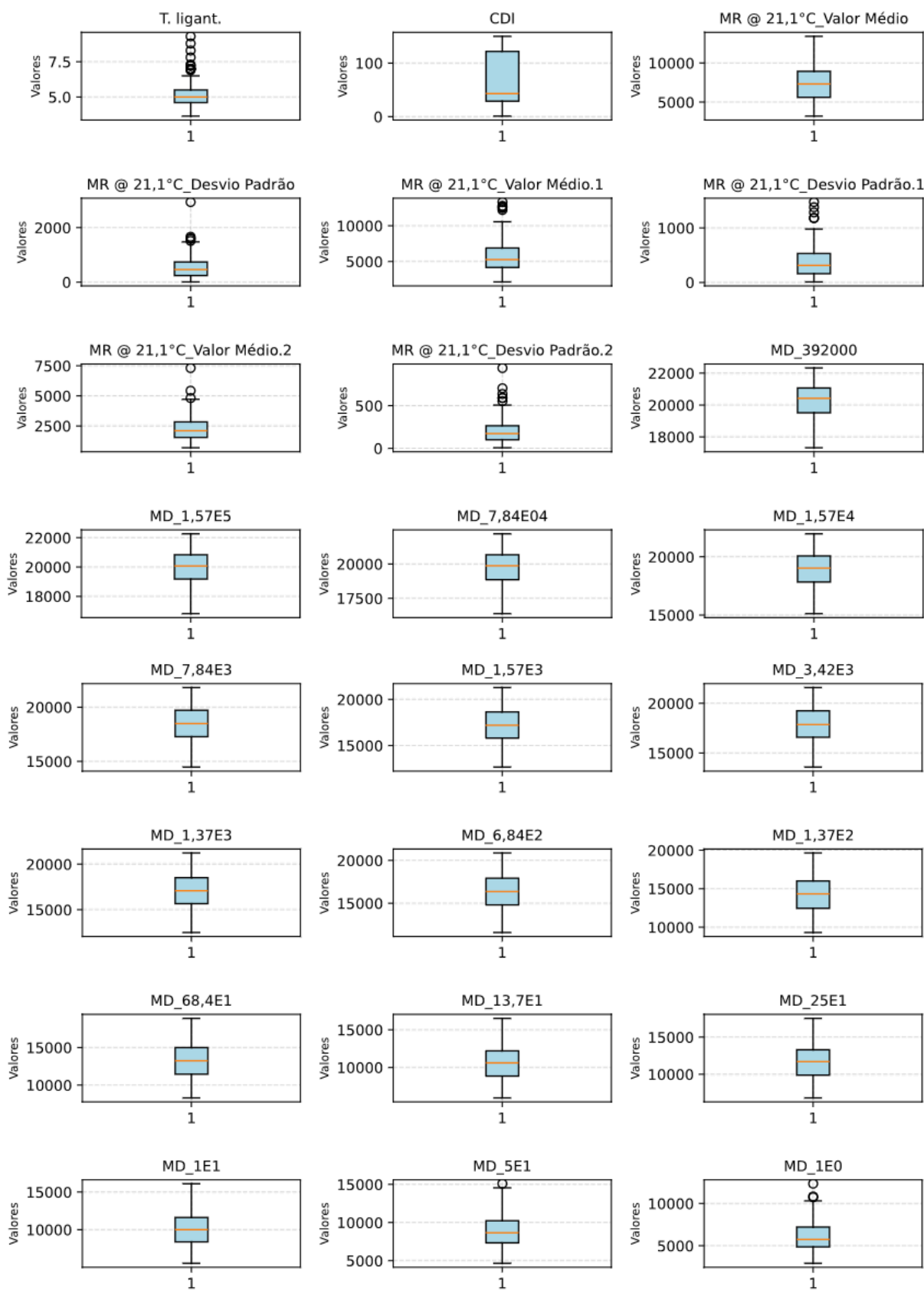
## Anexo B - Diagramas de Caixa - Agregados



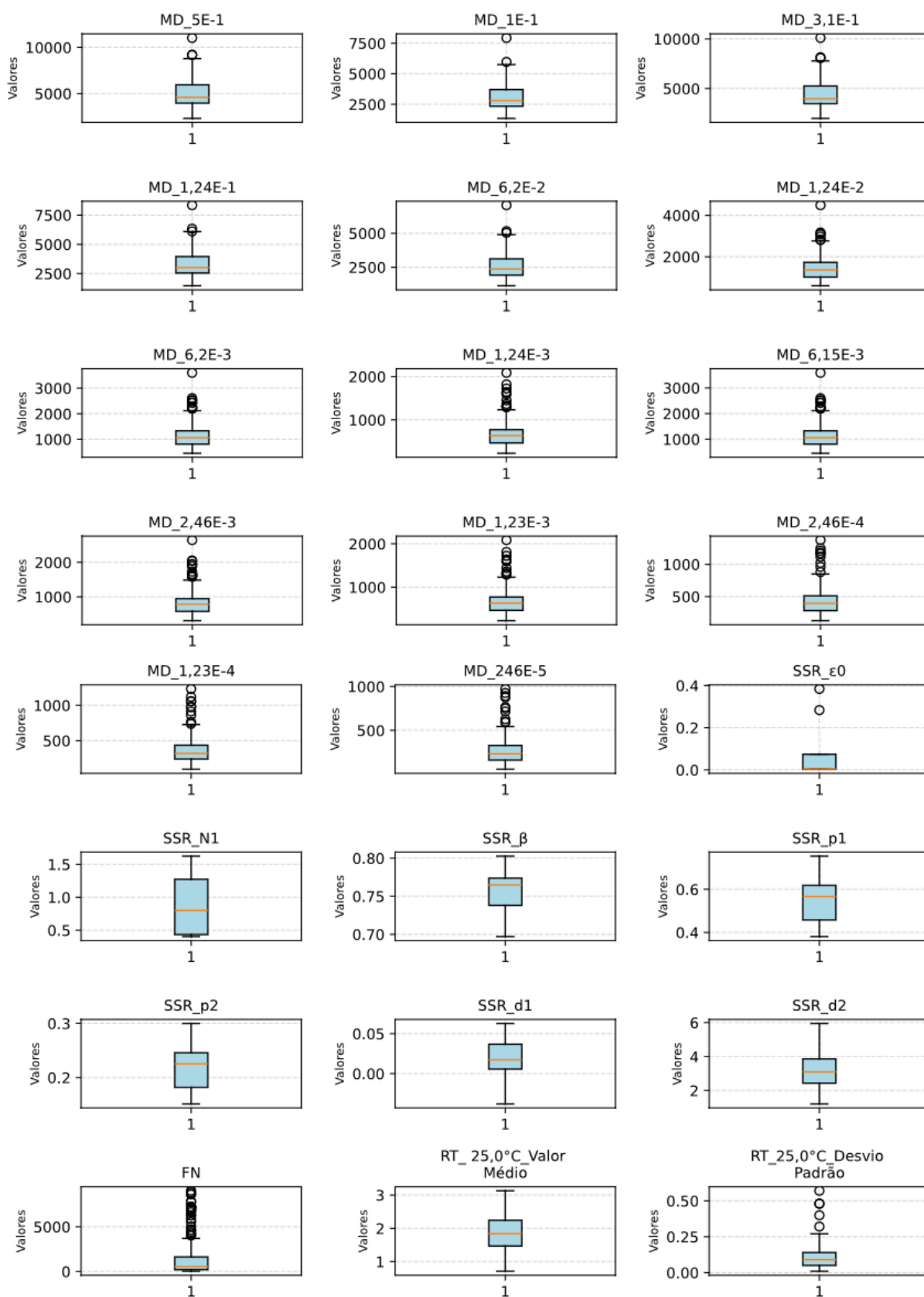
**Anexo B - Diagramas de Caixa - Agregados (continuação)**



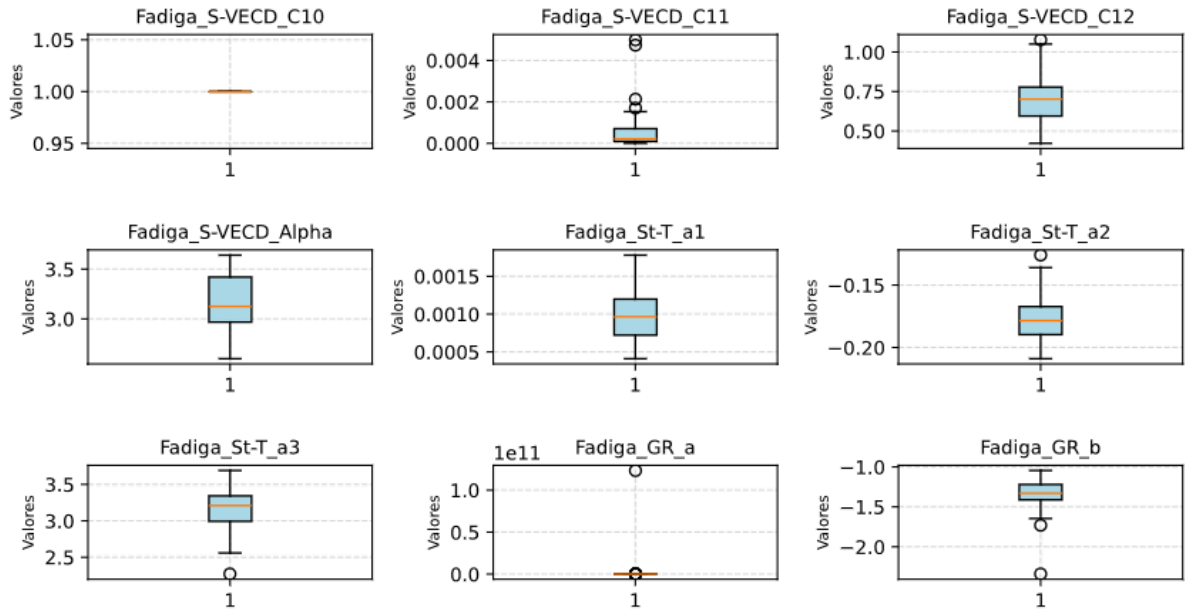
## Anexo C - Diagramas de caixa - Misturas



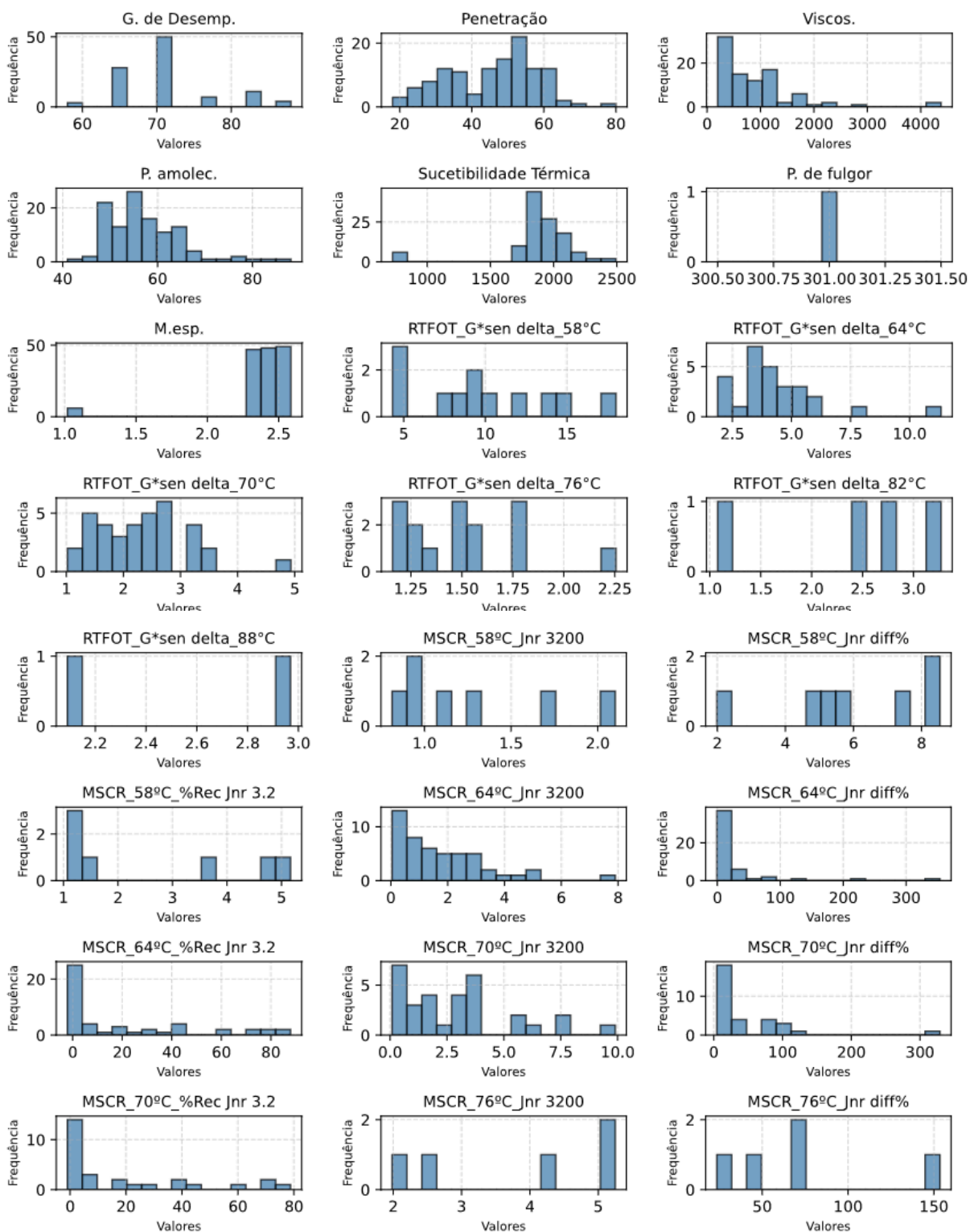
### Anexo C - Diagramas de caixa - Misturas (continuação)



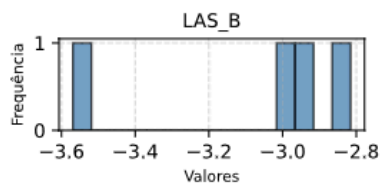
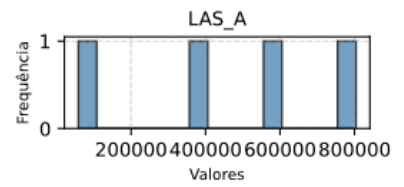
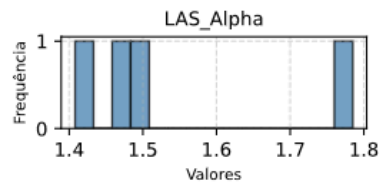
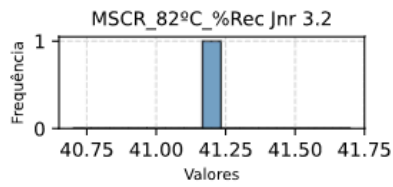
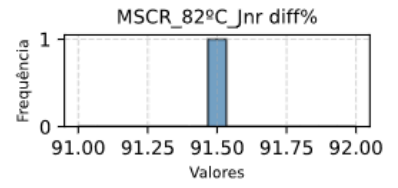
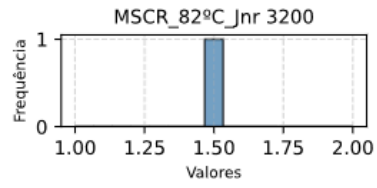
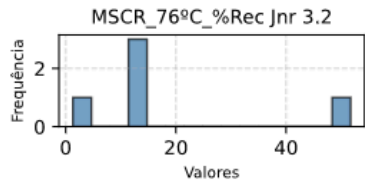
### Anexo C - Diagramas de caixa - Misturas (continuação)



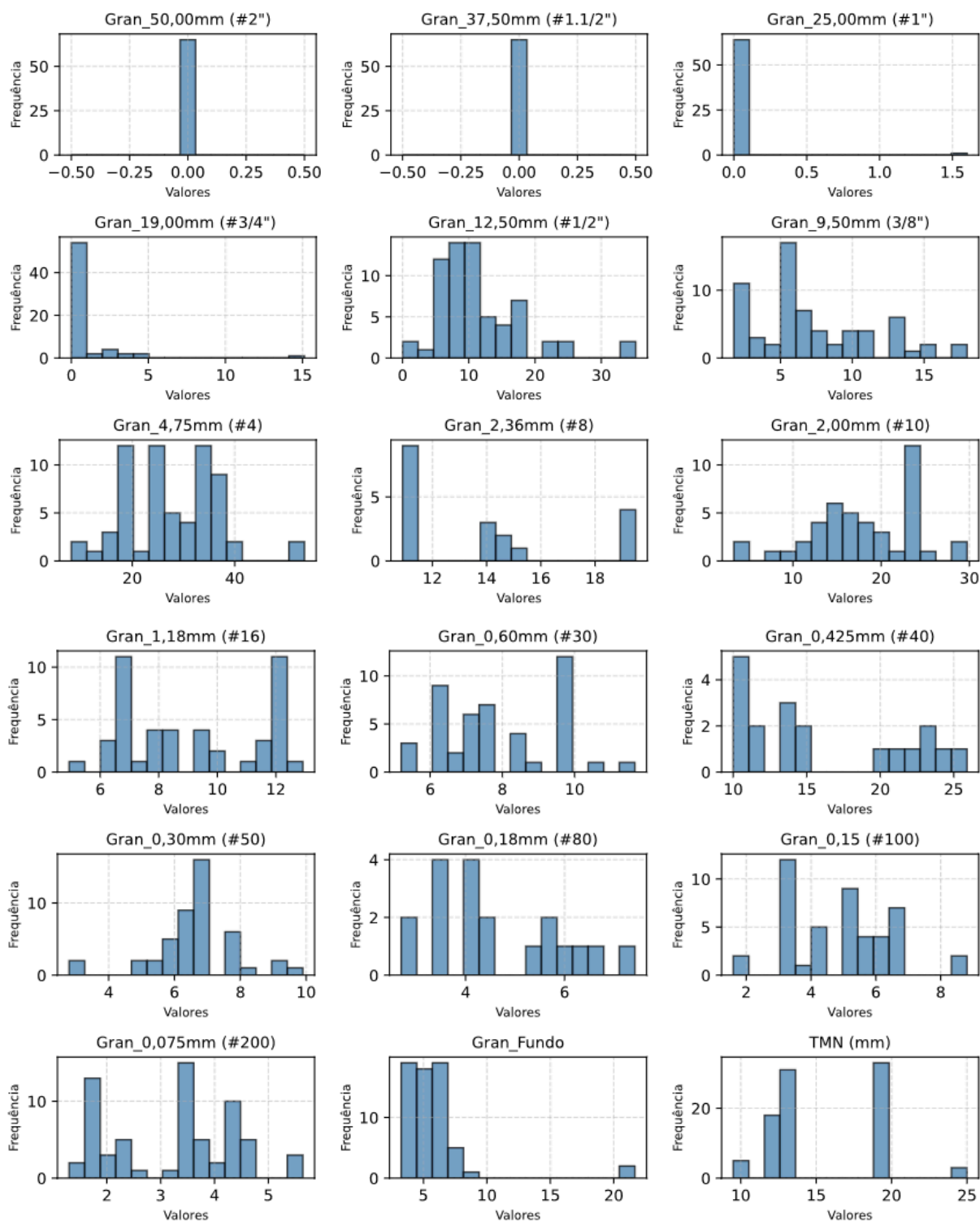
## Anexo D - Histogramas - Ligantes



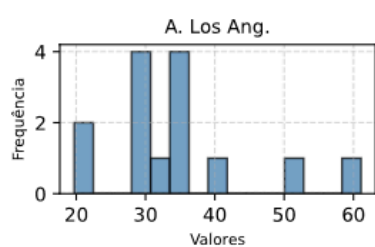
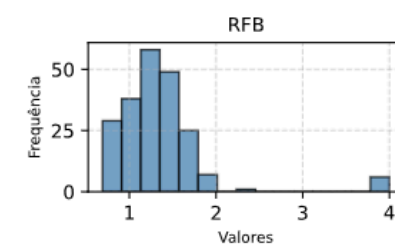
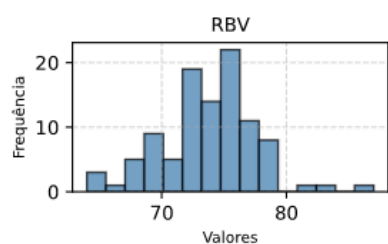
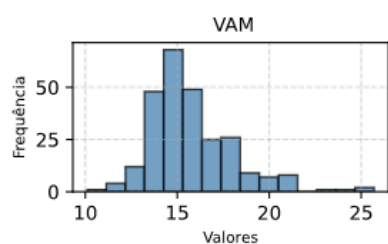
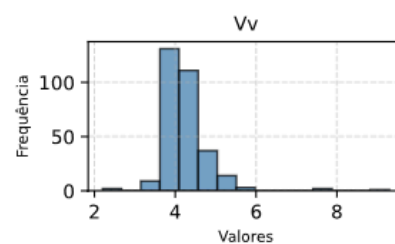
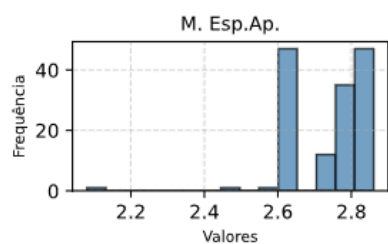
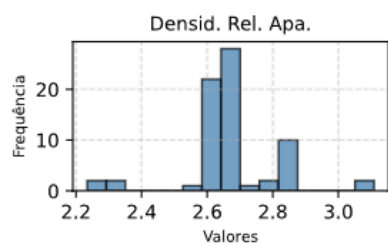
## Anexo D - Histogramas - Ligantes (continuação)



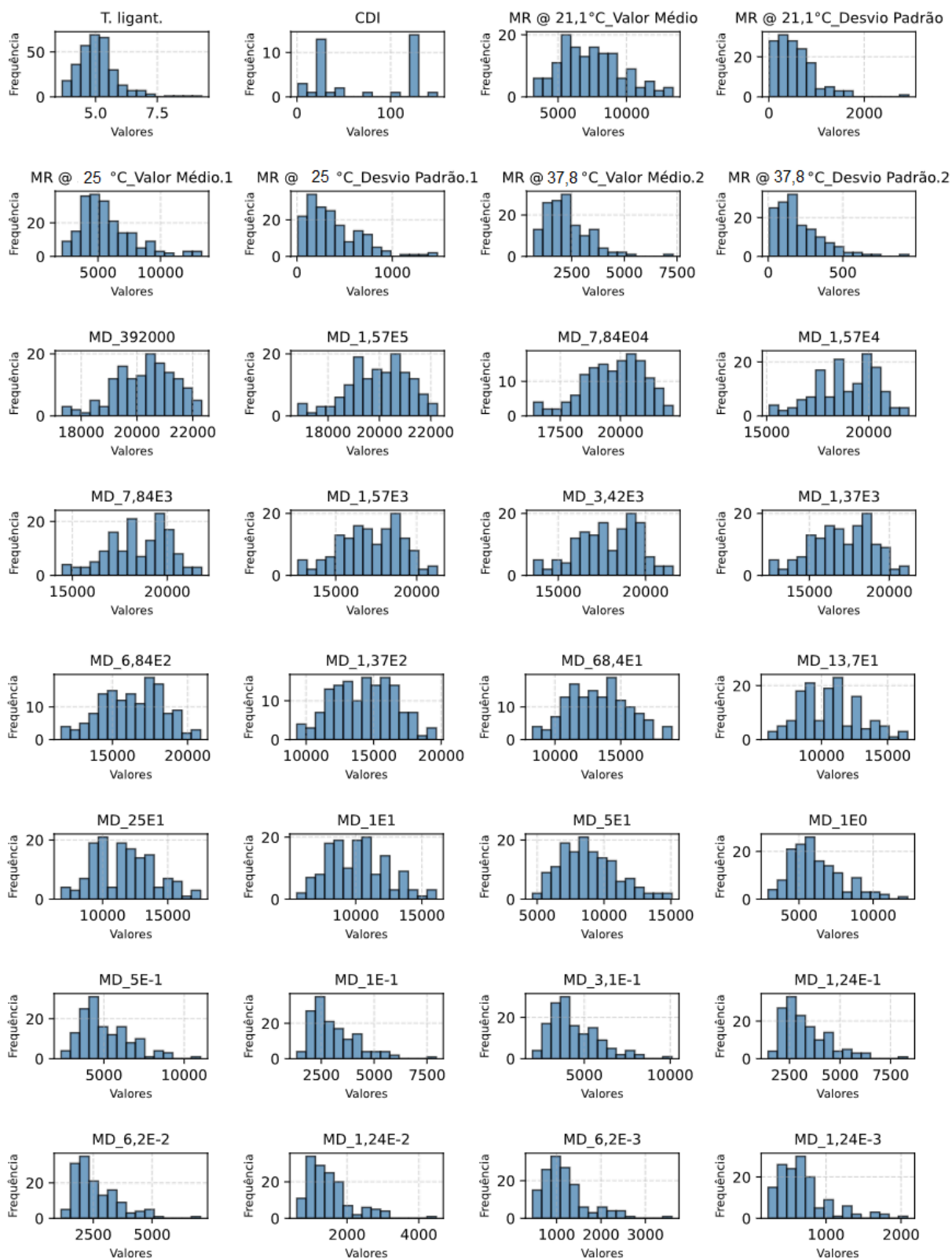
## Anexo E - Histogramas - Agregados



## Anexo E - Histogramas - Agregados (continuação)



## Anexo F - Histogramas - Misturas



## Anexo F - Histogramas - Misturas (continuação)

