

CAMPUS PORTO VELHO CALAMA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THAÍS KAUANE KEMP BRILHANTE

**AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO DE PORTO VELHO
PARA APLICAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE**

PORTO VELHO - RO

2025

THAÍS KAUANE KEMP BRILHANTE

**AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO DE PORTO VELHO
PARA APLICAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel, junto ao curso de Engenharia Civil, sob orientação da professora Paola Mundim de Souza.

PORTO VELHO - RO

2025

Brilhante, Thaís Kauane Kemp.

Avaliação dos agregados graúdos da região de porto velho para aplicação em misturas asfálticas a quente / Thaís Kauane Kemp Brilhante. - Porto Velho, 2025.

82 f.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Paola Mundim de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Porto Velho, 2025.

1. Agregados graúdos. 2. Misturas asfálticas. 3. Caracterização tecnológica. 4. Normas técnicas. 5. Porto Velho. I. Souza, Paola Mundim de (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.


Bibliotecário(a) Responsável: Miria Santana Veiga, CRB-11/898

THAÍS KAUAKE KEMP BRILHANTE


AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO DE PORTO VELHO PARA APLICAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel, junto ao Curso de Engenharia Civil, sob a orientação da professora Paola Mundim de Souza.


Aprovado em: 04/12/2025 pela banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO CESAR PIEROZAN**
Data: 15/12/2025 09:40:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Membro da Banca: Rodrigo Cezar Pierozan

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL PEREIRA LOUZADA**
Data: 16/12/2025 12:08:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca: Rafael Pereira Louzada

Documento assinado digitalmente
 **VALERIA COSTA DE OLIVEIRA**
Data: 15/12/2025 11:25:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: Valéria Costa de Oliveira

Documento assinado digitalmente
 **PAOLA MUNDIM DE SOUZA**
Data: 16/12/2025 20:15:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Paola Mundim de Souza

À pequena Thaís, pelos sonhos que me
trouxeram até aqui.

*“Seremos donos do nosso amanhã se
estivermos unidos em sintonia com os
nossos sonhos.”*

— Charlie Brown Jr.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, proteção e pelas oportunidades que tornaram possível a realização desta etapa tão importante da minha vida acadêmica e pessoal.

Ao meu marido, expresso minha profunda gratidão pelo amor, incentivo e compreensão em todos os momentos. Sua parceria foi essencial para que eu me mantivesse firme nos desafios e continuasse acreditando no meu potencial.

À minha mãe, agradeço com todo carinho pela dedicação, pelo apoio constante e por sempre acreditar em mim. Seu exemplo, suas palavras de conforto e sua força foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha família, manifesto minha gratidão pelo suporte, pelas palavras de encorajamento e pela presença em todos os momentos importantes da minha formação. Cada um, à sua maneira, contribuiu para que esta conquista se tornasse possível.

À minha orientadora e à minha coorientadora, deixo meu sincero reconhecimento pela dedicação, paciência e disponibilidade ao longo de todo o desenvolvimento desta pesquisa. Suas orientações foram essenciais para meu crescimento acadêmico e profissional.

Agradeço também ao meu ambiente de trabalho, que despertou em mim o interesse e a paixão pela área abordada neste TCC. As experiências práticas e os desafios enfrentados no cotidiano foram fundamentais para a construção deste estudo.

Aos meus colegas de trabalho, registro minha gratidão pelo incentivo constante, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio durante toda essa jornada. Cada gesto de motivação fez diferença no avanço deste trabalho.

Aos colegas e amigos que estiveram ao meu lado durante essa caminhada, agradeço pela parceria, pelo apoio mútuo e pelas conversas que tornaram o processo mais leve e enriquecedor.

Aos professores que contribuíram para a minha formação, expresso minha gratidão pela dedicação e pelo conhecimento compartilhado. À instituição de ensino, agradeço pela estrutura oferecida e pela oportunidade de crescimento acadêmico.

Aos laboratórios e aos técnicos de laboratório, deixo meu reconhecimento pela colaboração e pela disponibilidade na realização dos ensaios que deram suporte fundamental a esta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista. Cada gesto, palavra ou incentivo teve papel importante na trajetória que me trouxe até aqui.

RESUMO

O estudo avalia a conformidade dos agregados graúdos da região de Porto Velho/RO para uso em misturas asfálticas a quente, considerando a escassez de pesquisas sobre materiais locais. Foram coletadas amostras na Pedreira Madecon, submetidas a ensaios laboratoriais no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO) - Campus Porto Velho - Calama segundo a norma DNIT 031/2024 - ES. A metodologia inclui análise granulométrica, ensaios de densidade, absorção, resistência à abrasão (Los Angeles), índice de forma das partículas e adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado, além da realização da estabilização granulométrica. Os resultados foram comparados com as especificações técnicas vigentes, identificando-se a necessidade de ajustes granulométricos para enquadramento nas faixas normatizadas. A pesquisa permitiu avaliar de forma consistente o desempenho dos agregados estudados, evidenciando boas propriedades físicas e tecnológicas, com destaque para a resistência à abrasão e a durabilidade das partículas, que permaneceram dentro dos limites normativos. Contudo, verificou-se que tanto a Brita 0 quanto a Brita 1 não atenderam integralmente às faixas granulométricas da DNIT 031/2024 – ES, apresentando descontinuidades que persistiram mesmo após tentativas de estabilização granulométrica entre os dois materiais. Esse resultado demonstra que, apesar do potencial técnico para uso em misturas asfálticas, os agregados disponíveis necessitam de ajustes no processo de britagem ou da incorporação de materiais intermediários para garantir um melhor enquadramento nas faixas B-19 e C-12,5. Assim, conclui-se que, embora os agregados da região apresentem propriedades compatíveis com os requisitos físicos e tecnológicos, sua aplicação em CAUQ depende de intervenções complementares, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre os materiais locais e para o aprimoramento das soluções de pavimentação na região de Rondônia.

Palavras-chave: Agregados graúdos, misturas asfálticas, caracterização tecnológica, normas técnicas, Porto Velho.

ABSTRACT

This study evaluates the suitability of coarse aggregates from the Porto Velho/RO region for use in hot asphalt mixtures, considering the scarcity of research on local materials. Samples were collected at the Madecon Quarry and subjected to laboratory tests at the Federal Institute of Education, Science and Technology of Rondônia (IFRO) - Porto Velho Campus - Calama, according to the DNIT 031/2024 - ES standard. The methodology includes particle size analysis, density tests, absorption, abrasion resistance (Los Angeles), particle shape index, and adhesion between the asphalt binder and the aggregate, in addition to particle size stabilization. The results were compared with current technical specifications, identifying the need for particle size adjustments to meet the standardized ranges. The research allowed for a consistent evaluation of the performance of the studied aggregates, highlighting good physical and technological properties, particularly abrasion resistance and particle durability, which remained within normative limits. However, it was found that both Crushed Stone 0 and Crushed Stone 1 did not fully meet the granulometric ranges of DNIT 031/2024 – ES, presenting discontinuities that persisted even after attempts at granulometric stabilization between the two materials. This result demonstrates that, despite the technical potential for use in asphalt mixtures, the available aggregates require adjustments in the crushing process or the incorporation of intermediate materials to ensure better alignment with the B-19 and C-12.5 ranges. Thus, it is concluded that, although the aggregates from the region present properties compatible with the physical and technological requirements, their application in asphalt mix design depends on complementary interventions, contributing to the advancement of knowledge about local materials and to the improvement of paving solutions in the Rondônia region.

Palavras-chave: Coarse aggregates, asphalt mixtures, technological characterization, technical standards, Porto Velho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização das Pedreiras próximas à BR-364/RO.....	23
Figura 3.1 - Fluxograma de objetivos/ensaios.....	27
Figura 3.2 - Localização de Porto Velho.....	28
Figura 3.3 - Localização da Pedreira de Estudo.....	29
Figura 3.4 - Material de ensaio.....	30
Figura 3.5 - Repartidor de amostras.....	32
Figura 3.6 - Agitador e série de peneiras.....	33
Figura 3.7 - Amostras lavadas antes de irem à estufa.....	35
Figura 3.8 - Agregados submersos.....	36
Figura 3.9 - Remoção dos filmes visíveis de água da superfície.....	36
Figura 3.10 - Pesagem do material submerso.....	37
Figura 3.11 - Repartidor de amostra.....	39
Figura 3.12 - Amostra sendo lavada com auxílio da peneira de 4,75mm.....	42
Figura 4.1 - Curva granulométrica da Brita 0.....	54
Figura 4.2 - Curva granulométrica da Brita 1.....	55
Figura 4.3 - Formas das Partículas.....	59
Figura 4.4 - Partículas fraturadas e partículas não fraturadas.....	60
Figura 4.5 - Partícula que sofreu fendilhamento.....	64
Figura 4.6 - Partícula que sofreu quebra.....	64
Figura 4.7 - Partícula que sofreu laminagem.....	65
Figura 4.8 - Agregado sem aditivo.....	66
Figura 4.9 - Agregado com aditivo.....	66
Figura 4.10 - Comparação Curva granulométrica Brita 0 com Faixa C-12,5.....	68
Figura 4.11 - Comparação Curva granulométrica Brita 1 com Faixa B-19.....	69
Figura 4.12 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 1 para Faixa B-19.....	71
Figura 4.13 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 2 para Faixa B-19.....	71
Figura 4.14 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 3 para Faixa B-19.....	72
Figura 4.15 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 1 para Faixa C-12,5.....	72
Figura 4.16 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 2 para Faixa C-12,5.....	73
Figura 4.17 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 3 para Faixa C-12,5.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico.....	25
Tabela 3.1 - Massa mínima por amostra de ensaio.....	32
Tabela 3.2 - Quantidade mínima de agregado para ensaio de massa específica dos grãos.....	34
Tabela 3.3 - Quantidade mínima da amostra.....	39
Tabela 3.4 - Massa mínima por amostra de ensaio.....	41
Tabela 3.5 - Exemplo de Graduação para ensaio.....	43
Tabela 3.6 - Carga abrasiva de acordo com a graduação.....	44
Tabela 3.7 - Abertura das peneiras utilizadas.....	46
Tabela 3.8 - Soluções que podem ser usadas no ensaio e suas concentrações.....	47
Tabela 3.9 - Frações de subfrações consideradas para o agregado graúdo.....	47
Tabela 3.10 - Frações de subfrações ensaiadas para o agregado graúdo.....	48
Tabela 4.1 - Análise granulométrica da Brita 0.....	53
Tabela 4.2 - Análise granulométrica da Brita 1.....	54
Tabela 4.3 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico - Adaptado.....	55
Tabela 4.4 - Resultados de densidade e absorção dos agregados graúdos.....	57
Tabela 4.5 - Cálculo dos percentuais de perda para as frações.....	62
Tabela 4.6 - Determinação dos danos nas partículas.....	63
Tabela 4.7 - Proporções utilizadas nas simulações de estabilização granulométrica.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Concreto Asfáltico Polimérico
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DMC	Diâmetro Máximo Característico
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM	Especificação de Materiais
IBP	Instituto Brasileiro de Pétrole e Gás
IFRO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ME	Método de Ensaio
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
TNM	Tamanho Nominal Máximo
TM	Tamanho Máximo

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Absorção</i> (%)	Porcentagem de absorção;
A_n	Desgaste por abrasão Los Angeles;
$c_{médio}$	Comprimento médio;
$e_{médio}$	Espessura média;
F	Massa de partículas com pelo menos um número de faces fraturadas;
F_i	Percentual da fração i
G_{sa}	Densidade relativa real;
G_{sb}	Densidade relativa aparente;
I	Índice de forma;
ME_{sa}	Massa específica real;
ME_{sb}	Massa específica aparente;
m_f	Massa de material retida nas peneiras;
m_i	Massa inicial da respectiva amostra da fração;
m_n	Massa total da amostra seca;
m'_n	Massa da amostra lavada e seca;
N	Massa de partículas não fraturadas;
N_i	Número de partículas da fração i
P	Porcentagem de partículas fraturadas;
% <i>Perda</i>	Percentual de perda obtido;
$\sum_{i=1}^n F_i$	Soma das porcentagens retidas em cada fração;
#4	Peneira nº 4 (4,75 mm);
#6	Peneira nº 6 (3,35 mm).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivo específico.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Concreto Asfáltico.....	19
2.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo.....	20
2.1.2 Agregados.....	21
2.1.3 Filler.....	21
2.1.4 Normas Técnicas.....	21
2.2 Agregado Graúdo.....	22
2.3 Faixas Granulométricas.....	24
2.4 Estudos Regionais Sobre Agregados.....	26
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Tipo de Pesquisa.....	28
3.2 Área de Estudo.....	28
3.3 Coleta de Amostras.....	29
3.4 Ensaios Laboratoriais.....	30
3.4.1 Granulometria.....	30
3.4.2 Densidade individual e Absorção de água.....	34
3.4.3 Índice de forma.....	39
3.4.4 Partículas fraturadas.....	41
3.4.5 Abrasão Los Angeles.....	43
3.4.6 Durabilidade dos agregados.....	45
3.4.7 Adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	51
3.5 Método de cálculo de estabilização granulométrica.....	52
4 RESULTADOS.....	54
4.1 Caracterização física e tecnológica dos agregados e verificação da viabilidade técnica do uso em concretos asfálticos a quente.....	54
4.1.1 Granulometria.....	54
4.1.2 Densidade individual e Absorção de água.....	58
4.1.3 Índice de forma e Partículas chatas e alongadas.....	61
4.1.4 Partículas fraturadas.....	62
4.1.5 Abrasão Los Angeles.....	63
4.1.6 Durabilidade - Resistência dos agregados à desintegração quando submetidos à ação de agentes físicos.....	64
4.1.7 Adesividade.....	68
4.2 Comparação dos resultados obtidos com as faixas granulométricas estabelecidas pela norma DNIT 031/2024-ES e estabilização granulométrica para enquadrar nas faixas de	

trabalho.....	70
4.2.1 Análise comparativa com as faixas da DNIT 031/2024-ES.....	71
4.2.2 Estabilização granulométrica.....	73
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Os agregados constituem materiais granulares de origem natural ou artificial amplamente aplicados em obras de engenharia civil, sobretudo na construção de pavimentos. Entre suas funções, destacam-se a contribuição para a resistência, estabilidade e durabilidade das estruturas onde se aplicam. Nas misturas asfálticas, os agregados graúdos exercem papel fundamental na estrutura do revestimento, pois influenciam diretamente o desempenho mecânico e a capacidade de suporte da camada asfáltica. A escolha adequada desses materiais, conforme normas técnicas, assegura a eficiência e a vida útil das vias pavimentadas.

Os agregados graúdos correspondem à maior parte do volume do concreto asfáltico e formam o esqueleto estrutural do pavimento, promovendo o intertravamento das partículas e suportando as tensões impostas pelo tráfego de veículos. A granulometria influencia praticamente todas as propriedades relevantes, incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade e resistência à fadiga e à deformação permanente. Dessa forma, a caracterização adequada desses materiais e a verificação de sua conformidade com as especificações normativas constituem etapas indispensáveis no projeto de pavimentos.

A composição inadequada dos agregados compromete significativamente o desempenho e a durabilidade dos pavimentos asfálticos. Deficiências granulométricas aumentam a suscetibilidade à deformação permanente, desagregação e fissuração precoce. Uma granulometria imprópria favorece má compactação, vazios excessivos e perda de coesão, reduzindo a resistência às cargas de tráfego e comprometendo a impermeabilização. Além disso, agregados de baixa qualidade mineralógica tendem a se degradar mais rapidamente, acelerando processos de exsudação e perda de aderência. Por essas razões, a caracterização técnica dos materiais locais torna-se essencial para garantir o desempenho estrutural e a longevidade das vias pavimentadas.

No contexto da pavimentação rodoviária de Porto Velho e região, observa-se escassez de estudos sistematizados que avaliem a viabilidade técnica dos agregados graúdos disponíveis. Essa carência de informações dificulta a tomada de decisões baseadas em dados locais e reforça a necessidade de pesquisas que considerem as particularidades geológicas regionais. Assim, este trabalho investiga as características físicas, tecnológicas e granulométricas dos agregados graúdos provenientes da Pedreira Madecon, analisando sua conformidade com a Norma DNIT 031/2024 – ES.

A análise dos materiais locais representa alternativa econômica e sustentável, pois reduz custos com transporte, valoriza recursos regionais e contribui para soluções alinhadas à

sustentabilidade. O uso de materiais disponíveis na própria região de estudo minimiza emissões associadas à logística, estimula o desenvolvimento local e fortalece a base científica sobre agregados aplicáveis a misturas asfálticas. Ao gerar dados sobre a conformidade e o desempenho desses agregados, o estudo fornece subsídios técnicos para projetos de pavimentação mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis, beneficiando tanto órgãos públicos e empresas quanto profissionais e a comunidade em geral.

A viabilidade deste trabalho resulta da estrutura laboratorial disponível no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), que dispõe de laboratórios equipados para ensaios de análise granulométrica, determinação de massa específica e absorção. A proximidade das jazidas regionais e a disponibilidade de normas técnicas atualizadas favorecem a coleta das amostras e a realização dos ensaios.

Ao estudar os agregados graúdos regionais, este trabalho busca suprir lacunas técnicas e científicas existentes, fornecer informações que auxiliem na formulação de soluções mais adequadas para a realidade local e contribuir para a melhoria da infraestrutura rodoviária de Rondônia. Dessa forma, o estudo fortalece o vínculo entre teoria e prática, promove a valorização dos recursos minerais regionais e reforça a importância de uma engenharia civil comprometida com a sustentabilidade, a economicidade e o desenvolvimento regional.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar a conformidade dos agregados graúdos da região de Porto Velho/RO para uso em misturas asfálticas a quente, de acordo com as especificações das Normas Técnicas.

1.1.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos são:

- Realizar a caracterização física e tecnológica dos agregados graúdos disponíveis na região;
- Verificar a viabilidade técnica do uso destes materiais em concretos asfálticos a quente;
- Comparar os resultados obtidos com as faixas granulométricas estabelecidas pela norma DNIT 031/2024-ES;
- Realizar a estabilização granulométrica para enquadrar nas faixas de trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos que fundamentam o desenvolvimento da pesquisa, com ênfase nos materiais constituintes do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), nas normas técnicas aplicáveis à sua produção e aplicação, e na caracterização dos agregados graúdos disponíveis na região de Rondônia. A escolha desses temas se justifica pela relevância dos materiais pétreos no desempenho das misturas asfálticas, especialmente no que se refere à durabilidade, resistência e estabilidade dos revestimentos rodoviários.

Inicialmente, são discutidos os principais componentes do CAUQ, o cimento asfáltico de petróleo (CAP), os agregados graúdos e miúdos, e o filler, abordando suas propriedades físicas, químicas e sua função na estrutura da mistura. Em seguida, apresenta-se a norma DNIT 031/2024 – ES, que regulamenta a produção e execução do concreto asfáltico, definindo parâmetros técnicos e operacionais fundamentais para garantir a qualidade da pavimentação.

Dando continuidade, são abordadas as faixas granulométricas e sua importância na formulação de misturas asfálticas bem compactadas e com bom desempenho mecânico. A correta distribuição granulométrica dos agregados é apontada como um dos principais fatores que influenciam a estabilidade da mistura e sua resistência ao desgaste, deformações e ação da água.

Por fim, discute-se a importância dos estudos regionais voltados à caracterização de agregados disponíveis localmente, considerando que as propriedades desses materiais variam conforme sua origem geológica. Dessa forma, são apresentados trabalhos que analisaram materiais com características semelhantes às encontradas em Rondônia, identificando desafios e soluções aplicadas, os quais contribuem para a contextualização e justificativa da presente pesquisa.

Assim, este capítulo oferece a base teórica necessária para compreender os critérios de seleção e avaliação dos agregados graúdos estudados, além de situar o trabalho dentro do cenário técnico e científico atual, destacando sua relevância para o aprimoramento de obras de pavimentação na região.

2.1 Concreto Asfáltico

O Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), também conhecido como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é a mistura asfáltica a quente mais empregada nas vias brasileiras, tanto urbanas quanto rodoviárias, devido à sua versatilidade, desempenho mecânico e facilidade de execução (Balbo, 2007). O CAUQ é amplamente utilizado em obras

de infraestrutura viária por apresentar boa resistência à ação do tráfego e às variações climáticas, desde que seja corretamente formulado, produzido e aplicado.

De acordo com a norma DNIT 031/2024 - ES, o Concreto Asfáltico é definido como uma mistura homogênea com distribuição granulométrica contínua, composta por cimento asfáltico de petróleo (CAP), agregados graúdos e miúdos, e, em alguns casos, material de enchimento (filler). A homogeneização desses componentes é realizada em usina apropriada, com controle de temperatura e proporções, e o material final deve ser espalhado e compactado ainda quente sobre a pista, garantindo sua trabalhabilidade e adesão.

A qualidade do Concreto Asfáltico está diretamente ligada à seleção e proporção adequada dos seus materiais constituintes, à obediência aos critérios normativos durante sua dosagem e produção, e aos controles executivos aplicados em campo. A resistência ao carregamento repetido dos veículos, a durabilidade diante das intempéries e a capacidade de resistir à deformação permanente são características esperadas desse tipo de mistura quando corretamente executada.

2.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

O Cimento Asfáltico de Petróleo é o principal ligante utilizado em misturas asfálticas e é obtido como um subproduto da destilação do petróleo bruto, apresentando-se como um material viscoso, de coloração preta, com aspecto semissólido à temperatura de 25°C (DNIT 031/2024 - ES). Seu desempenho em misturas asfálticas está relacionado às suas propriedades reológicas e à composição química dos seus constituintes, especialmente os asfaltenos e maltenos.

Os asfaltenos conferem rigidez e resistência ao CAP, enquanto os maltenos, que compõem a fase mais fluida, são responsáveis por sua viscosidade, plasticidade e flexibilidade (Balbo, 2007). Essa composição química proporciona ao material um comportamento termoplástico, que o torna sensível a variações de temperatura. Assim, o CAP apresenta comportamento elasto-viscoplástico, que pode ser alterado com o envelhecimento oxidativo decorrente da exposição à radiação solar, oxigênio atmosférico, umidade e agentes químicos como óleos e combustíveis.

As normas brasileiras, como algumas do DNIT, DNER e ABNT, especificam os ensaios e os critérios mínimos de desempenho para os CAPs utilizados em pavimentação, incluindo propriedades como penetração, ponto de fulgor, viscosidade e ductilidade. O controle dessas propriedades é essencial para assegurar a estabilidade e durabilidade da mistura asfáltica.

2.1.2 Agregados

Os agregados constituem o maior volume da mistura asfáltica, sendo responsáveis por garantir a resistência mecânica, estabilidade volumétrica e a textura superficial do revestimento (Balbo, 2007). São materiais granulares provenientes de jazidas naturais ou de processos industriais, podendo ser classificados em grãos e miúdos conforme os limites estabelecidos pela DNIT 031/2024 - ES.

Agregados grãos são aqueles cujas partículas passam pela peneira de 75 mm e ficam retidas na de 4,8 mm, enquanto os agregados miúdos correspondem às partículas que passam na peneira de 4,8 mm e ficam retidas na de 0,075 mm. A distribuição granulométrica dos agregados influencia diretamente a trabalhabilidade, compactabilidade e desempenho mecânico da mistura.

A escolha dos agregados deve considerar aspectos como origem mineralógica, forma das partículas, presença de contaminantes, aderência ao ligante asfáltico e resistência ao desgaste e à fragmentação. Ensaio como os de abrasão Los Angeles, índice de forma e adesividade são fundamentais para a caracterização e seleção desses materiais.

2.1.3 Filler

O filler é a fração mais fina presente na mistura asfáltica, formada por partículas minerais com diâmetro inferior a 0,075 mm, conforme definido pela DNIT 031/2024 - ES. Seu papel é fundamental no preenchimento dos vazios entre os agregados maiores, contribuindo para a redução da permeabilidade da mistura e para o aumento da coesão e estabilidade do concreto asfáltico.

Dentre os materiais mais comumente utilizados como filler destacam-se a cal hidratada, o cimento Portland, as pozolanas e o pó de pedra resultante da britagem de agregados. A interação do filler com o ligante asfáltico pode alterar significativamente a viscosidade da mistura, influenciando sua trabalhabilidade, durabilidade e resistência à deformação permanente (Balbo, 2007).

Além de seu papel físico no empacotamento dos grãos, o filler pode exercer funções químicas, especialmente no caso da cal hidratada, que pode melhorar a adesividade entre o CAP e os agregados, reduzindo o risco de desprendimento (*stripping*) e melhorando a resistência à umidade.

2.1.4 Normas Técnicas

A produção e aplicação do Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) são regulamentadas por normas técnicas que visam garantir a qualidade, desempenho e durabilidade das camadas de revestimento executadas. A principal referência normativa

nacional para esse tipo de mistura é a DNIT 031/2024 - ES, emitida pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que estabelece as diretrizes e exigências para a execução de revestimentos com misturas asfálticas densas, usinadas a quente.

Essa norma define os critérios técnicos e operacionais relacionados à fabricação, transporte, aplicação e compactação da mistura asfáltica, empregando como constituintes básicos o ligante asfáltico convencional, os agregados graúdos e miúdos, e o material de preenchimento (filler). O documento contempla ainda os requisitos mínimos dos materiais utilizados, especificando características físicas, químicas e mecânicas esperadas para o cimento asfáltico de petróleo, os agregados e o filler, bem como as condições para sua aprovação e utilização em campo.

Além dos materiais, a DNIT 031/2024 - ES descreve os equipamentos necessários para a produção e aplicação do CAUQ, incluindo usinas, vibroacabadoras e rolos compactadores, com o objetivo de assegurar uniformidade, controle de temperatura e compactação adequada da mistura. Também são abordados aspectos ligados ao controle tecnológico da obra, como a coleta de amostras, ensaios laboratoriais, critérios de conformidade e não conformidade, métodos de medição dos serviços executados e procedimentos de aceitação.

A norma estabelece, ainda, orientações sobre fatores ambientais que devem ser observados durante a execução, como a temperatura mínima da pista e da mistura, o controle de emissão de particulados e a adoção de boas práticas ambientais, reforçando o compromisso com a sustentabilidade e com a qualidade dos serviços prestados. Com isso, a DNIT 031/2024 - ES constitui-se como um documento fundamental para garantir a padronização e o desempenho das obras de pavimentação asfáltica no Brasil, sendo referência obrigatória em projetos e execuções contratadas pelo setor público.

2.2 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos são componentes fundamentais das misturas asfálticas, sendo caracterizados principalmente pelo tamanho de suas partículas minerais. De acordo com a norma DNIT 031/2024 - ES, são considerados agregados graúdos aqueles cujas partículas passam na peneira de 75 mm e ficam retidas na peneira de 4,8 mm, ou seja, possuem diâmetro máximo de 75 mm e mínimo de 4,8 mm.

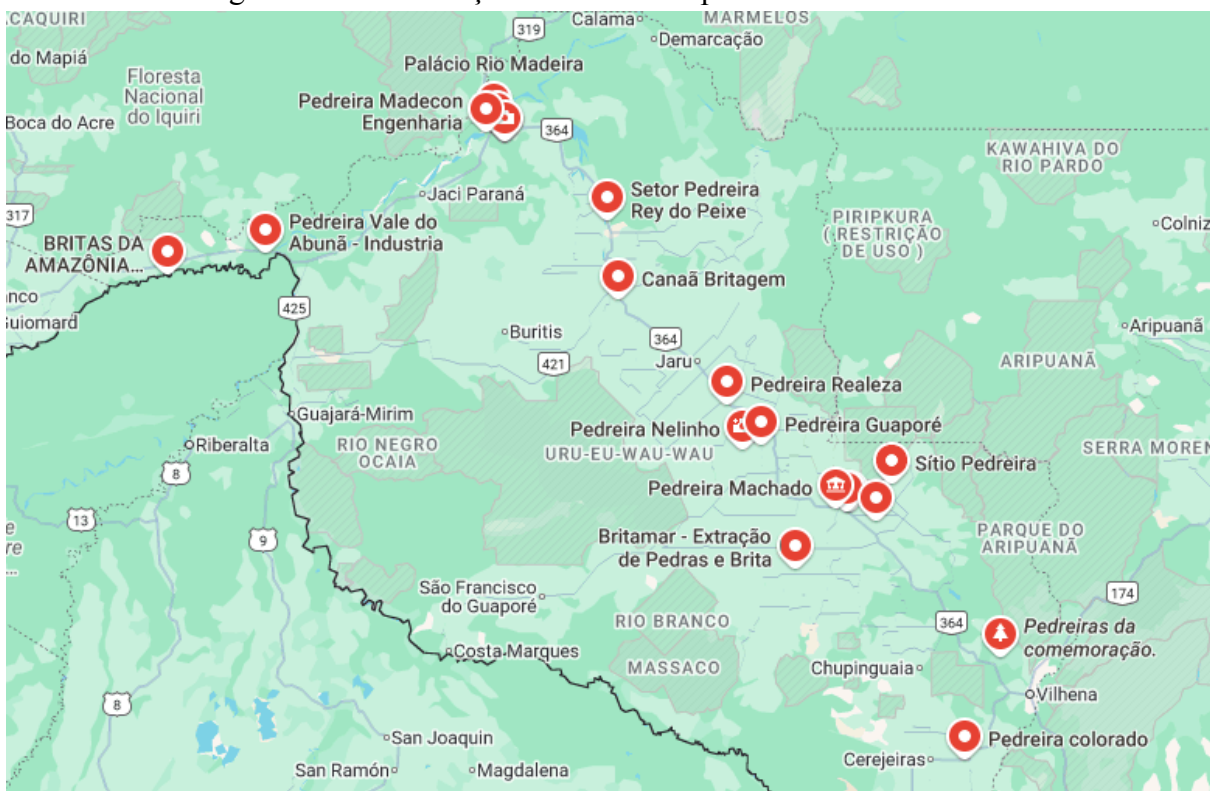
Em relação à classificação, Balbo (2007) apresenta as denominações tradicionais das pedras britadas utilizadas no Brasil, conforme os limites granulométricos definidos por tabelas do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Segundo essa classificação, a brita 0 apresenta diâmetro entre 2,4 mm e 9,5 mm; a brita 1, entre 9,5 mm e 19,0 mm; e a brita 2, entre 19,0 mm e 38,0 mm. Essas variações granulométricas permitem a

seleção adequada do tipo de agregado para diferentes aplicações em pavimentação, influenciando diretamente na estabilidade da mistura e na resistência à deformação.

Do ponto de vista geológico, os agregados graúdos se originam do intemperismo ou da fragmentação mecânica das rochas, que podem ser classificadas em três tipos principais: ígneas, sedimentares e metamórficas (Das, 2019). As propriedades físicas e mecânicas dos agregados, como forma, textura superficial, resistência ao desgaste e aderência ao ligante asfáltico, são diretamente influenciadas pela natureza da rocha-mãe. Por isso, o conhecimento da origem mineralógica dos agregados é essencial para a seleção de materiais com desempenho satisfatório em obras de pavimentação.

No estado de Rondônia, os agregados graúdos utilizados na pavimentação asfáltica e na construção civil são, em sua maioria, provenientes da trituração de rochas graníticas (CPRM, 2007). A extração ocorre principalmente em jazidas localizadas nas proximidades da BR-364 (Figura 2.1), eixo viário de grande importância regional. Esses materiais são amplamente empregados na produção de concreto asfáltico, em obras de infraestrutura rodoviária e na manutenção de estradas federais, estaduais e municipais que atendem Rondônia, sul do Amazonas e o Acre.

Figura 2.1 - Localização das Pedreiras próximas à BR-364/RO.



Fonte: extraída do Google Maps pela autora, 2025.

A rocha granítica, predominante na região, é do tipo ígnea intrusiva, formada a partir do resfriamento lento do magma no interior da crosta terrestre. Esse processo resulta em uma

estrutura cristalina composta, majoritariamente, por quartzo, feldspato potássico e feldspato sódico, minerais que conferem ao granito alta dureza e resistência ao desgaste mecânico (Das, 2019). Tais características fazem com que os agregados derivados do granito apresentem bom desempenho em revestimentos asfálticos, especialmente em termos de durabilidade e resistência à abrasão.

A forma dos agregados é determinada pela norma DNIT 416/2021 – ME, e influencia diretamente tanto na trabalhabilidade quanto na resistência ao cisalhamento das misturas, além de alterar a quantidade de energia necessária para atingir a densidade de compactação desejada. Agregados com formas irregulares ou angulares, como brita, cascalho e certos tipos de areia de brita, tendem a proporcionar maior intertravamento entre as partículas, especialmente quando apresentam formato mais cúbico e arestas bem definidas (Bernucci et al, 2008).

Segundo Bernucci et al. (2008), o índice de forma está diretamente associado ao formato das partículas dos agregados, podendo ser utilizado para classificá-las quanto à sua geometria. Esse índice varia entre 0,0 e 1,0, sendo que valores próximos de 1,0 indicam partículas de elevada cubicidade, enquanto valores próximos de 0,0 caracterizam agregados lamelares. Os autores ressaltam ainda que o valor mínimo aceitável para esse parâmetro é 0,5, abaixo do qual o agregado não é considerado adequado quanto à forma.

2.3 Faixas Granulométricas

Segundo Guabiroba et al. (2023), a distribuição granulométrica dos agregados é um dos fatores mais determinantes para o desempenho mecânico e funcional das misturas asfálticas. Refere-se à proporção de partículas de diferentes tamanhos presentes na composição do concreto asfáltico, e seu controle adequado é essencial para garantir a trabalhabilidade, compactabilidade, estabilidade volumétrica e resistência à deformação do revestimento.

As faixas granulométricas recomendadas são estabelecidas por normas técnicas, como a DNIT 031/2024 – ES, que define os limites superiores e inferiores para os percentuais acumulados de massa que devem passar por determinadas peneiras padronizadas. Na Tabela 2.1, apresentada a seguir, são demonstradas essas faixas granulométricas previstas pela norma, servindo como referência para a adequada seleção e controle dos materiais. A aplicação desses limites normativos possibilita a formulação de misturas asfálticas com distribuição contínua, favorecendo a redução de vazios entre as partículas e a otimização da ligação entre os agregados e o ligante asfáltico.

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico.

Peneiras		% passante, em massa			
ASTM	Abertura (mm)	A-25	B - 19	C - 12,5	D-9,5
1 ½"	38,1	100	-	-	-
1"	25,4	90 - 100	100	-	-
¾"	19,1	70 - 89	90 - 100	100	-
½"	12,7	58- 78	70 - 89	90 - 100	100
⅜"	9,5	48 - 71	55 - 82	73 - 89	90 - 100
¼"	6,3	35 - 61	42 - 70	53 - 78	65 - 89
Nº 4	4,8	29 - 55	35 - 63	44 - 72	53 - 83
Nº 8	2,36	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
Nº 16	1,18	13 - 36	16 - 37	17 - 45	20 - 52
Nº 30	0,60	9 - 28	10 - 28	11 - 35	13 - 40
Nº 50	0,30	5 - 21	6 - 20	6 - 25	8 - 29
Nº 100	0,150	2 -14	4 - 13	3 - 17	4 - 19
Nº 200	0,075	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Fonte: Norma DNIT 031/2024 - ES.

De modo geral, quanto mais bem distribuídas estiverem as partículas, maior será a densidade da mistura após a compactação, o que favorece a durabilidade e resistência do pavimento ao tráfego e às intempéries (Rodrigues, 2022). Por outro lado, uma má distribuição, com excesso de finos ou descontinuidade entre tamanhos, pode resultar em misturas instáveis, com suscetibilidade à deformação plástica (trilhas de roda), segregação, ou falta de coesão interna.

As faixas granulométricas são representadas por curvas granulométricas, construídas com base em ensaios laboratoriais que avaliam a porcentagem passante de cada peneira em função do tamanho das partículas (DNIT 031/2024-ES). A conformidade da curva com as faixas normativas é fundamental para a aprovação da mistura. Curvas bem-sucedidas são aquelas que, dentro da faixa de controle, apresentam um perfil contínuo e progressivo, sem variações abruptas, o que indica um bom equilíbrio entre agregados graúdos, miúdos e filler.

De acordo com Souza (2015), pode-se citar as curvas granulométricas de misturas do tipo CBUQ utilizadas em obras de revestimento com alto volume de tráfego, nas quais a

composição é ajustada de forma a garantir resistência à fadiga e estabilidade sob cargas repetidas. Nessas misturas, observa-se uma curva suavemente inclinada dentro dos limites da faixa tipo C da norma DNIT, com adequado teor de finos para promover coesão e resistência à umidade.

Portanto, a análise granulométrica não apenas garante a qualidade técnica da mistura, como também orienta sua dosagem, contribuindo para o desempenho global do pavimento ao longo de sua vida útil. A realização desse controle é etapa obrigatória no desenvolvimento de qualquer projeto de pavimentação, sendo fundamental tanto na fase de projeto quanto na execução em campo.

2.4 Estudos Regionais Sobre Agregados

A caracterização dos agregados disponíveis em diferentes regiões do país é uma etapa fundamental para garantir a qualidade e o desempenho de misturas asfálticas adaptadas às condições locais. Diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de analisar os materiais disponíveis em áreas específicas, avaliando sua adequação às normas técnicas vigentes e sua influência no comportamento mecânico das misturas. Esses trabalhos são especialmente relevantes em regiões com menor industrialização ou infraestrutura logística limitada, como ocorre em parte da Região Norte do Brasil.

Apesar da ampla utilização de agregados graúdos de origem granítica em obras rodoviárias de Rondônia, provenientes, em sua maioria, da britagem de rochas ígneas extraídas em jazidas localizadas nas proximidades de grandes rodovias, como a BR-364 (CPRM, 2007), ainda não há estudos locais específicos voltados à caracterização desses materiais com o objetivo de verificar seu enquadramento nas faixas granulométricas definidas por normas técnicas, como a DNIT 031-2024/ES. A ausência desse tipo de investigação regional compromete a avaliação precisa da conformidade dos agregados utilizados nas obras de pavimentação e dificulta a adoção de critérios técnicos seguros para sua aplicação em misturas asfálticas, especialmente no que se refere a propriedades como distribuição granulométrica, forma das partículas, aderência ao ligante asfáltico (CAP) e resistência ao desgaste mecânico.

Assim, a pesquisa se insere em um contexto de construção e fortalecimento da base técnica regional, podendo fornecer dados importantes para subsidiar decisões de projetistas, construtores e gestores públicos quanto ao uso racional e eficiente dos materiais disponíveis, promovendo ganhos técnicos e econômicos nas obras de pavimentação em Rondônia.

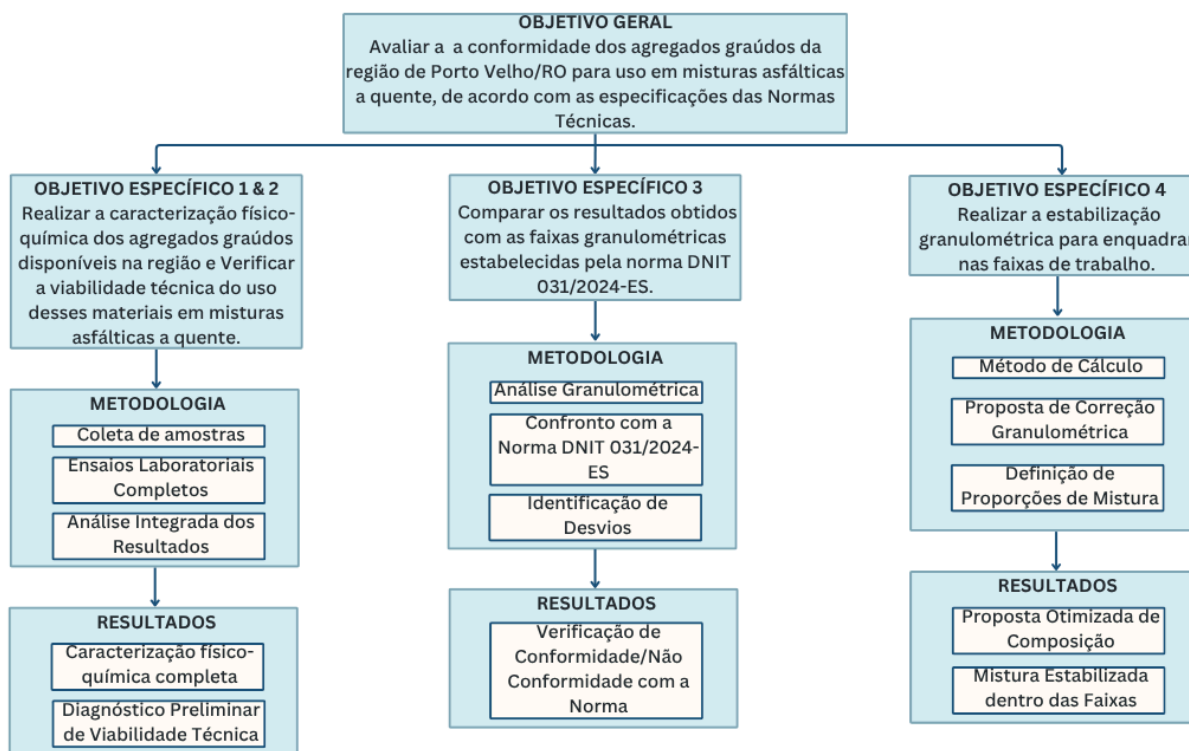
3 METODOLOGIA

Para compreender o comportamento dos agregados na composição de um pavimento, é essencial a realização de ensaios laboratoriais associados à experiência prática. Esses procedimentos têm como objetivo prever como uma rocha, formada há milhões de anos, irá se comportar no estado de agregado ao longo da vida útil do pavimento. O desempenho esperado está diretamente relacionado à capacidade do material em suportar as tensões atuantes tanto na superfície quanto nas camadas internas da estrutura.

Nesse contexto, a seleção do agregado mais adequado para determinada aplicação baseia-se na verificação de suas propriedades mecânicas, considerando a forma como as partículas são produzidas, mantidas unidas e as condições de serviço às quais serão submetidas. Assim, os ensaios de laboratório tornam-se fundamentais para prever o comportamento do material em campo, orientando a escolha técnica mais apropriada.

Com base nesses princípios, o presente estudo define quatro objetivos específicos, onde três deles orientam a seleção e aplicação dos ensaios laboratoriais, conforme ilustrado no fluxograma a seguir (Figura 3.1). Cada objetivo está vinculado a métodos normativos que serão descritos detalhadamente nesta metodologia.

Figura 3.1 - Fluxograma de objetivos/ensaios.



Fonte: Autora, 2025.

3.1 Tipo de Pesquisa

Esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa, com delineamento experimental em laboratório. Seu objetivo é analisar se os agregados graúdos da região de estudo atendem aos requisitos normativos para uso em concreto asfáltico.

3.2 Área de Estudo

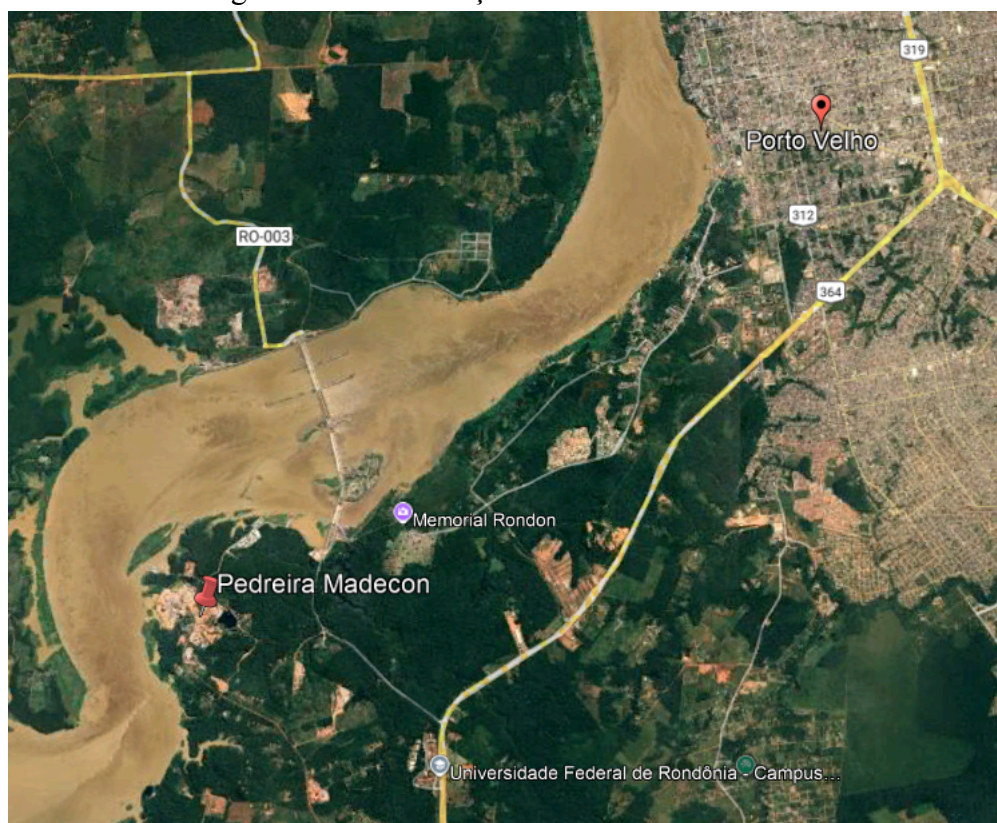
Os agregados graúdos foram coletados em Porto Velho (Figura 3.2) na Pedreira da empresa Madecon (Figura 3.3). O local foi escolhido por representar um fornecedor regional de materiais pétreos com potencial uso em obras de pavimentação.

Figura 3.2 - Localização de Porto Velho.



Fonte: extraída do Google Maps pela autora, 2025.

Figura 3.3 - Localização da Pedreira de Estudo.



Fonte: extraída do Google Earth pela autora, 2025.

3.3 Coleta de Amostras

De acordo com a norma DNER – PRO 120/1997, a coleta de amostra foi realizada de modo a garantir a representatividade dos ensaios, adotando-se os cuidados necessários para que refletisse a natureza e as condições dos agregados. A amostra destinada ao ensaio foi composta por diversas amostras parciais coletadas em diferentes pontos do lote, em número suficiente para representar as características médias do material. As massas ou volumes considerados corresponderam a agregados com massa específica entre 2 g/cm^3 e 3 g/cm^3 , e a quantidade total da amostra, em volume, seguiu os critérios práticos usuais.

A amostra coletada no campo foi reduzida para envio ao laboratório. Para a execução do procedimento, foram utilizados baldes de plástico de 40 cm x 40 cm x 30 cm, colher ou concha para amostragem, enxada, pá côncava e reta, pá de bico e etiquetas. A identificação das amostras foi feita com etiquetas contendo informações sobre a natureza do material, procedência, quantidade, data e local de coleta, responsável pela coleta, finalidade, local de aplicação e nome do remetente.

Figura 3.4 - Material de ensaio.



Fonte: Autora, 2025.

A amostra de agregados para ensaio é constituída por rochas de origem granítica, do tipo ígnea intrusiva. A granulometria do material é composta pela Brita 1, com dimensões variando entre 9,5 mm e 19 mm, e pela Brita 0, de menor granulometria, compreendida entre 4,8 mm e 9,5 mm, representando as frações graúdas utilizadas no conjunto.

3.4 Ensaios Laboratoriais

Os ensaios descritos a seguir foram realizados no laboratório de resistência dos materiais e no laboratório de mecânica dos solos do IFRO - Câmpus Calama.

3.4.1 Granulometria

Este ensaio é fundamentado pela norma DNIT 412/2025-ME e tem como objetivo descrever o procedimento de análise granulométrica para determinação da composição granulométrica por peneiramento de agregados graúdos e miúdos ou de mistura de agregados.

3.4.1.1 Aparelhagem

- Estufa capaz de controlar a temperatura automaticamente e manter constante até 105 °C, com resolução de ± 5 °C;
- Balança com resolução de 0,1 % da massa da amostra a ser ensaiada;
- Agitador de peneiras mecânico, com dispositivo para fixação de uma até seis peneiras, inclusive tampa e fundo, capaz de criar movimentos preferencialmente circulares e

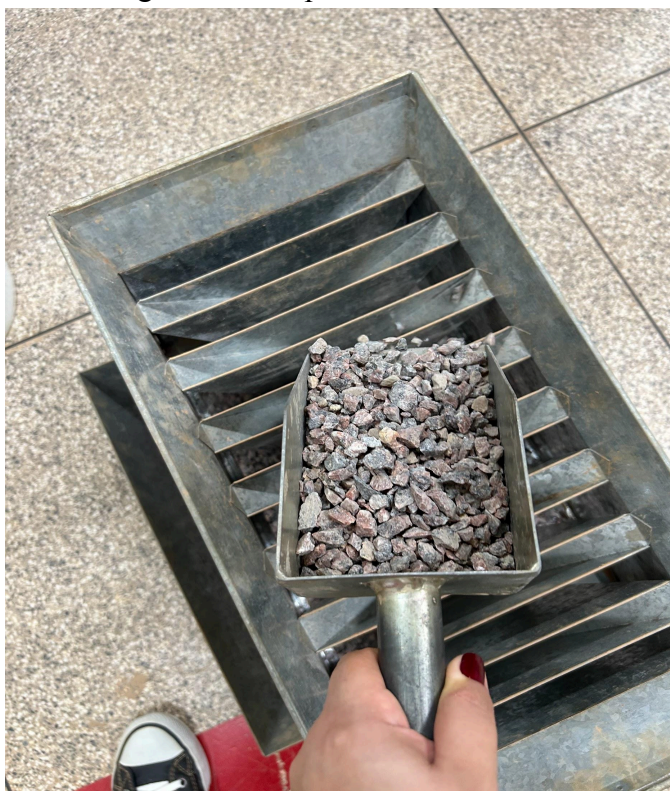
verticais das peneiras, acarretando a passagem das partículas pelas aberturas de cada peneira;

- Termômetro resistente ao calor, com escala de 30 °C a 150 °C e precisão de 1 °C;
- Bandeja metálica retangular de 50 cm x 30 cm x 6 cm (altura);
- Repartidores de amostra;
- Série de peneiras, com tampa e fundo, que atendam às exigências da norma DNIT 453 – EM;
- Escovas ou pincéis, com cerdas de aço ou de fios, para limpeza de peneiras.

3.4.1.2 Amostragem

A amostragem dos agregados no campo foi realizada conforme os procedimentos da norma DNER – PRO 120/97 e a redução para ensaio no laboratório atendeu ao procedimento DNER – PRO 199/96. No laboratório, a amostra foi separada por repartidor (Figura 3.5) até atingir a quantidade indicada para o ensaio.

Figura 3.5 - Repartidor de amostras.



Fonte: Autora, 2025.

A massa mínima por amostra de agregado a ensaiar obedeceu ao especificado na Tabela 3.1, tendo sido utilizados um quilo para brita 0 e um quilo para brita 1, considerando-se o tamanho máximo das partículas para garantir quantidade adequada de material para ensaio. Por fim, a amostra foi seca em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C até

atingir massa constante, resfriada à temperatura ambiente e, em seguida, determinou-se sua massa total.

Tabela 3.1 - Massa mínima por amostra de ensaio.

Tamanho Máximo dos agregados (mm)	Massa mínima de amostra seca para o ensaio (kg)
4,8	0,3 a 0,5
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60

Fonte: Norma DNIT 412/2025-ME.

3.4.1.3 Procedimento experimental

O peneiramento com agitador mecânico foi realizado conforme estabelecido na norma, utilizando-se uma série de peneiras previamente limpas, com aberturas de malha redonda adequadas para fornecer as informações requeridas. As peneiras foram encaixadas em ordem crescente de abertura de malha da base para o topo, completando a série com tampa e fundo (Figura 3.6). A amostra foi transferida para a peneira superior, evitando camadas espessas sobre qualquer malha, e o peneiramento foi conduzido por tempo suficiente para separar e classificar os grãos. Após o uso do agitador, cada série de peneiras com fundo e tampa foi retirada e procedeu-se ao peneiramento manual de cada uma com movimentos laterais e circulares alternados, tanto no plano horizontal como no inclinado, durante um minuto. Ao final desse período, verificou-se que a massa passante em cada peneira foi inferior a 1% da massa retida para um minuto de agitação. Em seguida, determinou-se a massa retida em cada peneira após a limpeza da malha com escova ou pincel, sem forçar a passagem de partículas, considerando os grãos removidos da parte interna como retidos e os da parte externa como passantes, aplicando o mesmo procedimento às demais peneiras.

Figura 3.6 - Agitador e série de peneiras.



Fonte: Autora, 2025.

A Figura apresenta o conjunto de peneiras utilizadas no processo de análise granulométrica das amostras de agregado graúdo. Para a brita 0, foram empregadas peneiras com aberturas de 9,5 mm a 0,6 mm, enquanto para a brita 1 utilizaram-se peneiras de 19 mm a 4,8 mm, conforme a faixa de interesse para classificação dessas frações. O ensaio foi conduzido em um peneirador vibratório, operando a uma frequência constante de 600 movimentos por minuto, garantindo a adequada mobilização das partículas sobre as superfícies perfuradas. O tempo total de peneiramento adotado foi de 10 minutos, assegurando a completa separação das frações e a obtenção de resultados consistentes para posterior interpretação granulométrica.

3.4.1.4 Cálculos de granulometria

Foi determinada a massa retida em cada peneira, com aproximação de 0,1 % sobre a massa total da amostra, após a limpeza de suas malhas com escova ou pincel, considerando-se como retidos os grãos removidos da parte interna das peneiras e como passantes os da parte externa. Em seguida, foi obtido o somatório das massas retidas nas peneiras e nos fundos, não apresentando diferença superior a 0,3% em relação à massa inicial da amostra seca, sendo desconsiderado o teor de materiais pulverulentos no cálculo da composição granulométrica.

Foram calculadas as porcentagens em massa passantes, retidas e acumuladas em cada peneira, com aproximação de 0,1 %, tomando-se como base a massa total da amostra seca inicial.

3.4.2 Densidade individual e Absorção de água

Este ensaio é fundamentado pela norma DNIT 413/2021-ME e tem como objetivo determinar a massa específica média de uma quantidade de partículas de agregado graúdo, a densidade relativa e a absorção.

3.4.2.1 Aparelhagem

- Balança com precisão de 0,1%;
- Recipiente para a amostra - Cesta de arame de malha de 3,35 mm (n° 6) ou menor, com capacidade de 4 a 7 litros para agregados de tamanho nominal máximo de 37,5mm ou menores;
- Tanque ou recipiente com água impermeável.
- Peneiras de 4,75 mm (n° 4) ou de outros tamanhos, de acordo com a norma DNER-EM 035/95;
- Estufa com capacidade para acolher a cesta e manter a temperatura uniforme de (110 ± 5) °C.

3.4.2.2 Amostragem

A amostra de agregado foi completamente misturada e reduzida até a quantidade necessária, conforme indicado na Tabela 3.2 e seguindo a norma DNER – PRO 199/96. Todo o material passante na peneira de 4,75 mm (# n° 4) foi rejeitado por peneiramento a seco e lavagem total, a fim de remover o material pulverulento e outras camadas da superfície dos grãos.

Tabela 3.2 - Quantidade mínima de agregado para ensaio de massa específica dos grãos.

Tamanho Nominal Máximo, mm (pol.)	Massa mínima para a Amostra de Ensaio, kg
12,5 (1/2") ou menor	2
19,0 (3/4")	3
25,0 (1")	4
37,5 (1 1/2")	5
50 (2")	8
63 (2 1/2")	12

75 (3'')	18
----------	----

Fonte: Norma DNIT 413/2021-ME.

3.4.2.3 Procedimento experimental

A amostra do ensaio foi lavada (Figura 3.7) e seca em estufa até atingir massa constante, à temperatura de (110 ± 5) °C, sendo posteriormente deixada esfriar ao ar livre, à temperatura ambiente, por 1 a 3 horas, até alcançar aproximadamente 50 °C, possibilitando o manuseio confortável.

Figura 3.7 - Amostras lavadas antes de ir à estufa.



Fonte: Autora, 2025.

Em seguida, o agregado foi submerso em água à temperatura ambiente por (24 ± 4) horas (Figura 3.8). Após esse período, a amostra foi retirada da água, espalhada sobre pano absorvente e rolada até a remoção dos filmes visíveis de água da superfície (Figura 3.9).

Figura 3.8 - Agregados submersos.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 3.9 - Remoção dos filmes visíveis de água da superfície.



Fonte: Autora, 2025.

A amostra foi pesada imediatamente nessa condição, registrando-se a massa saturada de superfície seca como (B), com aproximação de 0,5 g ou 1 g, conforme a massa. Em seguida, o material foi colocado em uma cesta e totalmente submerso em água potável à temperatura de $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$, registrando-se a leitura como (C) (Figura 3.10), garantindo-se a

remoção de todo o ar retido por agitação da cesta. A diferença entre a massa ao ar livre (B) e a submersa (C) correspondeu à massa da água deslocada. Durante todo o procedimento, a cesta permaneceu totalmente imersa, e o arame ou cabo utilizado para sua suspensão foi mantido no menor comprimento possível.

Figura 3.10 - Pesagem do material submerso.



Fonte: Autora, 2025.

Por fim, a amostra foi seca novamente em estufa até atingir massa constante à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, resfriada à temperatura ambiente por 1 a 3 horas ou até alcançar temperatura conveniente para manuseio, determinando-se então a massa do agregado seco e registrando-a como (A).

3.4.2.4 Cálculos

Após a realização dos procedimentos experimentais e a obtenção dos dados necessários, procedeu-se ao tratamento quantitativo, de acordo com os parâmetros estabelecidos em norma. Os cálculos referentes à densidade relativa, massa específica e porcentagem de absorção de água foram conduzidos com base nos valores obtidos em laboratório, empregando-se as expressões matemáticas previstas para cada determinação. Nos tópicos subsequentes, são apresentadas as equações utilizadas, bem como a definição das

variáveis envolvidas e os critérios adotados para o processamento dos resultados, assegurando a reprodutibilidade e a consistência metodológica da etapa de análise.

- **Densidade relativa**

A densidade relativa real dos grãos de agregado graúdo foi calculada utilizando a Equação 1, na qual a massa da amostra seca em estufa no ar (A) foi dividida pela diferença entre essa massa e a massa imersa da amostra saturada em água (C). Já a densidade relativa aparente dos grãos de agregado foi determinada pela Equação 2, dividindo-se a massa da amostra seca em estufa no ar (A) pela diferença entre a massa da amostra na condição saturada com superfície seca, ao ar (B), e a massa imersa da amostra saturada em água (C).

$$G_{sa} = \frac{A}{A-C} \text{ (equação 1)}$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C} \text{ (equação 2)}$$

- **Massa específica**

A massa específica real do grão do agregado foi calculada pela Equação 3, multiplicando-se a massa da amostra seca em estufa no ar (A) pela constante 0,9971 (massa específica da água a 25 °C) e dividindo-se pelo resultado da diferença entre A e a massa imersa da amostra saturada em água (C). Quando a água esteve em temperatura diferente de 25 °C, utilizou-se a constante correspondente à sua massa específica na condição verificada. Já a massa específica aparente do agregado foi calculada pela Equação 4, também utilizando a constante 0,9971, multiplicada pela massa da amostra seca (A) e dividida pela diferença entre a massa da amostra na condição saturada com superfície seca ao ar (B) e a massa imersa da amostra saturada em água (C). Ambos os resultados foram expressos em g/cm³.

$$ME_{sa} = 0,9971 \frac{A}{A-C} \text{ (equação 3)}$$

$$ME_{sb} = 0,9971 \frac{A}{B-C} \text{ (equação 4)}$$

- **Porcentagem de absorção de água**

A porcentagem de absorção foi calculada utilizando a Equação 5, a qual consistiu em subtrair a massa da amostra seca em estufa no ar (A) da massa da amostra na condição saturada com superfície seca, também ao ar (B), dividindo-se o resultado por A e multiplicando-o por 100, obtendo-se assim o valor da absorção em percentual.

$$\text{Absorção}(\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \text{ (equação 5)}$$

3.4.3 Índice de forma

Este ensaio é fundamentado pela norma DNIT 425/2020-ME e tem como objetivo determinar o índice de forma de agregados graúdos, utilizando o paquímetro.

3.4.3.1 Aparelhagem

- Paquímetro com resolução de 0,1 mm, aferido;
- Peneiras de malhas quadradas com caixilhos metálicos e aberturas nominais de acordo com a norma DNER-EM 035/1995, em milímetros de: 75; 63; 50; 37,5; 25; 19; 12,5 e 9,5; inclusive tampa e fundo;
- Agitador para peneiras com dispositivo para fixação desde uma peneira até seis, inclusive tampa e fundo;
- Balança com capacidade de 6,5 kg, sensível a 0,1g;
- Estufa capaz de manter a temperatura em $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

3.4.3.2 Amostragem

A amostragem foi efetuada conforme a norma DNER – PRO 120/1997 e, posteriormente, sua redução foi realizada por repartidor de amostra, regido pela norma DNER – PRO 199/1996. O procedimento consistiu em dispor a amostra de campo no separador, distribuindo-a uniformemente de ponta a ponta. A velocidade na qual a amostra foi introduzida permitiu o agregado passar livremente através das calhas para os recipientes colocados abaixo delas. O processo foi repetido até que a amostra fosse reduzida à quantidade desejada (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Repartidor de amostra.



Fonte: Autora, 2025.

As quantidades mínimas de amostra, em função da fração granulométrica, foram definidas conforme a Tabela 3.3, sendo que para Brita 0 utilizou-se 5 kg e para Brita 1 10 kg.

Tabela 3.3 - Quantidade mínima da amostra.

Fração granulométrica (abertura da peneira mm)	Massa mínima da amostra inicial (kg)
< 19	5
> 19 e ≤ 25	10
> 25 e ≤ 37,5	15
> 37,5	20

Fonte: Norma DNIT 425/2020-ME.

3.4.2.3 Procedimento experimental

A amostra foi seca em estufa a (110 ± 5) °C até atingir massa constante. Em seguida, procedeu-se à análise granulométrica conforme o método de ensaio DNIT 412 – ME, desprezando-se as frações passantes na peneira de 9,5 mm e aquelas que apresentaram retenção inferior a 5% em massa. Neste estudo, o ensaio foi executado apenas para a amostra de Brita 1, tendo em vista que a Brita 0 apresentou predominância de partículas passantes na peneira de 9,5 mm, o que a caracterizou com insuficiência de amostra representativa. Foi determinada a porcentagem da massa retida em cada peneira, sendo essas massas, dentro das tolerâncias permitidas, utilizadas nos cálculos para a obtenção dos resultados. Cada fração obtida foi posteriormente levada ao repartidor de amostras até atingir o número de partículas correspondente, calculado pela fórmula:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i \quad (\text{equação 6})$$

O número total de partículas consideradas para o ensaio foi 200, sendo N_i o número de partículas da fração i e F_i o percentual da massa retida na fração i . Valores fracionários de N_i foram arredondados para o número inteiro mais próximo. Por fim, com o auxílio de um paquímetro, foram medidos o comprimento (c) e a espessura (e) de cada uma das partículas selecionadas.

3.4.2.4 Cálculos do índice de forma

O índice de forma de cada fração ensaiada foi calculado pela média ponderada das relações entre comprimento e espessura (c/e) de todos os grãos medidos, conforme a Equação 6, sendo o resultado expresso com aproximação ao décimo mais próximo. O índice de forma

correspondeu à razão entre o comprimento médio ($c_{\text{médio}}$) e a espessura média ($e_{\text{médio}}$) dos 200 grãos, ambos em milímetros, conforme a Equação 7.

$$I = \frac{c_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}} \text{ (equação 7)}$$

3.4.4 Partículas fraturadas

Este ensaio baseia-se na norma DNIT 430/2020-ME e tem como finalidade definir o procedimento técnico para determinar a porcentagem de partículas fraturadas, angulosas e rugosas, resultantes da quebra natural ou do processo de britagem, presentes em uma amostra de agregados graúdos.

3.4.4.1 Aparelhagem

- Balança com precisão de leitura de no mínimo 0,1% da massa ensaiada;
- Peneiras de malhas quadradas com caixilhos metálicos e aberturas nominais (DNER – EM 035/95), em milímetros, de: 75; 63; 50; 37,5; 25; 19; 12,5; 9,5 e 4,75 mm;
- Estufa capaz de manter a temperatura em (110 ± 5) °C.

3.4.4.2 Amostragem

A amostragem dos agregados graúdos foi realizada conforme o DNER - PRO 120/97. Em seguida, a amostra foi seca até permitir a separação adequada entre materiais graúdos e miúdos, sendo peneirada na peneira 4,75 mm (nº 4), conforme o método DNIT 412 – ME. As partículas retidas foram reduzidas com quarteador, conforme o DNER – PRO 199/96, com tamanho adequado ao ensaio. A massa da amostra obedeceu à massa mínima indicada na Tabela 3.4, onde para Brita 0 utilizou-se 0,2 kg e para a Brita 1 1,5 kg.

Tabela 3.4 - Massa mínima por amostra de ensaio.

Tamanho nominal máximo dos agregados (mm)	Massa mínima da amostra para o ensaio (kg)
9,5	0,2
12,5	0,5
19,0	1,5
25,0	3,0
37,5	7,5
50	15
63	30

75	60
90	90

Fonte: Norma DNIT 430/2020-ME.

3.4.4.3 Procedimento experimental

A amostra foi lavada na peneira designada para a determinação de partículas fraturadas, neste caso utilizou-se a peneira de 4,75 mm (Figura 3.12), a fim de remover materiais finos remanescentes, e em seguida a amostra foi seca em estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até atingir massa constante, essa massa sendo determinada com precisão de 0,1% da massa seca original.

Figura 3.12 - Amostra sendo lavada com auxílio da peneira de 4,75 mm.



Fonte: Autora, 2025.

Após a secagem, a amostra foi espalhada sobre uma superfície lisa, limpa e ampla o suficiente para permitir a inspeção detalhada de cada partícula. A verificação do critério de fratura consistiu em observar diretamente cada face da partícula e, se a face analisada correspondesse a pelo menos um quarto da área da seção transversal máxima da partícula, ela foi considerada fraturada. As partículas foram separadas com espátula em três categorias: (1) com uma face fraturada, (2) com duas ou mais faces fraturadas, e (3) que não atendiam ao critério. Por fim, determinou-se as massas (1) e (2), assim como as que não atendem ao critério, sendo usada para o cálculo da porcentagem de partículas fraturadas.

3.4.4.4 Cálculos das porcentagens das partículas

A porcentagem de partículas com um determinado número de faces fraturadas foi determinada em massa, com aproximação de até 1%, utilizando a Equação 8, onde P

representa a porcentagem de partículas fraturadas, F é a massa com pelo menos um número de faces fraturadas, e N é a massa de partículas não fraturadas.

$$P = \frac{F}{F+N} \times 100 \text{ (equação 8)}$$

3.4.5 Abrasão Los Angeles

Este ensaio é fundamentado pela norma DNIT 451/2024-ME e tem como objetivo estabelecer a metodologia de ensaio que define o procedimento para determinar o valor do desgaste do agregado por abrasão e impacto, utilizando o equipamento "Los Angeles".

3.4.5.1 Aparelhagem

- Equipamento Los Angeles;
- Balança com capacidade de pelo menos 200 kg, sensível a 50 g;
- Carga abrasiva, que consiste em 12 esferas de aço com aproximadamente 48 mm de diâmetro cada uma pesando entre 390g e 445g, tendo o peso total de ± 5000 g;
- Estufa capaz de manter a faixa térmica de trabalho entre 105 °C e 110 °C;
- Peneiras de malhas quadradas com caixilhos metálicos e aberturas, de acordo com a NORMA DNIT 453/2024 – EM. Estas peneiras devem ter as seguintes aberturas nominais, em milímetros: 76 mm – 63 mm – 50 mm – 38 mm – 25 mm – 19 mm – 12,5 mm – 9,5 mm – 6,3 mm – 4,8 mm – 2,4 mm – 2 mm e 1,7 mm;
- Bandeja metálica de aproximadamente (700 x 500 x 50) mm;
- Colher retangular ou pá de cabo curto;
- Escova de fibra de aço.

3.4.5.2 Amostragem

As amostras selecionadas para o ensaio corresponderam às graduações B e C, sendo as massas utilizadas definidas conforme os valores apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Exemplo de Graduação para ensaio.

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa principal em gramas (g)						
Passante	Retido	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 \pm 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 \pm 50	-	-
50	38	-	-	-	-	2500 \pm 50	5000 \pm 50	-
38	25	1250 \pm 25	-	-	-	-	5000 \pm 25	5000 \pm 25
25	19	1250 \pm 25	-	-	-	-	-	5000 \pm 25

19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais (g)		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: Norma DNIT 451/2024-ME.

A representatividade deste ensaio foi intimamente ligada à granulometria do material ensaiado, portanto a graduação escolhida é a de granulometria mais próxima possível da que deverá ser usada na obra.

A amostra destinada ao ensaio foi peneirada e levada ao repartidor de amostras, nas diferentes porções retiradas nas diferentes peneiras, para fornecer a amostra da graduação escolhida. Cada fração obtida no peneiramento foi lavada e seca separadamente, em bandejas metálicas, em estufa, à temperatura entre 105 °C e 110 °C, até se verificar constância de peso ($\pm 0,5$ g) após duas pesagens sucessivas.

Após o período de secagem, determinaram-se as massas das porções de graduação escolhida, com aproximação de 1g, e tendo em vista a obtenção das massas especificadas na Tabela 3.5, obedecendo-se às respectivas tolerâncias. O ensaio foi realizado para cada porção de mesma graduação, ou seja, cada fração da peneira.

Em seguida, reuniram-se as diversas porções da mesma graduação, misturou-se bem e somou-se as massas parciais correspondentes, obtendo-se, assim, a massa da amostra seca, antes do ensaio (m_n). A carga abrasiva usada para cada graduação seguiu a da Tabela 3.6 abaixo.

Por fim, verificou-se se as esferas satisfaziam às condições fixadas quanto à massa, dimensões e uniformidade de superfície.

Tabela 3.6 - Carga abrasiva de acordo com a graduação.

Graduação	Número de esferas	Massa da carga abrasiva (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25

C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

Fonte: Norma DNIT 451/2024-ME.

3.4.5.3 Procedimento experimental

Inicialmente, verificou-se a limpeza interna do tambor do equipamento “Los Angeles”. Em seguida, a amostra e a carga abrasiva correspondente foram colocadas dentro do tambor, que seguiu cuidadosamente fechado para evitar perda de material. O tambor foi girado entre 30 rpm e 33 rpm até completar 500 rotações. Após o ensaio, todo o material foi retirado do tambor, as esferas separadas e limpas com escova de fibra. A amostra foi então agitada em peneira de 2,0 mm, sendo rejeitado o material passante. O material retido foi lavado na própria peneira, reunido e seco em estufa entre 105 °C e 110 °C por no mínimo 3 horas. Por fim, o material foi retirado da estufa, deixado para esfriar, e sua massa foi determinada com aproximação de 1 g, obtendo-se a massa da amostra lavada e seca (m'_n).

3.4.5.4 Cálculos do desgaste por abrasão dos agregados

O desgaste por abrasão “Los Angeles” do agregado foi calculado pela equação 9, onde A_n é o desgaste por abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%, expresso em porcentagem (%); n é a graduação (B ou C) escolhida para o ensaio; m_n é a massa total da amostra seca, colocada no equipamento, expressa em gramas (g); e m'_n é a massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 2,0 mm), expressa em gramas (g). A norma sugere o uso de modelo de planilha para inserção de dados, cálculo e apresentação dos resultados, que utiliza como base a Tabela 3.5 diferenciando as amostras de m_n e m'_n . O ensaio foi expresso com aproximação de 1%. A interpretação do resultado levou em conta a composição mineralógica, a estrutura da rocha e a respectiva aplicação do agregado.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (\text{equação 9})$$

3.4.6 Durabilidade dos agregados

Este ensaio é fundamentado pela norma DNIT 446/2024-ME e tem como objetivo estabelecer a metodologia de ensaio que define a sistemática a ser utilizada na verificação da

durabilidade, avaliada por meio da resistência à desintegração de agregados expostos à ação do tempo, em função do ataque de soluções saturadas de sulfato de magnésio.

3.4.6.1 Aparelhagem

- Balança com capacidade de 6,5 kg, sensível a 0,1 g;
- Cestos com tela metálica de aberturas de 4,8 mm e 0,15 mm devem acomodar a amostra e permitir a circulação da solução ao serem submersos; peneiras circulares com malha quadrada convencionais também são aceitas, desde que atendam aos requisitos desta alínea;
- Recipiente para manter a solução com as amostras;
- Dispositivo capaz de manter a temperatura a $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;
- Agitador magnético e barra magnética cilíndrica (“peixinho”);
- Água destilada;
- Estufa capaz de manter $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- Peneiras segundo a Tabela 3.7, inclusive tampa e fundo, de acordo com a norma DNIT 412 – ME e que podem ser levadas em estufa;

Tabela 3.7 - Abertura das peneiras utilizadas.

Peneiras de Malha Quadrada	
ASTM	Abertura (mm)
Valores superiores com incrementos de ½”	Valores superiores com incrementos de 12,5 mm
2 ½”	63 mm
2”	50 mm
1 ½”	37,5 mm
1 ¼”	31,5 mm
1”	25 mm
¾”	19 mm
5/8”	16 mm
½”	12,5 mm
3/8”	9,5 mm
5/16”	8 mm

Nº4	4,75 mm
Nº5	4 mm
Nº8	2,36 mm
Nº16	1,18mm
Nº30	0,6 mm
Nº50	0,3 mm
Nº100	0,15 mm

Fonte: Norma DNIT 446/2024-ME.

- A solução de sulfato de magnésio foi preparada conforme a Tabela 3.8, com concentrações específicas para o composto de magnésio. Durante a adição do sulfato de magnésio, foi feita a dissolução com adições graduais em água a 35 °C. No uso, as soluções foram novamente agitadas. A solução de cloreto de bário foi usada ao final da ciclagem para verificação da presença de sulfatos na limpeza das amostras.

Tabela 3.8 - Soluções que podem ser usadas no ensaio e suas concentrações.

Solução	Concentração
Sulfato de Sódio (NaSO ₄)	350 g/L
Sulfato de Sódio decahidratado (Na ₂ SO ₄ .10 H ₂ O)	750 g/L
Sulfato de Magnésio (MgSO ₄)	350 g/L
Sulfato de Magnésio heptahidratado (MgSO ₄ .7H ₂ O)	1400 g/L
Cloreto de Bário	50 g/L

Fonte: Norma DNIT 446/2024-ME.

3.4.6.2 Amostragem

As amostras foram compostas conforme as frações e subfrações indicadas na Tabela 3.9. Caso alguma subfração estivesse presente em quantidade inferior a 5% em massa da amostra total de agregado graúdo, ela não foi considerada na composição da fração principal. Se ambas as subfrações apresentaram percentuais inferiores a 5%, a fração não foi ensaiada. Nos casos em que uma das subfrações que compunham a fração principal apresentasse percentual inferior a 5% em massa, essa massa foi deduzida da fração total, considerando-se para o ensaio apenas a subfração com percentual superior a 5%. A preparação da amostra

exigiu lavagem e secagem em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até constância de massa. As subfrações foram separadas por peneiramento, obtendo-se as quantidades descritas na Tabela 3.10, e então foram compostas as frações totais conforme o mesmo item. As massas das amostras e os percentuais em massa das frações foram registrados, e, para frações com diâmetros superiores a 19 mm, registrou-se o número de partículas.

Tabela 3.9 - Frações de subfrações consideradas para o agregado graúdo.

Abertura das peneiras	Massa (g)
a) 100mm a 90mm	7000 ± 1000
b) 90 mm a 75 mm	7000 ± 1000
c) 75 mm a 63 mm	7000 ± 1000
d) 63 mm a 37,5 mm consistindo de:	5000 ± 300
Material entre 63 mm e 50 mm	3000 ± 300
Material entre 50 mm e 37,5 mm	2000 ± 200
e) 37,5 mm a 19 mm consistindo de:	1500 ± 50
Material entre 37,5 mm e 25 mm	1000 ± 50
Material entre 25 mm e 19 mm	500 ± 30
f) 19,5 mm a 9,5 mm consistindo de:	1000 ± 10
Material entre 19,5 mm e 12,5 mm	670 ± 10
Material entre 12,5 mm e 9,5 mm	300 ± 5
g) 9,5 mm a 4,75 mm	300 ± 5

Fonte: Norma DNIT 446/2024-ME.

Tabela 3.10 - Frações de subfrações ensaiadas para o agregado graúdo.

Brita 1				
	Passante	Retido	% Retida	Massa (g)
Fração 5	25 mm	19 mm	6,26	500 ± 30
Fração 6	19 mm	12,5 mm	53,67	670 ± 10
	12,5 mm	9,5 mm	30,04	330 ± 5
Fração 7	9,5 mm	4,8 mm	0,43	-
Brita 0				
Fração 6	19 mm	12,5 mm	-	-
	12,5 mm	9,5 mm	5,39	330 ± 5
Fração 7	9,5 mm	4,8 mm	26,23	330 ± 5

Fonte: Autora, 2025.

3.4.6.3 Procedimento experimental

Após serem pesadas, as amostras foram imersas em solução de sulfato de magnésio por 16 horas, com o nível da solução mantido a 1 cm acima da amostra. O recipiente contendo a amostra foi coberto para reduzir a evaporação e evitar contaminação. Após esse período, a amostra foi retirada, drenada por 15 min ± 5 min e, em seguida, colocada em estufa a 110 °C ± 5 °C até atingir massa constante. Considerou-se massa constante quando a variação foi inferior a 0,1% da amostra total. O tempo necessário para isso não foi fixo, devendo ser determinado por pesagens diretas (sem resfriamento) em intervalos de 2 horas. Após a secagem, a amostra foi resfriada até temperatura ambiente entre 20 °C e 25 °C. Depois do resfriamento, as amostras foram novamente submersas na solução de sulfato. Foi importante verificar se havia grumos de sal no fundo do recipiente; se houvesse, mexia-se para dissolver. O processo de imersão e secagem alternadas constituiu um ciclo, e foram realizados cinco ciclos no total. Após o último ciclo, as amostras foram lavadas em água corrente e quente (43 °C ± 6 °C). Durante essa lavagem, a presença de sulfatos pôde ser verificada com a adição de 10 ml de solução de cloreto de bário (50 g/L) à água lavada; se houvesse turbidez, ainda havia sulfato presente.

- **Análise quantitativa**

Após a lavagem para remoção de sulfatos, as frações foram aquecidas em estufa a 110 °C ± 5 °C até atingirem constância de massa. Cada fração do agregado miúdo foi peneirada nas mesmas peneiras em que foi originalmente retida. No caso do agregado graúdo, o

peneiramento foi realizado manualmente, apenas o suficiente para garantir a passagem do material desagregado pela peneira, sem manipulação que provocasse a quebra de partículas ou forçasse sua passagem. Foram determinadas e registradas as massas retidas em cada peneira para cada fração. A diferença entre a massa retida e a massa inicial da fração representou a perda após o ensaio, que foi expressa como percentual da massa inicial da fração.

- **Análise qualitativa**

Para partículas com diâmetros superiores a 19 mm, separaram-se as partículas de cada fração conforme os tipos de danos observados após o ensaio, como desintegração, fendilhamento, esmagamento, quebra, laminagem, entre outros, e registrou-se o número de partículas que apresentou cada tipo de dano. Embora a análise tenha sido limitada às partículas com tamanhos superiores a 19 mm, recomendou-se também o exame das partículas de menor diâmetro para verificar evidências de desintegração excessiva, sendo que os diferentes tipos de danos foram classificados conforme descrito nesta seção.

3.4.6.4 Cálculos de percentual de perda

Foram registradas as massas de cada fração para cada tipo de agregado antes do ensaio. O percentual de perda foi calculado pela Equação 12, onde m_i representa a massa inicial da amostra da fração e m_f representa a massa de material retida nas peneiras após o ensaio, ambas expressas em gramas. Os resultados do ensaio de durabilidade foram apresentados acompanhados dos percentuais em massa de cada fração obtidos na análise inicial. A média ponderada das perdas foi calculada com base no percentual em massa das frações obtido na avaliação granulométrica. Adotou-se o procedimento padrão para avaliação e cálculo da durabilidade das duas parcelas, exceto nos casos em que o agregado tinha menos de 10% passante na peneira de 4,75 mm, quando o ensaio não foi feito para a parcela miúda, sendo adotado como perda o valor da fração graúda mais próxima da peneira N° 4 com resultado de ensaio. Para o cálculo das médias ponderadas, nas frações com percentuais em massa inferiores a 5%, considerou-se como perda a média das frações imediatamente superior e inferior. Caso uma dessas não existisse, utilizou-se o valor da fração imediatamente superior ou inferior que possuísse resultado. A média ponderada foi expressa pelo inteiro mais próximo. Para partículas com diâmetros superiores a 19 mm, antes do ensaio, registrou-se o número de partículas em cada fração, classificaram-se os efeitos do ensaio conforme os danos descritos na seção de análise qualitativa e especificou-se o tipo de solução empregada, informando-se se foi preparada ou reutilizada. Ressaltou-se que os resultados podiam variar

conforme o sal utilizado, devendo essa diferença ser considerada nas especificações que utilizavam os referidos resultados.

$$\%Perda = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \text{ (equação 12)}$$

3.4.7 Adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Este ensaio é fundamentado pela norma DNIT 452/2024-ME e tem como objetivo estabelecer a metodologia que define o procedimento utilizado para verificar a adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

3.4.7.1 Aparelhagem

- Balança com capacidade de 6,5 kg, sensível a 0,1 g;
- Béquero de vidro resistente ao calor, com capacidade de 500 ml (duas unidades);
- Espátula de aço inoxidável, com lâmina de aproximadamente 20 cm de comprimento;
- Estufa capaz de manter a temperatura de 40 °C, 60 °C, 100 °C e 120 °C;
- Fogão ou outra fonte de calor;
- Peneira 3/4” (19 mm) e 1/2” (12,5mm), inclusive tampa e fundo, de acordo com a série de peneiras apresentadas na norma DNIT 453 – EM;
- Placa de vidro ou bandeja metálica com superfície lisa para espalhamento do agregado;
- Termômetro graduado em 1 °C, de 0 °C a 200 °C.

3.4.7.2 Amostragem

A amostra de agregados a ser utilizada no ensaio foi preparada conforme as normas DNER – PRO 120/97 e DNER – PRO 199/96. A amostra total correspondeu a 2000 g de agregado passante na peneira 3/4” (19,0 mm) e retido na 1/2” (12,5 mm), conforme a norma DNIT 412 – ME, sendo dividida em quatro amostras de 500 g cada, obtidas por repartidor de amostras. Cada amostra foi lavada e transferida para um béquer de vidro resistente ao calor, que foi preenchido com água destilada até cobrir a amostra e mantido em repouso por um minuto. Após esse período, a água foi retirada e o béquer com a amostra foi levado à estufa a 120 °C por duas horas. O processo foi realizado simultaneamente com as quatro amostras.

3.4.7.3 Procedimento experimental

Foram preparadas quatro amostras para o ensaio, sendo que, em duas delas, foi adicionado um aditivo melhorador de adesividade na proporção de 0,10% em relação à massa

do ligante asfáltico, enquanto nas outras duas utilizou-se apenas o ligante puro (Figura 3.13). A temperatura de aquecimento recomendada foi de 120 °C para o ligante e 100 °C para as amostras de agregados. Para a execução do ensaio, adicionou-se 17,5 g de ligante asfáltico sobre cada amostra de agregados. O procedimento consistiu em adicionar essa quantidade de ligante, com o uso de uma espátula de aço, sobre a amostra previamente aquecida conforme as temperaturas indicadas.

Figura 3.13 - Agregados submersos.



Fonte: Autora, 2025.

3.4.7.4 Análise da adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O resultado da adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) deve ser apresentado como satisfatório, quando não houver nenhum deslocamento da película de ligante da amostra do agregado após 72 horas em estufa, ou como não satisfatório, quando houver deslocamento total ou parcial da película de ligante após esse período.

3.5 Método de cálculo de estabilização granulométrica

A estabilização granulométrica foi realizada por meio da combinação de dois ou mais tipos de agregados, com o objetivo de obter uma curva granulométrica adequada às faixas especificadas para o concreto asfáltico, garantindo uma mistura bem graduada, capaz de proporcionar boas condições de compactação, estabilidade e durabilidade ao pavimento.

Conforme descrito por Gomes (2008), a mistura de agregados foi elaborada de forma que a composição granulométrica resultante dependesse diretamente das granulometrias

individuais de cada material e das proporções em que foram combinados. A determinação da porcentagem retida acumulada da mistura em cada peneira foi obtida pela seguinte expressão:

$$M_{\#i} = aA_{\#i} + bB_{\#i} + \dots + fF_{\#i} \text{ (equação 13)}$$

em que $M_{\#i}$ representa a porcentagem retida acumulada da mistura na peneira i , $A_{\#i}$, $B_{\#i}$ e $F_{\#i}$ correspondem às porcentagens retidas acumuladas dos agregados A, B e F, respectivamente, na peneira i , enquanto a , b e f indicam as proporções em massa de cada agregado na mistura.

Com base nessa relação, foi possível determinar a proporção ideal entre os agregados de diferentes faixas granulométricas, de modo que a curva resultante se enquadra nos limites estabelecidos pela norma DNIT 031/2024 – ES, aplicável ao tipo de mistura asfáltica estudada. Após a definição das proporções mais adequadas, elaborou-se a curva granulométrica teórica da mistura, a qual serviu de referência para a comparação com os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de caracterização.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados neste capítulo de acordo com os objetivos específicos propostos neste estudo, assim como o fluxograma que consta no capítulo referente à Metodologia.

4.1 Caracterização física e tecnológica dos agregados e verificação da viabilidade técnica do uso em concretos asfálticos a quente.

4.1.1 Granulometria

O ensaio de análise granulométrica foi realizado conforme o procedimento estabelecido na DNIT 412/2025 – ME, com o objetivo de determinar a distribuição do tamanho das partículas constituintes dos agregados graúdos utilizados neste estudo. A caracterização granulométrica é essencial para avaliar a adequação do material às faixas especificadas pela DNIT 031/2024 – ES, que define os limites granulométricos para os agregados empregados na confecção de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ).

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados obtidos para as amostras de Brita 0 e Brita 1, respectivamente, com suas correspondentes curvas granulométricas representadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Análise granulométrica da Brita 0.

Peneira	Abertura (mm)	Quantidade retida (g)	Quantidade retida acumulada (g)	% retida acumulada	% passante
½"	12,5	0,00	0,00	0,00	100
¾"	9,5	53,90	53,90	5,39	94,61
¼"	6,3	561,10	615,00	61,50	38,50
Nº 4	4,8	262,30	877,30	87,73	12,27
Nº 8	2,36	115,40	992,70	99,27	0,73
Nº 10	2	4,00	996,70	99,67	0,33
Nº 16	1,18	1,80	998,50	99,85	0,15
Nº 30	0,6	0	998,50	99,85	0,15

Fonte: Autora, 2025

A análise da Tabela 4.1 revela que a Brita 0 apresentou uma distribuição predominante de partículas entre as peneiras de 9,5 mm e 2,36 mm, com 61,50% de material retido cumulativamente até a peneira de 6,3 mm e 87,73% até a peneira de 4,8 mm. Observa-se ainda que apenas 0,73% do material passou na peneira de 2,36 mm, indicando que

praticamente toda a amostra se enquadra como agregado graúdo, conforme classificação estabelecida pelas normas de pavimentação, como a DNIT 031/2024 – ES. Esses resultados mostram uma graduação contínua e bem distribuída, condição que, segundo Bernucci et al. (2008), favorece o adequado empacotamento dos grãos e contribui para a formulação de misturas com reduzido volume de vazios.

Figura 4.1 - Curva granulométrica da Brita 0.

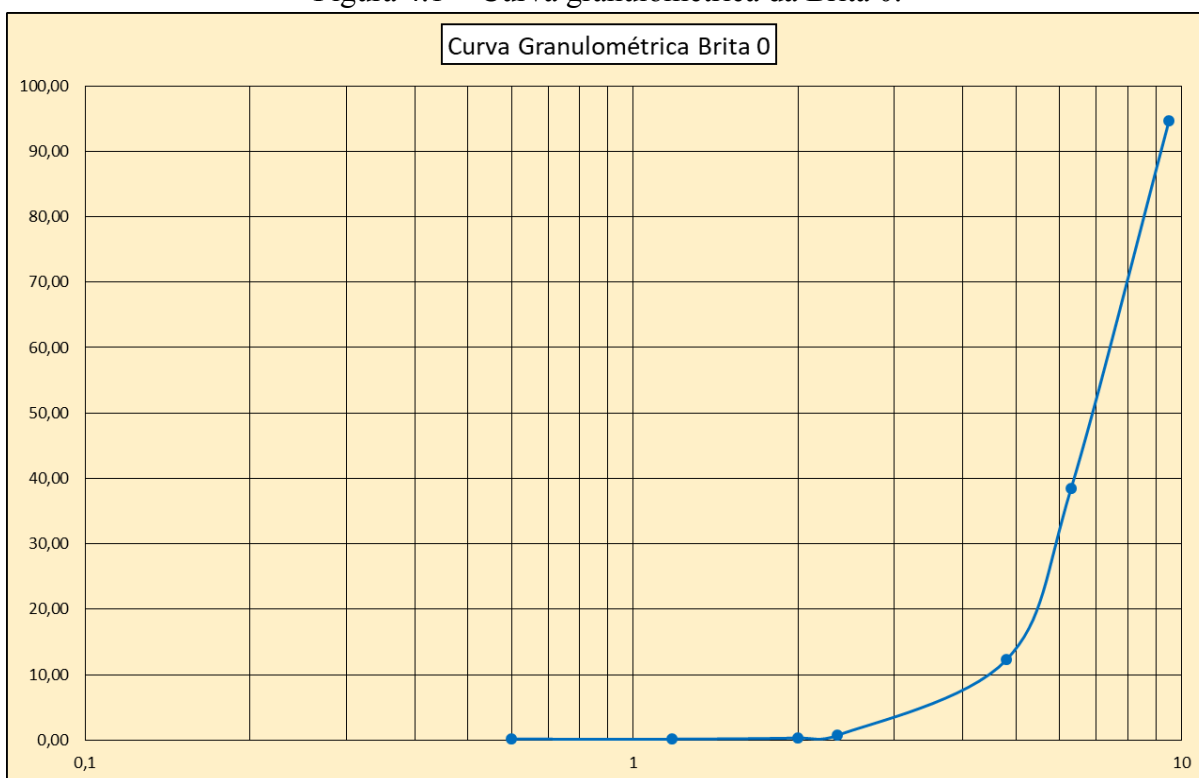


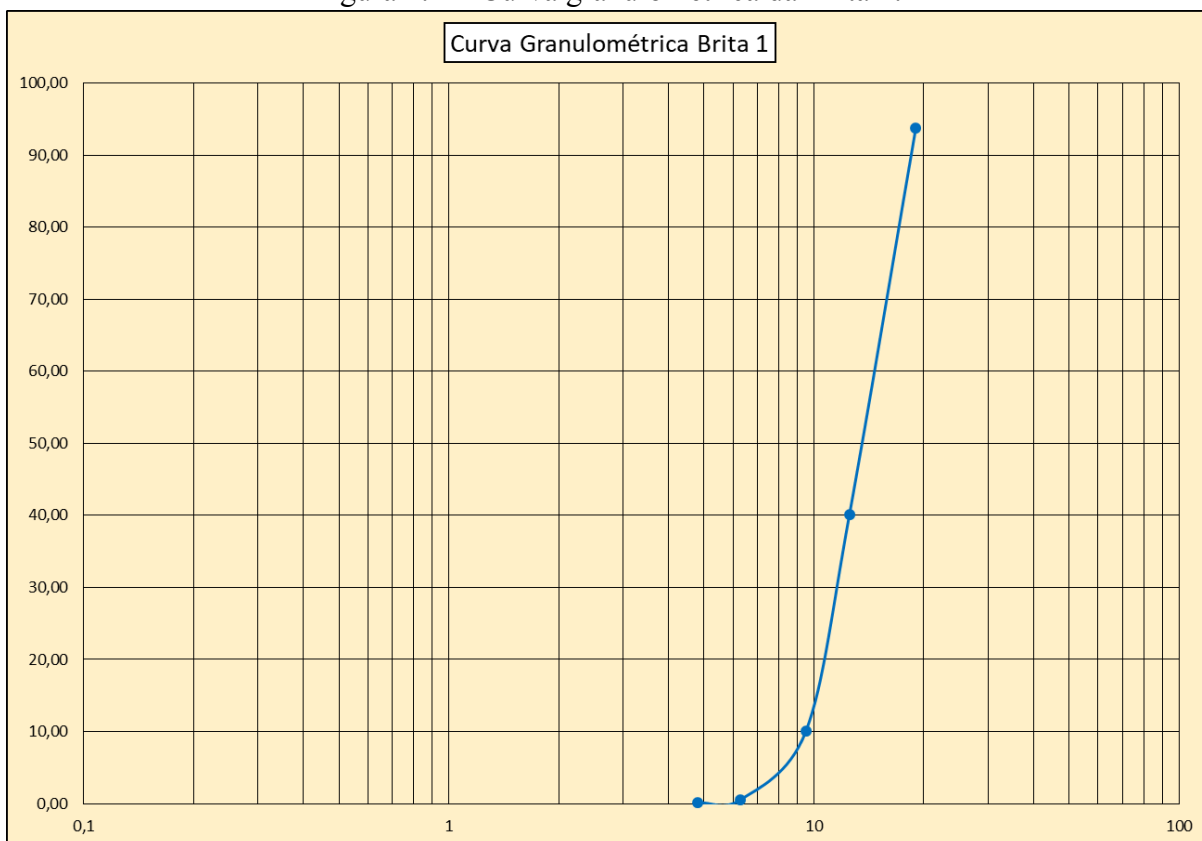
Tabela 4.2 - Análise granulométrica da Brita 1.

Peneira	Abertura (mm)	Quantidade retida (g)	Quantidade retida acumulada (g)	% retida acumulada	% passante
1"	25	0,00	0,00	0,00	100
3/4"	19	62,60	62,60	6,26	93,74
1/2"	12,5	536,70	599,30	59,93	40,07
3/8"	9,5	300,40	899,70	89,97	10,03
1/4"	6,3	94,60	994,30	99,43	0,57
Nº 4	4,8	4,30	998,60	99,86	0,14

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 4.2 referente à Brita 1 demonstra uma predominância de partículas mais graúdas, com 59,93% de material retido cumulativamente até a peneira de 12,5 mm e 89,97% até a peneira de 9,5 mm, enquanto apenas 0,57% passou pela peneira de 6,3 mm. Esses resultados são reforçados pela curva granulométrica apresentada na Figura 4.2 e confirmam que a amostra se caracteriza essencialmente como agregado graúdo, conforme os limites estabelecidos pela DNIT 031/2024 – ES para classificação e aplicação de materiais pétreos em misturas asfálticas. De acordo com Bernucci et al. (2008), agregados com essa distribuição granulométrica são essenciais para a formação do esqueleto mineral responsável por conferir estabilidade e resistência às misturas densas utilizadas em camadas estruturais.

Figura 4.2 - Curva granulométrica da Brita 1.



Fonte: Autora, 2025.

A curva granulométrica representada na Figura 4.2 reforça o comportamento observado na Tabela 4.2, evidenciando uma concentração significativa de partículas em maiores diâmetros e uma rápida redução do percentual passante à medida que o diâmetro das peneiras diminui. Esse padrão gráfico é característico de graduações destinadas a misturas com maior capacidade de suporte, nas quais o intertravamento entre os agregados graúdos desempenha papel fundamental para resistir às solicitações de tráfego. Conforme discutido na literatura (Bernucci et al., 2008) curvas com esse formato tendem a resultar em misturas mais estáveis e com menor suscetibilidade à deformação permanente, reforçando a adequação da Brita 1 para compor as porções superiores da granulometria.

A Tabela 4.3 apresenta os limites granulométricos definidos pela DNIT 031/2024 – ES para as Faixas B e C, que são comumente utilizadas em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ. A predominância de partículas graúdas observada na Brita 1 se alinha diretamente às exigências dessas faixas, especialmente nas porções superiores da distribuição, que requerem agregados de maior diâmetro para garantir a formação de um esqueleto mineral robusto. Segundo a norma e conforme reforçado pela literatura técnica (Bernucci et al., 2008; DNIT, 2024), o atendimento a essas faixas é fundamental para assegurar a trabalhabilidade,

estabilidade e desempenho mecânico da mistura, motivo pelo qual a Brita 1 se mostra adequada para compor essas graduações normatizadas.

Tabela 4.3 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico - Adaptado.

Peneiras		% passante, em massa	
ASTM	Abertura (mm)	B - 19	C - 12,5
1"	25,4	100	-
¾"	19,1	90 - 100	100
½"	12,7	70 - 89	90 - 100
⅜"	9,5	55 - 82	73 - 89
¼"	6,3	42 - 70	53 - 78
Nº 4	4,8	35 - 63	44 - 72
Nº 8	2,36	23 - 49	28 - 58
Nº 16	1,18	16 - 37	17 - 45
Nº 30	0,60	10 - 28	11 - 35

Fonte: Norma DNIT 031/2024 - ES, adaptado.

Comparando as curvas granulométricas obtidas com os limites normativos, constata-se que tanto a Brita 0 quanto a Brita 1 apresentam curvas suaves e dentro dos limites estabelecidos pela norma, sem descontinuidades significativas entre as frações. Essa condição é desejável, pois contribui para a melhor acomodação das partículas, favorecendo o intertravamento e a estabilidade da mistura asfáltica (Bernucci et al, 2008).

De forma geral, os resultados obtidos indicam que as amostras analisadas apresentam adequada distribuição granulométrica para utilização em misturas do tipo CAUQ, podendo ser empregadas em conjunto para compor a faixa granulométrica ideal conforme os parâmetros da DNIT 031/2024 – ES.

4.1.2 Densidade individual e Absorção de água

Para a determinação dos valores de densidade relativa, massa específica e porcentagem de absorção de água, foram aplicadas as expressões descritas na metodologia, utilizando-se as massas obtidas em cada etapa do ensaio. A seguir, são apresentados os respectivos cálculos realizados para o material analisado.

- Densidade relativa real

$$\text{Brita 0: } G_{sa0} = \frac{A}{A-C} \Rightarrow G_{sa0} = \frac{1531,7g}{1531,7g-952,8g} \Rightarrow G_{sa0} = 2,65$$

$$\text{Brita 1: } G_{sa1} = \frac{A}{A-C} \Rightarrow G_{sa1} = \frac{2998,5g}{2998,5g-1867,7g} \Rightarrow G_{sa1} = 2,65$$

- Densidade relativa aparente

$$\text{Brita 0: } G_{sb0} = \frac{A}{B-C} \Rightarrow G_{sb0} = \frac{1531,7g}{1534,4g-952,8g} \Rightarrow G_{sb0} = 2,63$$

$$\text{Brita 1: } G_{sb1} = \frac{A}{B-C} \Rightarrow G_{sb1} = \frac{2998,5g}{3004,8g-1867,7g} \Rightarrow G_{sb1} = 2,64$$

- Massa específica real

$$\text{Brita 0: } ME_{sa0} = 0,9971 \frac{A}{A-C} \Rightarrow ME_{sa0} = 0,9971 \frac{1531,7g}{1531,7g-952,8g} \Rightarrow ME_{sa0} = 2,64g/cm^3$$

$$\text{Brita 1: } ME_{sa1} = 0,9971 \frac{A}{A-C} \Rightarrow ME_{sa1} = 0,9971 \frac{2998,5g}{2998,5g-1867,7g} \Rightarrow ME_{sa1} = 2,64g/cm^3$$

- Massa específica aparente

$$\text{Brita 0: } ME_{sb0} = 0,9971 \frac{A}{B-C} \Rightarrow ME_{sb0} = 0,9971 \frac{1531,7g}{1534,4g-952,8g} \Rightarrow ME_{sb0} = 2,62g/cm^3$$

$$\text{Brita 1: } ME_{sb1} = 0,9971 \frac{A}{B-C} \Rightarrow ME_{sb1} = 0,9971 \frac{2998,5g}{3004,8g-1867,7g} \Rightarrow ME_{sb1} = 2,63g/cm^3$$

- Porcentagem de absorção de água

$$\begin{aligned} \text{Brita 0: } \text{Absorção}(\%)_{b0} &= \frac{B-A}{A} \times 100 \Rightarrow \text{Absorção}(\%)_{b0} = \frac{1534,4g-1531,7g}{1531,7g} \times 100 \\ &\Rightarrow \text{Absorção}(\%)_{b0} = 0,18\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Brita 1: } \text{Absorção}(\%)_{b1} &= \frac{B-A}{A} \times 100 \Rightarrow \text{Absorção}(\%)_{b1} = \frac{3004,8g-2998,5g}{2998,5g} \times 100 \\ &\Rightarrow \text{Absorção}(\%)_{b1} = 0,21\% \end{aligned}$$

Tabela 4.4 - Resultados de densidade e absorção dos agregados graúdos.

Material	Densidade relativa real (Gsa)	Densidade relativa aparente (Gsb)	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Brita 0	2,65	2,63	2,64	2,62	0,18
Brita 1	2,65	2,64	2,64	2,63	0,21

Fonte: Autora, 2025

Observa-se que as densidades relativas reais das britas 0 e 1 foram de 2,65 g/cm³, enquanto as densidades relativas aparentes variaram entre 2,63 e 2,64 g/cm³. Esses valores são típicos de agregados de origem granítica ou basáltica, indicando materiais de boa qualidade e baixa porosidade interna (Das, 2019). As massas específicas reais também apresentaram

valores próximos de $2,64 \text{ g/cm}^3$, com pequena variação entre as amostras, o que reforça a homogeneidade mineralógica dos materiais analisados.

A absorção de água apresentou valores de 0,18% para a Brita 0 e 0,21% para a Brita 1. De acordo com a DNIT 031/2024 – ES, valores de absorção inferiores a 2,0% são desejáveis, pois indicam baixa absorção de ligante asfáltico e melhor adesividade entre agregado e ligante. Dessa forma, ambos os materiais analisados atendem plenamente aos requisitos normativos, podendo ser classificados como agregados de boa qualidade para emprego em misturas asfálticas.

No entanto, é importante destacar que agregados de outras origens podem apresentar comportamentos distintos. Agregados calcários, por exemplo, tendem a apresentar densidades ligeiramente menores e maiores valores de absorção devido à maior porosidade típica desse tipo de rocha. Embora possuam boa adesividade ao ligante asfáltico, seu desempenho mecânico pode ser inferior ao de agregados basálticos ou graníticos, especialmente em relação à resistência ao desgaste e à estabilidade sob carga repetida (IBP, 2021). Ainda assim, em algumas regiões do país, agregados calcários são amplamente empregados, desde que sejam realizados ajustes no teor de ligante ou selecionadas granulometrias que compensem essa porosidade adicional.

Por outro lado, agregados provenientes de resíduos da construção e demolição (RCD) tendem a apresentar maior variabilidade física e mineralógica, o que influencia diretamente suas propriedades fundamentais, como densidade, absorção e resistência. Estudos indicam que esses materiais geralmente possuem porosidade elevada e absorção significativamente superior à de agregados naturais, o que aumenta a demanda de ligante e pode comprometer a durabilidade da mistura (IBP, 2021). Apesar disso, seu uso pode ser tecnicamente viável em camadas de base ou em misturas asfálticas recicladas a frio, principalmente quando há controle rigoroso do processamento do RCD e estabilização das frações utilizadas.

Dessa forma, os resultados obtidos para os agregados estudados, com densidades elevadas e baixas absorções, evidenciam um comportamento mais favorável quando comparado a materiais calcários ou provenientes de RCD. Esses fatores contribuem para maior estabilidade volumétrica, menor consumo de ligante e melhor durabilidade, reforçando a adequação das britas analisadas para emprego em misturas asfálticas de desempenho satisfatório.

4.1.3 Índice de forma e Partículas chatas e alongadas

O ensaio de índice de forma foi realizado conforme o procedimento descrito na DNIT 416/2021 – ME, que estabelece a metodologia para determinação da relação entre o comprimento e a espessura das partículas de agregado graúdo. O objetivo desse ensaio é avaliar a predominância de partículas lamelares, alongadas ou cúbicas, visto que o formato das partículas exerce influência direta sobre o empacotamento, a trabalhabilidade e o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Ressalta-se que o ensaio foi realizado exclusivamente para a amostra de Brita 1, uma vez que a Brita 0 apresentou grande parte de seus grãos passantes na peneira de 9,5 mm, o que significa que para este material não obteve-se amostra representativa. Dessa forma, optou-se por realizar a análise apenas na Brita 1, representativa para avaliação do índice de forma.

Foram analisadas as frações de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, totalizando 201 partículas medidas. Os cálculos apresentam o número de partículas avaliadas em cada fração.

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i$$

$$\text{Para a fração de 19 mm: } N_i = \frac{200}{91,23} \times 9,53 = 21 \text{ partículas}$$

$$\text{Para a fração de 12,5 mm: } N_i = \frac{200}{91,23} \times 56,10 = 123 \text{ partículas}$$

$$\text{Para a fração de 9,5 mm: } N_i = \frac{200}{91,23} \times 25,60 = 57 \text{ partículas}$$

Com base nas medições de comprimento e espessura das partículas, obteve-se um índice de forma médio (I) igual a 1,48, calculado a partir da relação entre o comprimento médio e a espessura média das partículas.

$$I = \frac{c_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}} \Rightarrow I = \frac{2,45}{1,65} \Rightarrow 1,48$$

De acordo com a DNIT 031/2024 – ES, o índice de forma deve ser superior a 0,5 e inferior a 2,0 para que o agregado seja considerado adequado ao uso em concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). Assim, o valor obtido indica predominância de partículas com forma cúbica e sub-alongada, condição favorável à compactação e ao intertravamento entre as partículas na mistura, conforme ilustrado na Figura 4.3(a), que apresenta partículas de formato cúbico, e na Figura 4.3(b), que mostra partículas de formato sub-alongado.

Figura 4.3 - Formas das Partículas: a) Partícula de formato cúbico; b) Partícula de formato sub-alongado.



Fonte: Autora, 2025.

Segundo Bernucci et al. (2008), partículas de formato cúbico apresentam melhor empacotamento e distribuição de tensões, resultando em misturas asfálticas com maior estabilidade e resistência ao deslocamento. Por outro lado, partículas lamelares e alongadas tendem a se orientar durante a compactação, formando descontinuidades internas que reduzem a resistência mecânica do revestimento asfáltico.

Dessa forma, ao apresentar um índice de forma médio de 1,48, a Brita 1 demonstra características geométricas adequadas e coerentes com o comportamento desejado para agregados empregados em pavimentação, atendendo plenamente às exigências da DNIT 031/2024 – ES e às recomendações da literatura técnica.

4.1.4 Partículas fraturadas

O ensaio de partículas fraturadas foi conduzido conforme as diretrizes da DNIT 416/2021 – ME, que estabelece o procedimento para determinação da porcentagem de partículas com faces fraturadas em agregados graúdos. O objetivo do ensaio é avaliar a proporção de partículas com superfícies resultantes de fratura mecânica, uma característica fundamental para o desempenho das misturas asfálticas, uma vez que aumenta a aderência entre o agregado e o ligante betuminoso e melhora a estabilidade volumétrica da mistura.

$$\text{Brita 0: } P_0 = \frac{F}{F+N} \times 100 \Rightarrow P_0 = \frac{185,80g}{191,00g} \times 100 \Rightarrow P_0 = 97,28\%$$

$$\text{Brita 1: } P_1 = \frac{F}{F+N} \times 100 \Rightarrow P_1 = \frac{1347,20g}{1489,00g} \times 100 \Rightarrow P_1 = 90,48\%$$

Observa-se que a Brita 0 apresentou 97,28% de partículas fraturadas, enquanto a Brita 1 apresentou 90,48%, ambos os valores acima do limite mínimo exigido pela DNIT 031/2024

– ES, que recomenda no mínimo 90% de partículas com uma ou mais faces fraturadas para agregados graúdos destinados à produção de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ).

A Figura abaixo ilustra a diferença entre partículas fraturadas e não fraturadas. Na Figura 4.4 (a), observam-se as partículas fraturadas, cuja principal característica é a presença de quinas, evidenciando que passaram por um processo de desintegração da rocha-mãe por meio de ação mecânica. Já a Figura 4.4 (b) apresenta as partículas não fraturadas, nas quais é possível identificar o arredondamento de algumas faces, indicando que essas partículas não sofreram fraturamento.

Figura 4.4 - Partículas fraturadas e partículas não fraturadas: a) Partículas fraturadas; b) Partículas não fraturadas.



Fonte: Autora, 2025.

Os resultados indicam que os agregados avaliados possuem alto grau de angularidade e textura superficial rugosa, características que favorecem a aderência entre o ligante e o agregado, promovendo melhor intertravamento e resistência ao escorregamento na mistura.

Conforme salientado por Bernucci et al. (2008), agregados com maior quantidade de faces fraturadas contribuem significativamente para o aumento da resistência ao cisalhamento e à deformação permanente, além de reduzirem a suscetibilidade ao deslocamento sob o tráfego. Assim, tanto a Brita 0 quanto a Brita 1 apresentam características adequadas para aplicação em camadas de revestimento asfáltico, atendendo plenamente aos requisitos de qualidade e desempenho exigidos pela norma.

4.1.5 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado conforme o procedimento descrito na DNIT 451/2024 – ME, com o objetivo de determinar a resistência ao desgaste por abrasão e impacto dos agregados graúdos utilizados na pesquisa. O ensaio consiste na submissão de

uma amostra padronizada de agregado a um tambor giratório, juntamente com esferas de aço, durante um número predefinido de rotações. Após o término do ensaio, determina-se a porcentagem de desgaste do material por meio da perda de massa, expressa pelo valor A (%).

Os ensaios foram realizados para as duas graduações de agregados estudadas: Graduação C (Brita 0) e Graduação B (Brita 1). Os cálculos foram realizados conforme as expressões apresentadas na metodologia, obtendo-se os seguintes resultados:

$$\text{Brita 0: } A_c = \frac{m_c - m'_c}{m_c} \times 100 \Rightarrow A_c = \frac{5.013,2g - 2.746,4g}{5.013,2g} \times 100 \Rightarrow A_c = 45,22\%$$

$$\text{Brita 1: } A_b = \frac{m_b - m'_b}{m_b} \times 100 \Rightarrow A_b = \frac{5.013,8g - 2.990,7g}{5.013,8g} \times 100 \Rightarrow A_b = 40,35\%$$

Observa-se que os valores de desgaste foram de 45,22% para a Brita 0 (Graduação C) e 40,35% para a Brita 1 (Graduação B). De acordo com os critérios estabelecidos pela DNIT 031/2024 – ES, os agregados graúdos destinados à produção de concreto asfáltico usinado a quente devem apresentar desgaste inferior a 50%. Assim, verifica-se que ambos os materiais atendem ao limite normativo, podendo ser considerados adequados quanto à resistência ao desgaste mecânico.

Comparando-se os resultados obtidos, nota-se que a Brita 1 apresentou menor percentual de desgaste em relação à Brita 0, indicando maior resistência à abrasão e ao impacto. Essa diferença pode estar associada à maior granulometria e à forma mais cúbica das partículas da Brita 1, características que contribuem para uma menor fragmentação durante o ensaio.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que os agregados analisados apresentam resistência mecânica que atende aos requisitos estabelecidos para emprego em misturas asfálticas usinadas a quente, o que garante maior durabilidade e estabilidade às camadas executadas com esses materiais.

4.1.6 Durabilidade - Resistência dos agregados à desintegração quando submetidos à ação de agentes físicos

O ensaio de durabilidade teve como objetivo avaliar a resistência dos agregados à desintegração quando submetidos à ação de agentes físicos, representando a capacidade do material de manter suas propriedades ao longo do tempo em condições ambientais adversas.

Para a avaliação da durabilidade dos agregados, foram realizados os cálculos de perda de massa individual para cada fração das amostras de Brita 0 e Brita 1, conforme demonstrado a seguir:

$$\text{Brita 1 Fração 5: } \%Perda = \frac{500,5g - 499,3g}{500,5g} \times 100 \Rightarrow \%Perda = 0,24\%$$

$$\text{Brita 1 Fração 6: } \%Perda = \frac{(676,3g+330,0g) - (659,8g+323,7g)}{(676,3g+330,0g)} \times 100 \Rightarrow \%Perda = 2,27\%$$

$$\text{Brita 0 Fração 6: } \%Perda = \frac{340,0g - 277,3g}{340,0g} \times 100 \Rightarrow \%Perda = 18,44\%$$

$$\text{Brita 0 Fração 7: } \%Perda = \frac{336,0g - 327,8g}{336,0g} \times 100 \Rightarrow \%Perda = 2,44\%$$

Para a Brita 1, obteve-se perda de 0,24% na fração 5 (25 mm – 19 mm) e de 2,27% na fração 6 (19 mm – 12,5 mm). Já para a Brita 0, as perdas observadas foram de 18,44% na fração 6 (12,5 mm – 9,5 mm) e 2,44% na fração 7 (9,5 mm – 4,8 mm). Esses valores representam a diferença percentual entre as massas antes e após o ensaio, indicando a resistência das partículas à fragmentação ou desintegração.

A Tabela 4.5 apresenta a síntese dos resultados obtidos, incluindo as massas iniciais das frações, os percentuais em massa e as perdas médias ponderadas.

Tabela 4.5 - Cálculo dos percentuais de perda para as frações.

Brita 1						
	Passante	Retido	Massa das frações antes do ensaio (g)	Percentual em massa (%)	Percentual de Perda após o Ensaio (%)	Média Ponderada da Perda
Fração 5	25 mm	19 mm	500,5	33,22	0,24	0,08
Fração 6	19 mm	12,5 mm	676,3	66,78	2,27	1,5
	12,5 mm	9,5 mm	330,0			
Amostra Total			1.506,8	100	Perda (%)	1,6
Brita 0						
Fração 6	12,5 mm	9,5 mm	340,0	50,30	18,44	2,3
Fração 7	9,5 mm	4,8 mm	336,0	49,70	2,44	1,2
Amostra Total			676,0	100	Perda (%)	3,5

Fonte: Autora, 2025.

Verifica-se que a Brita 1 apresentou uma perda total de 1,6%, enquanto a Brita 0 apresentou 3,5%. Esses valores evidenciam que ambos os materiais possuem boa resistência à ação de agentes degradantes, sendo a Brita 1 mais durável. Os resultados indicam que as amostras atendem aos requisitos de qualidade esperados para agregados empregados em

misturas asfálticas, conforme critérios estabelecidos por normas do DNIT, demonstrando adequada durabilidade para uso em revestimentos asfálticos.

Adicionalmente à análise do percentual de perda de massa do agregado graúdo, foi realizada a avaliação dos danos ocasionados às partículas com diâmetros superiores a 19 mm após o ensaio. O percentual de partículas afetadas, de acordo com cada tipo de dano observado, foi calculado em relação ao número total inicial de partículas para cada fração. A Tabela 4.6 apresenta três diferentes tipos de danos observados.

Tabela 4.6 - Determinação dos danos nas partículas.

Frações		Partículas que apresentaram danos						Nº de Partículas antes do ensaio
		Fendilhamento		Quebra		Laminagem		
Passante	Retido	Nº de Partículas	%	Nº de Partículas	%	Nº de Partículas	%	
25 mm	19 mm	2	5,55	6	16,67	5	13,89	36

Fonte: Autora, 2025.

Verifica-se que, dentre as 36 partículas analisadas na fração compreendida entre 25 mm e 19 mm, 2 partículas (5,55%) apresentaram fendilhamento, 6 partículas (16,67%) sofreram quebra e 5 partículas (13,89%) apresentaram laminagem. Observa-se, portanto, que os danos predominantes foram de quebra e laminagem, indicando a existência de planos de fraqueza associados a microfissuras e à orientação dos minerais constituintes. Segundo Caputo (2022), a resistência dos agregados à desintegração está diretamente relacionada à sua mineralogia e ao grau de alteração da rocha, visto que minerais susceptíveis à hidratação e expansões volumétricas, especialmente os com traços de argilominerais, podem favorecer o desenvolvimento de fissuras internas quando submetidos à ação da água ou de ciclos de umedecimento e secagem.

Adicionalmente, verifica-se que a literatura reforça a influência relevante das características petrográficas (mineralogia, textura, granulação e grau de alteração da rocha) na resistência dos agregados à desintegração. Diógenes (2018), ao investigar a relação entre propriedades da rocha de origem e o comportamento mecânico dos agregados, destaca que rochas graníticas podem apresentar microfissuras herdadas de processos de intemperismo, bem como alteração inicial de minerais como feldspatos e biotita, fatores que contribuem para mecanismos de degradação tais como quebra e laminagem.

Figura 4.5 - Partícula que sofreu fendilhamento.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.6 - Partícula que sofreu quebra.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.7 - Partícula que sofreu laminagem.



Fonte: Autora, 2025.

A análise visual das partículas, complementando os resultados apresentados na Tabela 4.6, permitiu identificar de forma mais clara os tipos de danos ocasionados pelo ensaio. Observou-se que, apesar da ocorrência de fendilamentos, quebras e laminagens em algumas partículas, a maioria manteve sua forma e estrutura original, evidenciando boa resistência à desintegração e adequada durabilidade do material.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o agregado analisado apresenta comportamento satisfatório frente às condições de desgaste simuladas, podendo ser considerado tecnicamente adequado para utilização em misturas asfálticas, conforme os critérios de qualidade exigidos pelas normas do DNIT.

4.1.7 Adesividade

Inicialmente, foi conduzido o ensaio sem a utilização de aditivo melhorador de adesividade, conforme previsto no procedimento padrão. Após a imersão em água e a permanência das duas amostras por 72 horas em estufa, verificou-se que nenhuma delas apresentou resultado satisfatório, uma vez que ocorreu descolamento parcial da película de ligante em todos os casos.

De acordo com o critério estabelecido pela norma, o ensaio é classificado como não satisfatório sempre que houver deslocamento total ou parcial do ligante da superfície dos agregados. Diante desse resultado, e seguindo a recomendação normativa, o ensaio foi repetido com a adição de melhorador de adesividade, utilizando-se a dosagem de 0,10% em relação à massa do ligante.

A comparação visual entre os agregados sem aditivo (Figura 4.8) e com aditivo (Figura 4.9) evidencia a diferença no percentual de área recoberta pelo ligante asfáltico após a imersão em água destilada.

Figura 4.8 - Agregado sem aditivo.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.9 - Agregado com aditivo.



Fonte: Autora, 2025.

Observou-se que a presença do aditivo proporcionou uma melhora significativa na retenção do ligante, reduzindo a área de descolamento. Entretanto, essa melhoria não foi suficiente para atender ao critério estabelecido pela norma, uma vez que ainda ocorreu descolamento parcial da película de ligante, o que mantém a classificação do ensaio como não satisfatório.

No que se refere aos agregados graúdos de origem ácida (granito, granodiorito e quartzo) o próprio Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP (2021) indica que tais agregados podem apresentar menor afinidade com o ligante, devido à sua composição mineralógica e à maior presença de sílica, além de características naturais que dificultam a ancoragem do ligante (por exemplo, textura lisa ou menor reatividade superficial). Essa menor afinidade tende a aumentar a suscetibilidade à umidade e à perda de aderência, reforçando o fato de que a origem da rocha exerce grande influência no desempenho da mistura asfáltica.

Diante desse cenário, uma técnica de melhoramento recomendada pelo IBP (2021) é o uso de agentes melhoradores de adesividade, como aditivos amínicos ou silanos, que promovem uma camada de ponte entre o ligante e a superfície do agregado, reduzindo a tensão interfacial e melhorando a retenção do ligante. Adicionalmente, o uso de cal hidratada (limeificação) sobre o agregado, antes de sua incorporação na mistura, também é mencionado como eficaz no controle de danos por umidade.

4.2 Comparação dos resultados obtidos com as faixas granulométricas estabelecidas pela norma DNIT 031/2024-ES e estabilização granulométrica para enquadrar nas faixas de trabalho.

A caracterização granulométrica dos agregados constitui uma etapa essencial para o controle da qualidade e para o desempenho das misturas asfálticas. A distribuição adequada dos tamanhos de partículas influencia diretamente propriedades como densificação, estabilidade e durabilidade do revestimento. Dessa forma, após a obtenção dos resultados dos ensaios de peneiramento, tornou-se necessária a comparação das curvas granulométricas experimentais com as faixas de trabalho estabelecidas pela norma DNIT 031/2024 – ES, que define os limites de granulometria admissíveis para diferentes tipos de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ).

Com base nessa comparação, foi possível avaliar o enquadramento dos agregados analisados e identificar eventuais desvios em relação aos limites normativos. Nos casos em que os materiais, isoladamente, não atenderam às exigências da norma, procedeu-se à

estabilização granulométrica, ajustando-se as proporções das frações de agregados graúdos de modo a obter uma curva final contínua e dentro da faixa de trabalho escolhida.

Essa etapa é fundamental para garantir que a mistura asfáltica resultante apresente uma adequada combinação, intertravamento e trabalhabilidade, assegurando o desempenho satisfatório do revestimento durante sua vida útil.

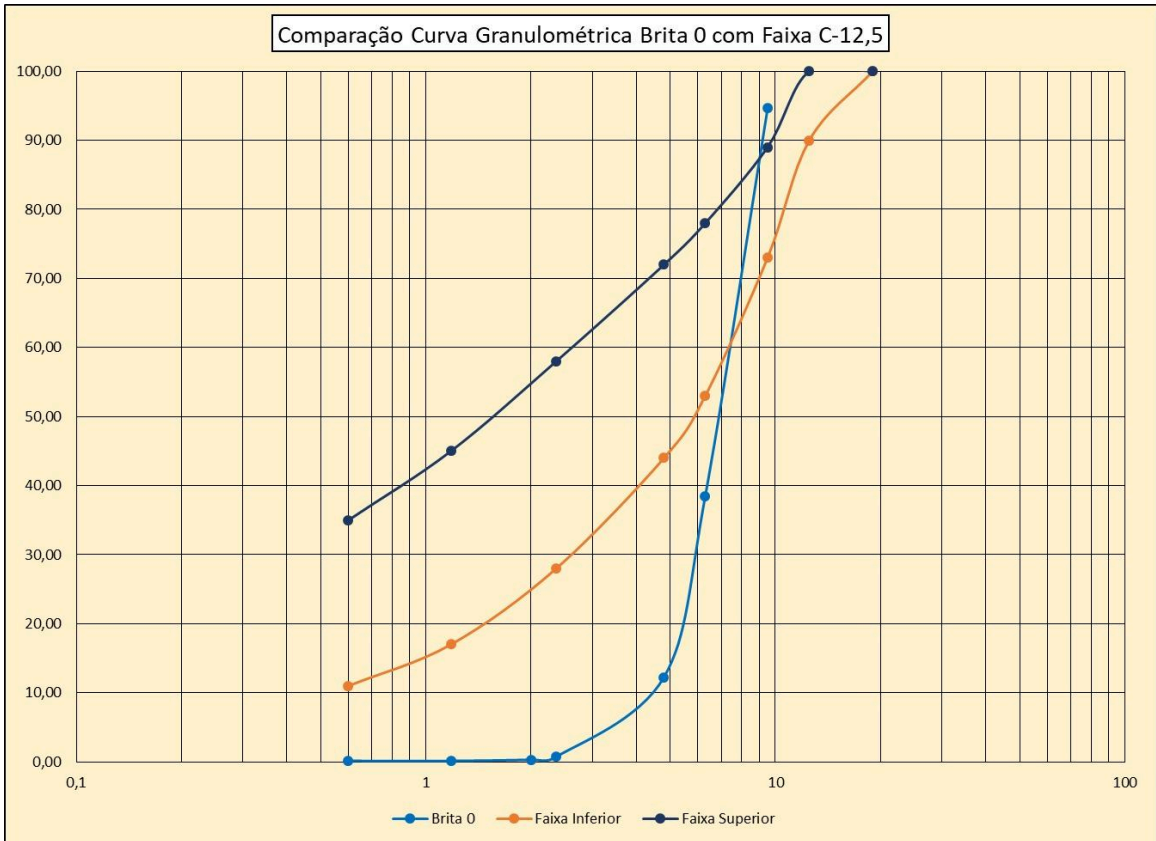
4.2.1 Análise comparativa com as faixas da DNIT 031/2024-ES.

Observando os resultados obtidos nos ensaios de análise granulométrica realizados para cada um dos agregados, procedeu-se à comparação das curvas experimentais com as faixas granulométricas estabelecidas pela norma DNIT 031/2024 – ES. Essa comparação foi realizada tomando como referência o diâmetro máximo característico (DMC) de cada material.

Para a brita 0, cujo DMC é de 9,5 mm, adotou-se como base a Faixa C-12,5, por se tratar de uma das faixas mais utilizadas na execução de revestimentos asfálticos com menores diâmetros máximos característicos. Já para a brita 1, com DMC igual a 19 mm, a comparação foi feita em relação à Faixa B-19 da mesma norma, de modo a assegurar a correspondência entre o tamanho máximo do agregado e a faixa granulométrica de referência.

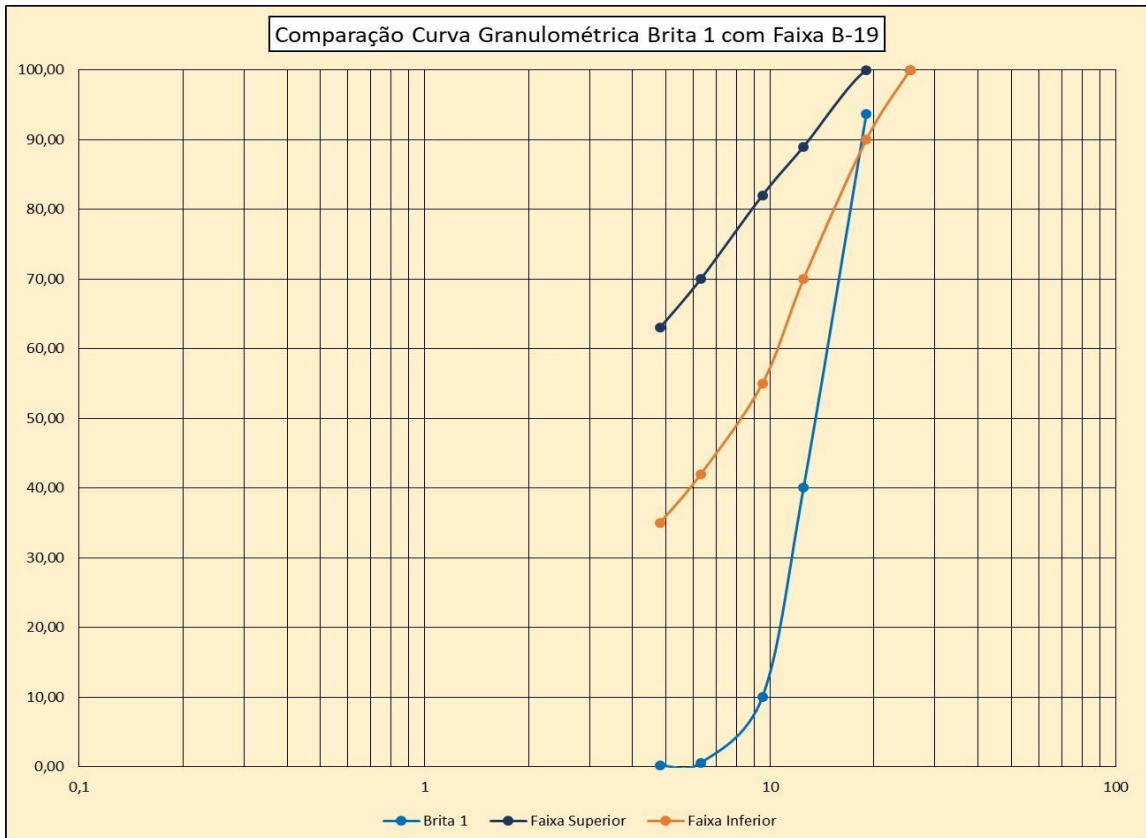
Os gráficos apresentados na Figura 4.10 e Figura 4.11 ilustram essas comparações, permitindo a visualização do comportamento das curvas obtidas em relação aos limites superiores e inferiores estabelecidos pela norma.

Figura 4.10 - Comparação Curva granulométrica Brita 0 com Faixa C-12,5.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.11 - Comparação Curva granulométrica Brita 1 com Faixa B-19.



Fonte: Autora, 2025.

Observa-se, pelos gráficos apresentados, que nenhum dos agregados, quando considerados isoladamente, é capaz de atender integralmente a uma faixa granulométrica estabelecida pela DNIT 031/2024 – ES. Verifica-se que o enquadramento ocorre apenas em determinadas frações: a brita 1, por exemplo, enquadra-se apenas na peneira correspondente a 19 mm, enquanto a brita 0 apresenta adequação na fração de 6,3 mm. Esse comportamento indica que agregados naturais, quando utilizados sem combinação entre diferentes tamanhos, raramente apresentam uma distribuição granulométrica contínua capaz de atender aos requisitos das faixas de projeto (DNIT, 2024). De acordo com Bernucci et al. (2008), curvas descontínuas resultam em misturas menos densas, com maior volume de vazios e suscetíveis a problemas de estabilidade, destacando a importância do adequado balanceamento das frações graúdas, médias e finas. Assim, a impossibilidade de atendimento integral pelas britas avaliadas reforça a necessidade da estabilização granulométrica, realizada por meio da combinação proporcional das frações, de modo a produzir uma curva final dentro dos limites normativos e que garanta desempenho adequado em termos de trabalhabilidade, resistência e durabilidade da mistura.

4.2.2 Estabilização granulométrica

Após verificar que os agregados analisados individualmente não atendiam aos limites granulométricos estabelecidos pela DNIT 031/2024 – ES, procedeu-se à realização de simulações de misturas entre a brita 0 e a brita 1, com o objetivo de obter combinações capazes de se enquadrar em alguma das faixas de trabalho. As proporções testadas foram calculadas conforme a metodologia apresentada anteriormente, variando-se sistematicamente as quantidades relativas de cada agregado de modo a avaliar o comportamento da curva resultante.

Foram realizadas seis simulações ao todo, sendo três destinadas ao enquadramento na Faixa C-12,5 e três na Faixa B-19. As proporções adotadas em cada estabilização encontram-se apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Proporções utilizadas nas simulações de estabilização granulométrica.

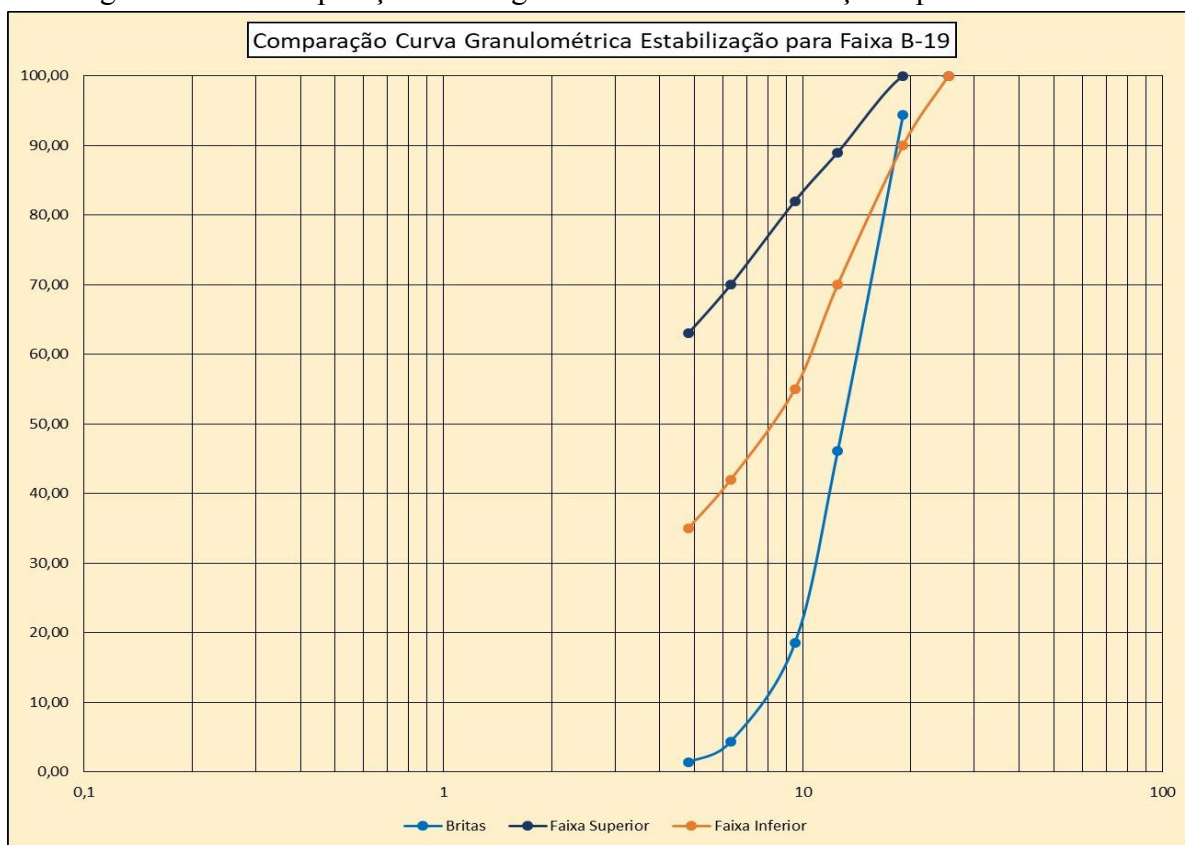
Faixa Alvo	Simulação	Brita 0 (%)	Brita 1 (%)
C-12,5	Estabilização 1	90	10
C-12,5	Estabilização 2	80	20
C-12,5	Estabilização 3	70	30
B-19	Estabilização 1	10	90

B-19	Estabilização 2	20	80
B-19	Estabilização 3	30	70

Fonte: Autora, 2025.

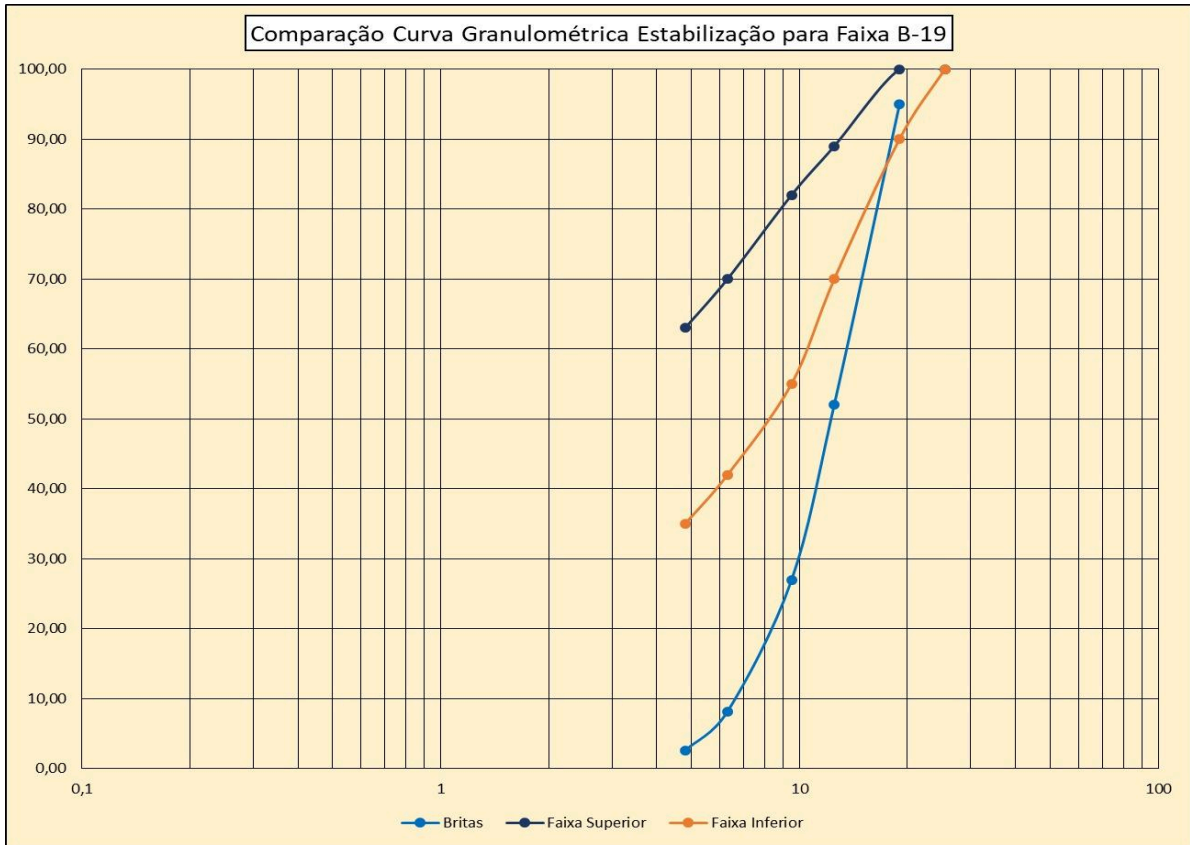
Os gráficos correspondentes a cada uma dessas seis simulações são apresentados nas Figuras, permitindo visualizar as curvas granulométricas resultantes das proporções testadas e sua relação com os limites superiores e inferiores de cada faixa normativa.

Figura 4.12 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 1 para Faixa B-19.



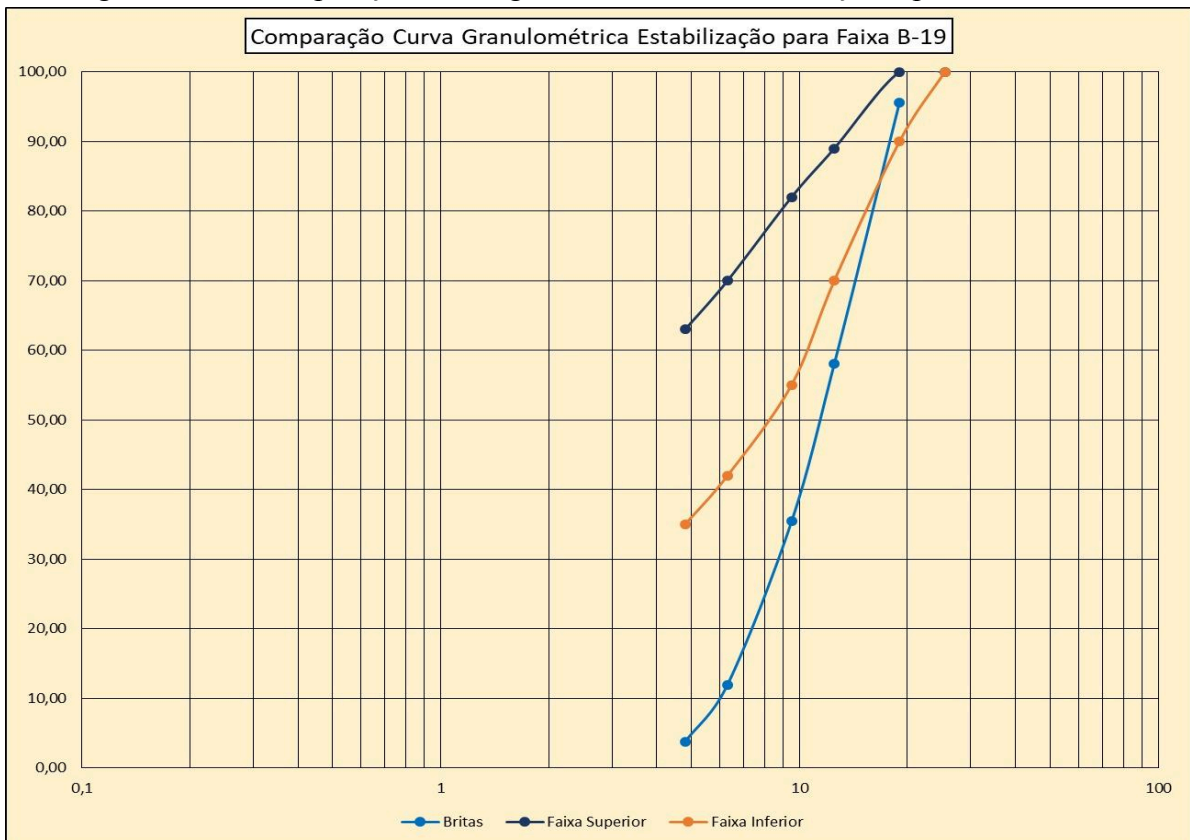
Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.13 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 2 para Faixa B-19.



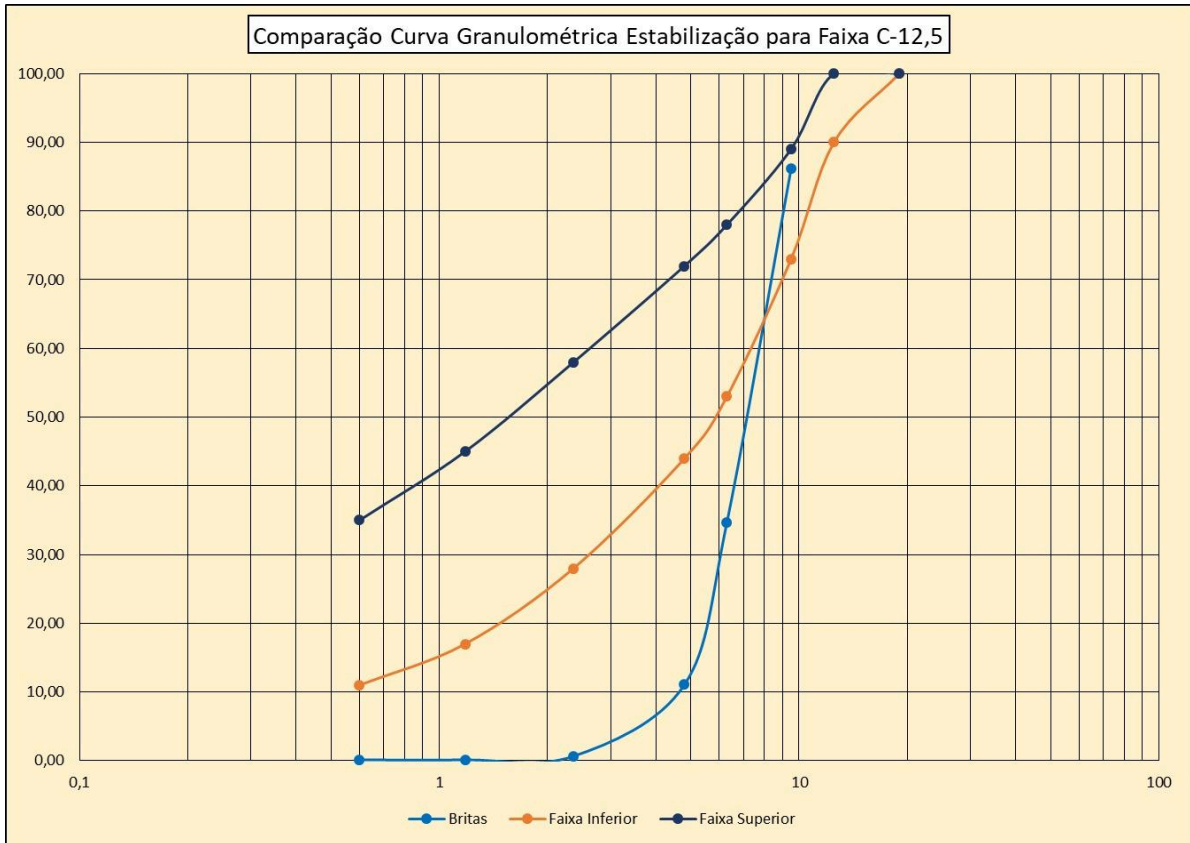
Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.14 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 3 para Faixa B-19.



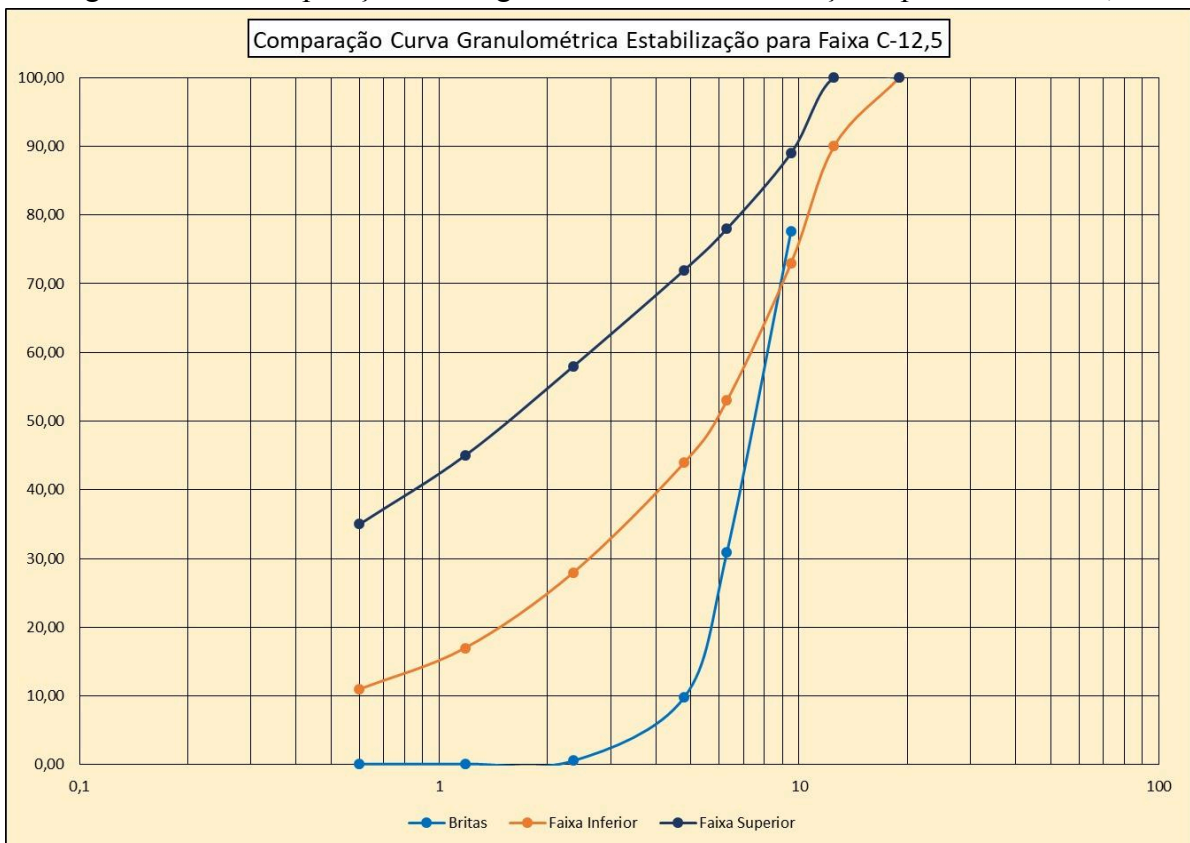
Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.15 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 1 para Faixa C-12,5.



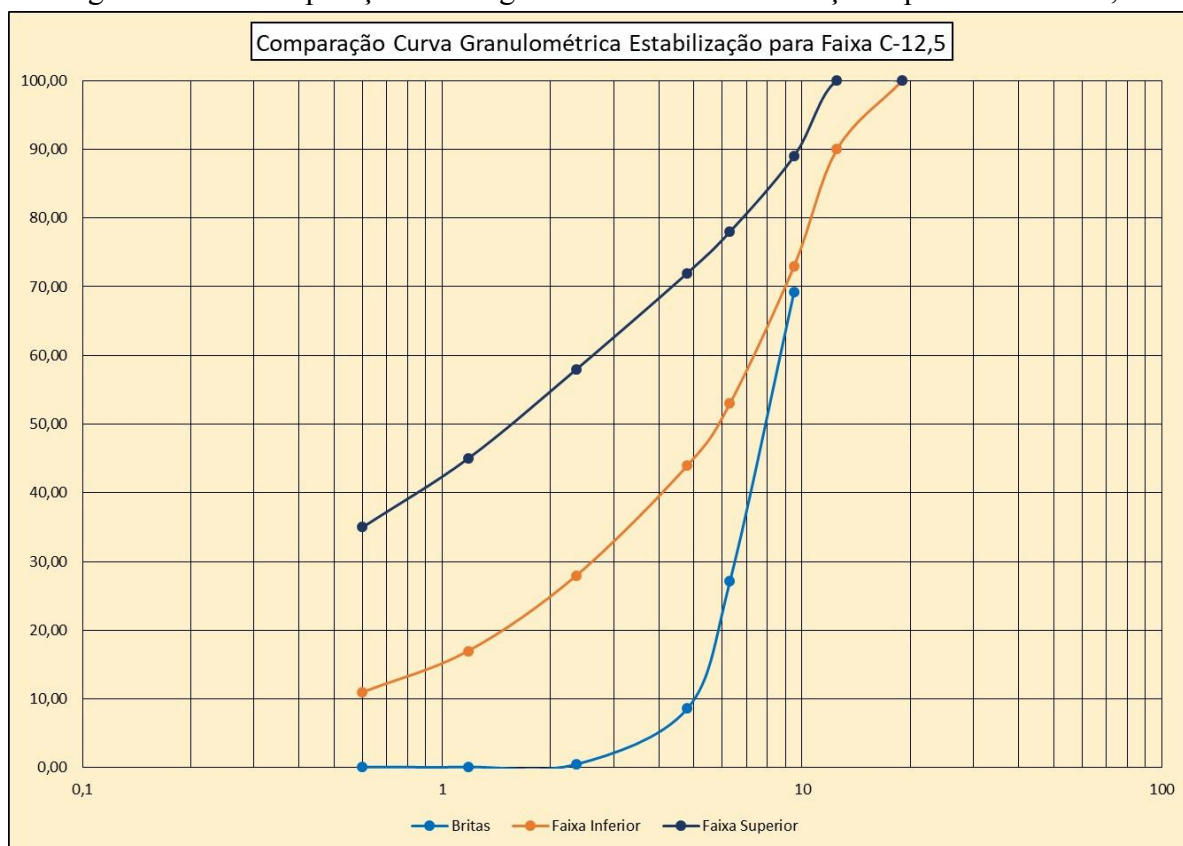
Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.16 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 2 para Faixa C-12,5.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 4.17 - Comparação Curva granulométrica Estabilização 3 para Faixa C-12,5.



Fonte: Autora, 2025.

Apesar das variações propostas, nenhuma das misturas simuladas apresentou enquadramento integral em suas respectivas faixas. Em todas as combinações, observou-se que, mesmo quando alguns pontos se aproximavam dos limites normativos, havia sempre extrapolações em peneiras específicas ou descontinuidades decorrentes da ausência de materiais intermediários. Esse comportamento está alinhado ao que a literatura descreve sobre a adequação de agregados para misturas asfálticas, uma vez que o atendimento completo às faixas requer não apenas a seleção de proporções adequadas, mas também agregados cuja composição granulométrica seja complementar e capaz de preencher de forma contínua toda a curva de distribuição (DNIT 031/2024 – ES).

Segundo o DNIT 031/2024 – ES, a construção de misturas dentro das faixas recomendadas pressupõe uma distribuição progressiva e interligada entre as frações graúdas, médias e miúdas, assegurando que a granulometria apresente boa continuidade. A norma enfatiza que, quando os agregados disponíveis possuem graduação naturalmente desequilibrada torna-se difícil produzir faixas sem a incorporação de materiais específicos para preencher lacunas críticas. Bernucci et al. (2008) reforçam que a produção de faixas granulométricas adequadas depende da disponibilidade de agregados com diferentes módulos

de finura, de modo que a mistura resultante apresente boa compactabilidade, elevada estabilidade e reduzida suscetibilidade à segregação. Assim, a indisponibilidade de determinadas classes, ou o uso de poucos tipos de britas, tende a gerar curvas descontínuas, comprometendo tanto o enquadramento normativo quanto o desempenho mecânico final do concreto asfáltico.

Portanto, concluiu-se que, para as proporções avaliadas entre brita 0 e brita 1, não foi possível obter uma estabilização granulométrica satisfatória para o enquadramento nas faixas B-19 ou C-12,5 estabelecidas pela DNIT 031/2024 – ES. Diante desse resultado, recomenda-se que trabalhos futuros explorem a produção ou correção de faixas granulométricas alternativas, seja por meio da incorporação de outras frações de agregados ou pelo ajuste mais refinado das proporções entre os materiais, de modo a alcançar uma distribuição granulométrica que atenda aos requisitos normativos e possibilite melhor desempenho no concreto asfáltico.

5 CONCLUSÃO

A realização desta pesquisa permitiu avaliar de forma consistente a conformidade dos agregados graúdos da região de Porto Velho/RO para aplicação em misturas asfálticas a quente, cumprindo o objetivo geral estabelecido. A partir dos fundamentos teóricos discutidos no início do trabalho, que destacam a influência direta da granulometria, forma das partículas, resistência mecânica e adesividade na estabilidade e durabilidade das misturas asfálticas, foi possível analisar criticamente o desempenho dos materiais locais diante dos requisitos da DNIT 031/2024 – ES.

No que se refere aos objetivos específicos, verificou-se inicialmente que a caracterização física e tecnológica dos agregados demonstrou materiais com boa durabilidade e resistência à degradação, conforme evidenciado pelos baixos percentuais de perda no ensaio de abrasão e pelos danos observados nas partículas analisadas, que permaneceram dentro de limites aceitáveis segundo critérios normativos. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica do uso dos agregados em misturas asfálticas, atendendo ao segundo objetivo proposto.

Entretanto, ao confrontar os resultados granulométricos com as faixas prescritas pela DNIT 031/2024 – ES, constatou-se que tanto a Brita 0 quanto a Brita 1 apresentaram descontinuidades e deficiências em peneiras específicas, não se enquadrando integralmente nas faixas normativas analisadas. A tentativa de estabilização granulométrica, realizada em diferentes proporções entre os dois materiais, também não permitiu atingir curvas totalmente compatíveis com as Faixas B-19 e C-12,5. Esse achado é especialmente relevante, pois evidencia a principal limitação técnica para o uso direto desses agregados em CAUQ: a ausência de material intermediário suficiente para compor uma mistura bem graduada. Assim, o terceiro e quarto objetivos, comparar os resultados às faixas normatizadas e realizar a estabilização granulométrica, foram alcançados, revelando a necessidade de ajustes complementares no processo de produção ou de incorporação de novos tipos de agregados para correção da curva granulométrica.

Os resultados obtidos reforçam, portanto, a importância dos estudos regionais destacados no início do trabalho. Eles permitem não só compreender as limitações e potencialidades dos materiais disponíveis, mas também orientar decisões técnicas e operacionais para o setor de pavimentação em Rondônia. Apesar das restrições granulométricas identificadas, a pesquisa contribui para suprir lacunas existentes sobre o comportamento dos agregados locais, fortalecendo a base científica necessária para o

desenvolvimento de soluções economicamente viáveis, sustentáveis e adequadas às condições regionais.

Conclui-se que os agregados estudados apresentam propriedades físicas e tecnológicas compatíveis com as exigências normativas para uso em misturas asfálticas, mas não atendem plenamente às faixas granulométricas especificadas, mesmo após a estabilização proposta. Assim, sua aplicação em CAUQ requer a combinação com outros materiais ou ajustes no processo de britagem, a fim de garantir a conformidade necessária para a produção de revestimentos asfálticos com desempenho adequado. Ainda assim, a pesquisa cumpre seu papel ao fornecer dados concretos para subsidiar o aprimoramento tecnológico da pavimentação na região, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade, eficiência e valorização dos recursos minerais locais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809:2019** – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma – Método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1:2011** – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e dimensionais. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26:2000** – Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27:2001** – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- BALBO, José T. Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. Porto Alegre: Oficina de Textos, 2025. E-book. ISBN 9788579751035. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751035/>>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-EM 035/1995: Agregado – Peneiras de ensaio – Especificação de materiais**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-PRO 120/1997: Agregado – Coleta de amostras – Procedimento**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-PRO 199/1996: Agregado – Redução da amostra para ensaio – Procedimento**. Rio de Janeiro: DNER, 1996.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2024 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2024.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 412/2020 – ME: Agregados – Análise granulométrica por peneiramento – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2020.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 413/2021 – ME: Agregado graúdo – Determinação da massa específica e da absorção de água – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2021.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 425/2020 – ME: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 430/2020 – ME: Agregado graúdo – Determinação da porcentagem de partículas fraturadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 446/2024 – ME: Agregados – Determinação da durabilidade – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 451/2024 – ME: Agregado graúdo – Determinação da resistência ao desgaste por abrasão e impacto – Ensaio “Los Angeles” – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 453/2024 – EM: Peneiras para ensaio de agregados – Especificação de materiais**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2024.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. *Mecânica dos Solos – Teoria e Aplicações*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. ISBN 978-85-216-3767 7.

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

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. QUADROS, Marcos E. et al. *Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado de Rondônia*. Porto Velho: CPRM, 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/313225187>>. Acesso em: 15 jun. 2025.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 4. ed. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2019. E-book. ISBN 9788522128280. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522128280/>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

DÍOGENES, L. M. *Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem*. 2018. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/34523>. Acesso em: 10 out. 2025.

GOMES, Adailton de Oliveira. *Caderno de Aulas Práticas – Materiais de Construção II*. Salvador: Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2008.

GUABIROBA, J. V. O. C.; REZENDE, L. R.; BARROSO, L. X.; SILVA, J. P. S. *Estudo da fadiga e da deformação permanente de misturas asfálticas produzidas em Goiás*. Matéria (Rio de Janeiro), v. 28, n. 1, 2023. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620230001.1332>>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/RDFynNhwtBB8RkQPS8R9NMh/>>. Acesso em: 29 jun. 2025.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. *Informações básicas sobre materiais asfálticos – Volume 1: A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas*. Rio de Janeiro: IBP, 2021. ISBN 978-65-88039-03-8.

LI, W. et al. *Impacts of aggregate gradation on the volumetric parameters and rutting performance of asphalt concrete mixtures*. Materials, Basel, v. 15, n. 14, p. 1-19, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.3390/ma15145116>>.

RODRIGUES, Lilian Kethelyn Brum Maciel. *Estudo da formulação e avaliação do desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas do tipo grave-bitume*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/238329>>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SOUZA, Igor Andrade. *Defeitos topológicos em teoria de campos com dinâmica generalizada*. 2015. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13146>>. Acesso em: 29 jun. 2025.