



2026

Análise Comparativa e de Reprodutibilidade do Teor de Ligante em Misturas Asfálticas: Métodos Rotarex, Soxhlet e Mufla (NCAT)

João Paulo Nunes da Silva ^a; Daniel Anijar de Matos ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, joao.paulo.nunes@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutor, daniel.matos@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

O controle do teor de ligante asfáltico constitui um dos principais parâmetros para garantir o desempenho estrutural e a durabilidade de pavimentos flexíveis, visto que desvios na dosagem comprometem a resistência mecânica e a vida útil das misturas. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou comparar a eficiência da extração do ligante em misturas asfálticas densas por meio de três métodos utilizados no Brasil: ignição (forno Mufla), extração por refluxo (Soxhlet) e centrifugação (Rotarex). Adicionalmente, realizou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos pelo método da ignição em dois laboratórios distintos para avaliar a reprodutibilidade do ensaio. Foram analisados corpos de prova moldados com Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30/45, enquadrados na faixa granulométrica C, com teor de projeto de 5,4%, adotado como valor de referência. Os ensaios seguiram as normas técnicas vigentes (DNIT e ABNT), avaliando-se os teores obtidos e seus desvios em relação à referência. Avaliou-se, ainda, a granulometria dos agregados após a extração, visando identificar possíveis degradações ou perdas de finos, além do tempo operacional de cada procedimento. Os resultados indicaram variações entre os métodos, inclusive entre as muflas dos dois laboratórios. O método da ignição destacou-se pela menor variabilidade e maior proximidade ao valor de referência. O método Rotarex apresentou valores de teor de ligante superiores ao real, possivelmente associados à extração incompleta do ligante e à perda de material fino durante o ensaio, enquanto o método Soxhlet demandou maior tempo operacional e apresentou maior dispersão nos dados. Conclui-se que a escolha do procedimento deve considerar a precisão técnica e aspectos operacionais, ambientais e de segurança, sendo o forno Mufla uma alternativa robusta para o controle tecnológico de pavimentos.

Palavras-chave: Teor de ligante; métodos de extração; misturas asfálticas; reprodutibilidade.

ABSTRACT

Controlling the asphalt binder content is one of the main parameters for ensuring the structural performance and durability of flexible pavements, since deviations in dosage compromise the mechanical strength and service life of the mixtures. In this context, the present study aimed to compare the efficiency of binder extraction in dense asphalt mixtures using three methods used in Brazil: ignition (Muffle furnace), reflux extraction (Soxhlet), and centrifugation (Rotarex). Additionally, a comparative analysis of the results obtained by the ignition method was performed in two different laboratories to evaluate the reproducibility of the test. Test specimens molded with 30/45 Petroleum Asphalt Cement (PAC), classified in the C granulometric range, with a design content of 5.4%, adopted as a reference value, were analyzed. The tests followed the current technical standards (DNIT and ABNT), evaluating the contents obtained and their deviations from the reference. The granulometry of the aggregates after extraction was also evaluated to identify possible degradation or loss of fines, in addition to the operational time of each procedure. The results indicated variations between the methods, including between the muffles of the two laboratories. The ignition method stood out for its lower variability and greater proximity to the reference value. The Rotarex method presented binder content values higher than the actual ones, possibly associated with incomplete extraction of the binder and loss of fine material during the test, while the Soxhlet method required longer operating time and presented greater dispersion in the data. It is concluded that the choice of procedure should consider technical accuracy and operational, environmental, and safety aspects, with the muffle furnace being a robust alternative for technological control of pavements.

Keywords: Binder content; extraction methods; asphalt mixtures; reproducibility.

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário desempenha um papel predominante na logística brasileira, sendo responsável pela movimentação de aproximadamente 65% das cargas e 95% dos passageiros no país. Diante dessa relevância, a qualidade do pavimento torna-se um fator crítico, estando diretamente associada ao desempenho estrutural e funcional das rodovias, o que impacta a segurança viária, o conforto dos usuários e a durabilidade da malha (CNT, 2025).

Tecnicamente, o pavimento é definido como uma estrutura de múltiplas camadas construída sobre o subleito, dimensionada para suportar e distribuir as solicitações do tráfego e as ações climáticas ao longo de sua vida útil (BERNUCCI et al., 2022). Em pavimentos flexíveis, a camada de revestimento asfáltico assume um papel crítico, uma vez que qualquer desvio no dimensionamento da mistura pode comprometer a integridade de toda a estrutura. Os revestimentos asfálticos são compostos por agregados e ligantes asfálticos que possuem características particulares. Quando o ligante asfáltico se encontra em excesso nas misturas, pode ocasionar deformações permanentes devido a exsudação, escorregamento de massa, afundamento plástico nas trilhas de roda, entre outros. Por outro lado, quando o ligante betuminoso está em quantidades menores do que o ideal, pode gerar problemas relacionados com desgaste, desagregação e trincas (BERNUCCI et al., 2022). Assim, a precisão na dosagem do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é o que garante que o revestimento cumpra as suas funções precípuas de absorver tensões, impermeabilizar a estrutura e manter condições seguras de rolamento (BERNUCCI et al., 2022).

Nesse cenário, a determinação do teor de ligante asfáltico consolida-se como um dos principais parâmetros de controle tecnológico. Para essa finalidade, a engenharia utiliza métodos laboratoriais que permitem a extração do betume e a quantificação de sua porcentagem na mistura, fundamentados na norma “ABNT NBR 16208:2013 - Misturas asfálticas - Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo”. Entre os métodos mais empregados no Brasil, destacam-se a extração por refluxo (Soxhlet), a extração por centrifugação (Rotarex) e os métodos por ignição (forno Mufla).

O método Soxhlet baseia-se na dissolução do ligante por meio de solvente aquecido, promovendo ciclos sucessivos de lavagem da amostra até a remoção do betume, conforme a norma “DNIT 158/2011 – ME -

Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio”. Já o método Rotarex utiliza a centrifugação para promover a separação mecânica do ligante asfáltico dos agregados, sendo um procedimento tradicionalmente empregado segundo a norma “DNER-ME 053/94 – Misturas betuminosas – porcentagem de betume”. Como alternativa aos métodos químicos, o método da ignição em forno Mufla promove a queima do ligante sob altas temperaturas, dispensando o uso de solventes e reduzindo riscos operacionais.

Contudo, a diversidade de princípios físicos e químicos envolvidos em cada procedimento pode gerar variações nos resultados, seja por extração incompleta, perda de materiais finos durante a lavagem ou alterações na massa dos agregados. Além das discrepâncias metodológicas, a confiabilidade dos dados depende da repetibilidade e da reprodutibilidade dos ensaios, podendo ocorrer variações entre equipamentos e entre laboratórios distintos.

Diante desse cenário, a análise comparativa entre diferentes métodos de determinação do teor de ligante e a avaliação da reprodutibilidade dos resultados constituem ferramentas fundamentais para o aperfeiçoamento dos processos de controle de qualidade, garantindo a conformidade com as especificações técnicas vigentes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo experimental de natureza comparativa, visando avaliar as diferenças, a precisão e a reprodutibilidade entre distintos métodos de determinação do teor de ligante em misturas asfálticas.

Para a viabilização do estudo, foram utilizados corpos de prova de concreto asfáltico previamente moldados. As amostras foram produzidas conforme a graduação granulométrica da Faixa C, conforme especificações da norma DNIT 031/2024-ES, e dosadas segundo os procedimentos estabelecidos na DNER-ME 043/1995, compactadas com 75 golpes por face, conforme a metodologia Marshall. Todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo teor de ligante, correspondente ao teor ótimo de 5,4%, adotado como valor de referência para as análises comparativas realizadas neste estudo.

Antes de serem submetidos aos processos de extração de ligante, analisados neste trabalho, os corpos de

prova haviam sido previamente avaliados quanto ao desempenho mecânico, por meio dos ensaios de estabilidade Marshall e de resistência à tração por compressão diametral.

No que se refere à composição das misturas, foram empregados agregados minerais provenientes da pedra Bodoquena, localizada no município de Bodoquena-MS, e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30/45 como ligante.

2.1. Planejamento experimental

Para a execução do presente estudo, os corpos de prova foram inicialmente colocados em bandejas metálicas e levados à estufa a 110 °C por um período de 1 hora. Em seguida, as amostras foram destorroadas manualmente e revolvidas até o resfriamento parcial, de modo a manter o material solto e homogêneo.

Após essa etapa, as amostras foram acondicionadas em recipiente adequado e protegidas com filme plástico, com a finalidade de evitar perda de material e contaminação cruzada entre diferentes amostras, o que poderia interferir nos resultados experimentais.

As amostras destinadas aos ensaios de extração foram pesadas ainda quentes, visando reduzir possíveis variações de massa decorrentes da absorção de umidade do ar ambiente. Para minimizar a transferência de calor para o equipamento e evitar alterações nas leituras, foi posicionada uma placa de madeira entre a amostra e o prato da balança durante a pesagem.

Adicionalmente, durante o processo de pesagem, os sistemas de ar-condicionado dos laboratórios foram temporariamente desligados, com o intuito de evitar correntes de ar que pudessem provocar oscilações nas medições e comprometer a precisão dos resultados.

2.2. Método do refluxo (Soxhlet)

O teor de ligante asfáltico foi determinado por meio do método de extração com extrator Soxhlet, conforme estabelecido pela norma DNIT 158/2011-ME.

Inicialmente, um béquer contendo em seu interior um filtro de papel foi levado à estufa à temperatura de (110 ± 5) °C, visando eliminar a umidade presente e garantir maior precisão nas pesagens. Ressalta-se que o filtro utilizado já havia sido previamente confeccionado pelo laboratório, não sendo necessária sua preparação durante o ensaio. Após um período de aproximadamente 30 minutos, foi realizada a verificação da constância de massa do conjunto béquer + filtro, sendo determinada sua massa seca e

anotado o valor para utilização nos cálculos posteriores (Figura 1).

Figura 1 – Determinação da massa do conjunto béquer.

Fonte: Autor



Na sequência, cerca de 600 g de mistura asfáltica, ainda aquecida foram colocados no interior do filtro. O conjunto béquer + filtro + amostra foi então pesado e sua massa registrada.

Posteriormente, o filtro contendo a amostra foi transferido para o equipamento Soxhlet (Figura 2), onde foi realizado o processo de extração do ligante asfáltico por meio de solvente, conforme procedimento descrito na norma DNIT 158/2011-ME. Devido ao horário de funcionamento do laboratório, o equipamento permaneceu em operação por aproximadamente 24 horas, garantindo a completa remoção do ligante da mistura.

Figura 2 – Equipamento Soxhlet com a amostra durante o processo de extração do ligante asfáltico. Fonte: Autor



Após o término da extração, aguardou-se o resfriamento do conjunto até a temperatura ambiente, a fim de permitir o manuseio seguro (Figura 3). Em seguida, o filtro contendo o material mineral remanescente foi retirado do equipamento e recolocado no mesmo béquer utilizado nas pesagens iniciais.

Figura 3 – Amostra após o término do processo de extração. Fonte: Autor



O conjunto foi então levado novamente à estufa à temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ por aproximadamente 24 horas (Figura 4), sendo realizado novamente o procedimento de constância de massa, assegurando a evaporação completa do solvente residual e a secagem total da amostra, conforme preconiza a norma DNIT 158/2011-ME.

Figura 4 – Secagem da amostra após o término do processo de extração. Fonte: Autor



Após esse período, o conjunto béquer + filtro + agregado foi pesado novamente. A partir das massas obtidas nas etapas de pesagem, foi determinado o teor

de ligante asfáltico por meio da equação prescrita na DNIT 158/2011-ME.

2.3. Método da ignição (Mufla)

O teor de ligante asfáltico pelo método de ignição foi determinado com base na norma americana AASHTO T 308-18, uma vez que não há norma brasileira específica que regulamente esse procedimento. Nesse método, a amostra de mistura asfáltica é submetida à queima controlada em forno tipo mufla (Figura 5), promovendo a combustão do ligante asfáltico e permanecendo apenas o agregado mineral. O teor de ligante é obtido pela diferença entre a massa inicial da amostra e a massa final do agregado remanescente após a queima, sendo o valor posteriormente corrigido por meio de um fator de calibração previamente determinado para o tipo de agregado e para o equipamento utilizado. O critério de parada do ensaio ocorre quando a variação de massa se torna praticamente constante, isto é, quando a diferença entre medições consecutivas não excede aproximadamente 0,01% da massa inicial da amostra, indicando que não há mais queima significativa de ligante. Ressalta-se que esse ensaio foi realizado em dois laboratórios distintos, sendo adotado o mesmo procedimento experimental em ambos, a fim de garantir a comparabilidade dos resultados obtidos.

Figura 5 – Forno tipo mufla. Fonte: Autor



Antes da realização dos ensaios nas amostras contendo ligante, foi conduzido o procedimento para determinação do fator de correção do equipamento em relação ao agregado da mistura. Para isso, foi preparada uma amostra branca (sem ligante), com o objetivo de avaliar a possível perda de material fino durante o processo de queima.

Os agregados utilizados na amostra branca foram os mesmos empregados na composição da mistura

asfáltica do projeto Marshall original, respeitando-se as proporções de brita 5/8", pedrisco e pó de pedra. Inicialmente, o material foi homogeneizado e submetido ao processo de quarteamento (Figura 6), com a finalidade de garantir a representatividade da amostra. Em seguida, o material foi separado em duas porções com massa aproximada de 1500 g, as quais foram mantidas em estufa para evitar contaminação e variações de massa decorrentes da umidade.

Figura 6 – Quarteamento da amostra branca. Fonte: Autor



O mesmo procedimento realizado no equipamento de ignição (mufla) para as amostras contendo ligante foi aplicado à amostra branca. A única diferença consistiu no tempo de permanência no equipamento, uma vez que a amostra branca não apresenta ligante asfáltico e, conseqüentemente, não ocorre variação significativa de massa durante a queima. Dessa forma, adotou-se um tempo fixo de aproximadamente 1 h e 30 min para a realização do ensaio da amostra branca, permitindo a determinação do fator de correção do equipamento.

Para a realização do ensaio nas amostras com ligante, inicialmente o cesto metálico do equipamento foi cuidadosamente limpo, certificando-se da ausência de resíduos de ensaios anteriores. Em seguida, o cesto foi levado à estufa para aquecimento prévio e posteriormente pesado em balança, com o objetivo de determinar sua massa inicial. Após essa etapa, o cesto foi inserido no equipamento e o sistema foi tarado considerando apenas a massa do cesto.

Em seguida, a amostra previamente pesada e ainda aquecida foi distribuída no interior do cesto. Ressalta-se que, em um dos laboratórios, foi utilizada uma amostra com massa aproximada de 1600 g, enquanto no outro laboratório a massa da amostra foi de aproximadamente 1000 g. A amostra foi dividida uniformemente entre os dois compartimentos do cesto, evitando a formação de acúmulos que pudessem interferir na eficiência da queima do ligante.

Posteriormente, o cesto contendo a amostra foi introduzido na mufla e inserido no sistema o fator de

calibração. O ensaio foi então iniciado, ocorrendo a remoção do ligante por combustão controlada. Ao final do processo, o equipamento forneceu automaticamente um relatório impresso contendo o valor do teor de ligante asfáltico corrigido, calculado a partir da variação de massa da amostra e da aplicação do fator de correção previamente determinado, conforme previsto no método de ignição descrito na AASHTO T 308-18.

2.4. Método da centrifugação (Rotarex)

O teor de ligante asfáltico foi determinado por meio do método de extração utilizando o equipamento Rotarex, conforme estabelecido na ABNT NBR 16208:2013.

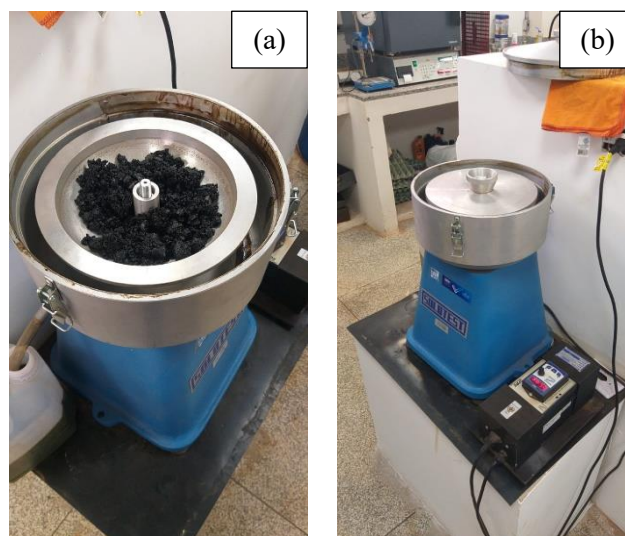
Inicialmente, o solvente tricloroetileno, grau técnico, foi acondicionado em proveta graduada para posterior utilização no ensaio. Em seguida, procedeu-se à pesagem do conjunto prato do extrator + papel de filtro, sendo o valor correspondente registrado como massa inicial.

Na sequência, aproximadamente 500 g de mistura asfáltica, ainda aquecida, foram colocados no interior do prato do extrator. O papel de filtro foi posicionado sobre a amostra e, posteriormente, realizou-se a pesagem do conjunto prato + filtro + amostra, registrando-se o valor obtido.

Após essa etapa, o conjunto foi transferido para o equipamento Rotarex (Figura 7a), procedendo-se ao fechamento adequado da tampa para o início do ensaio (Figura 7b). Em seguida, foram adicionados cerca de 150 mL de solvente tricloroetileno no interior do prato.

Figura 7 – Etapa inicial de extração através do Rotarex.

Fonte: Autor



O equipamento foi acionado inicialmente em baixa rotação, sendo a velocidade aumentada gradativamente até que o solvente contendo o ligante passasse a escoar pelo sistema. O procedimento foi mantido até a interrupção da descarga. Novas porções de solvente foram então adicionadas, repetindo-se o processo sucessivamente até que o líquido descarregado apresentasse aspecto límpido, indicando a remoção do ligante asfáltico da mistura (Figura 8).

Figura 8 – Etapa final de extração através do Rotarex.

Fonte: Autor



Concluída a etapa de extração, o conjunto prato + filtro + agregado foi transferido para a estufa à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, onde permaneceu até a obtenção de massa constante, assegurando a evaporação completa do solvente residual e a secagem total do material, conforme preconiza a ABNT NBR 16208:2013.

Após a secagem, o conjunto foi retirado da estufa e pesado ainda quente, visando minimizar a absorção de umidade do ambiente. A massa obtida foi registrada e, posteriormente, utilizada na determinação do teor de ligante asfáltico por meio da equação de cálculo prescrita na ABNT NBR 16208:2013.

2.5. Ensaio de granulometria

Após a finalização dos processos de extração de ligante pelos métodos Soxhlet, Rotarex e Mufla, os agregados recuperados foram submetidos à análise granulométrica com o objetivo de verificar se a distribuição granulométrica interferiu nos valores de teor de ligante obtidos nos ensaios. O procedimento seguiu as diretrizes da norma DNIT 031/2024 – ES, utilizando como referência a “Tabela 1 – Faixas granulométricas para concreto asfáltico” (Tabela 1), que estabelece os limites superior e inferior para a Faixa C.

Tabela 1 – Faixas granulométricas para concreto asfáltico.
Fonte: DNIT 031/2024 – ES

Peneira de malha quadrada		% passante, em massa			
		Faixas			
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	75-89	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	8-25	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

Para as amostras provenientes do forno Mufla, a análise contemplou todas as peneiras especificadas na referida tabela normativa. Adicionalmente, aplicou-se a “Tabela 3 – Tolerância da curva granulométrica para a produção do concreto asfáltico” (Tabela 2), para a definição dos limites de trabalho superior e inferior, garantindo maior rigor na avaliação da mistura.

Tabela 2 – Tolerância da curva granulométrica para a produção do concreto asfáltico. Fonte: DNIT 031/2024 – ES

Peneira de malha quadrada		
ASTM	Abertura (mm)	Tolerância (%)
1 ½”	38,10	-
1”	25,40	±7
¾”	19,10	±7
½”	12,70	±7
⅜”	9,50	±7
¼”	6,30	±7
Nº 4	4,80	±5
Nº 8	2,36	±5
Nº 16	1,18	±5
Nº 30	0,60	±5
Nº 50	0,30	±4
Nº 100	0,150	±3
Nº 200	0,075	±2

Conforme destacado por Leal et al. (2020), esse procedimento constitui uma etapa fundamental para validar a comparação entre os métodos de extração, uma vez que o teor de ligante é sensível à distribuição granulométrica dos agregados. De modo geral, quanto mais fina for a amostra, maior tende a ser o teor de ligante presente naquela fração.

Ressalta-se que, devido à ausência de limites normativos específicos na DNIT 031/2024 para as peneiras nº 10 (2,0 mm), nº 40 (0,425 mm) e nº 80 (0,18 mm), optou-se pela realização de interpolação linear entre os valores das Tabelas 1 e 3 da referida norma. Embora esse procedimento não seja permitido para fins de aprovação de projetos executivos rodoviários, a metodologia foi adotada exclusivamente para fins acadêmicos e de investigação científica, com o objetivo de possibilitar uma análise comparativa mais detalhada entre os diferentes métodos de extração nessas malhas intermediárias. Os valores obtidos por interpolação referentes às peneiras não contempladas na norma, com base na Tabela 1, estão apresentados na Tabela 3, enquanto os valores interpolados a partir da Tabela 2 encontram-se dispostos na Tabela 4.

Tabela 3 – Limites granulométricos interpolados da Faixa C. Fonte: Autor

Peneira de malha quadrada		% passante, em massa
		Faixa
ASTM	Abertura (mm)	C-12,5
Nº 10	2,00	44-72
Nº 40	0,42	13-36
Nº 80	0,18	4-20

Tabela 4 – Tolerâncias granulométricas interpoladas. Fonte: Autor

Peneira de malha quadrada		
ASTM	Abertura (mm)	Tolerância (%)
Nº 10	2,00	±5
Nº 40	0,42	±4
Nº 80	0,18	±3

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaio com Soxhlet

Os resultados dos ensaios de determinação do teor de ligante asfáltico pelo método Soxhlet estão apresentados na Tabela 5, na qual são apresentados os valores individuais, bem como o teor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios no Soxhlet.

Fonte: Autor

	Teor de ensaio	Teor Médio	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Amostra 01	5,16%	5,46%	0,34%	6,24%
Amostra 02	4,99%			
Amostra 03	5,56%			
Amostra 04	4,94%			
Amostra 05	5,73%			
Amostra 06	5,89%			
Amostra 07	5,83%			
Amostra 08	5,48%			
Amostra 09	5,64%			
Amostra 10	5,35%			

Considerando inicialmente o conjunto completo das dez amostras analisadas, foi obtido um teor médio de 5,46%, com desvio padrão de 0,34% e coeficiente de variação de 6,24%. Observou-se a presença de valores inferiores e superiores ao comportamento predominante do conjunto, contribuindo para o aumento da dispersão global dos resultados.

Essa maior variabilidade estatística, evidenciada pelo desvio padrão e pelo coeficiente de variação relativamente elevados, indicou a necessidade de avaliar a consistência do conjunto por meio de um critério objetivo para identificação de valores discrepantes. Dessa forma, adotou-se como procedimento estatístico a faixa correspondente à média ± 1 desvio padrão, com o objetivo de delimitar um intervalo representativo do comportamento central dos dados.

Com base nesse critério, definiu-se como intervalo de aceitação os valores compreendidos entre 5,12% e 5,80%. As amostras cujos teores de ligante se situaram dentro dessa faixa foram consideradas estatisticamente consistentes, enquanto aquelas externas ao intervalo foram classificadas como discrepantes e desconsideradas na análise subsequente.

Após a aplicação desse procedimento, permaneceram seis amostras dentro da faixa de aceitação (Amostras 01, 03, 05, 08, 09 e 10). A partir desse conjunto ajustado, foi recalculado o teor médio, obtendo-se o valor de 5,49%, com desvio padrão de 0,21% e coeficiente de variação de 3,81%.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios Soxhlet sem as amostras desconsideradas. Fonte: Autor

	Teor de ensaio	Teor Médio	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Amostra 01	5,16%	5,49%	0,21%	3,81%
Amostra 03	5,56%			
Amostra 05	5,73%			
Amostra 08	5,48%			
Amostra 09	5,64%			
Amostra 10	5,35%			

Verifica-se que a aplicação do critério estatístico resultou em redução significativa da dispersão dos dados, evidenciada pela diminuição do desvio padrão e do coeficiente de variação. Tal comportamento indica maior homogeneidade do conjunto remanescente e maior confiabilidade na estimativa final do teor de ligante determinado pelo método Soxhlet.

Em relação ao teor de ligante de referência da mistura, correspondente a 5,4%, o valor médio obtido após a aplicação do critério estatístico foi de 5,49%, representando diferença aproximada de 0,09%. Observa-se, portanto, que o resultado final permaneceu muito próximo ao teor de controle, apresentando leve tendência de superestimativa, porém dentro de uma margem reduzida, o que reforça a coerência dos resultados obtidos pelo método Soxhlet após a exclusão das amostras discrepantes.

Esse comportamento está de acordo com o observado na literatura. Silva e Fortes (2001) verificaram, em estudo comparativo entre os métodos Rotarex, Soxhlet e Mufla, que o método Soxhlet tende a apresentar teores mais elevados quando comparado ao método da mufla. Resultado semelhante também foi observado por Leal et al. (2020), que identificaram padrão semelhante de diferença entre os métodos, com o Soxhlet apresentando valores superiores aos obtidos por ignição.

Assim, observa-se que a exclusão das amostras estatisticamente discrepantes reduziu a variabilidade dos resultados e manteve o teor médio em patamar compatível com o comportamento descrito em outros estudos, reforçando a consistência da estimativa final obtida pelo método Soxhlet.

3.2. Ensaios com Mufla

3.2.1. Mufla Laboratório UFMS

Os valores do fator de calibração para o equipamento de ignição (mufla) do laboratório da UFMS foram obtidos a partir da média dos resultados de duas

amostras brancas ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios do fator de calibração. Fonte: Autor

Amostra 01	Amostra 02	Fator de Calibração
0,49%	0,39%	0,44%

Após a determinação desse fator, foram realizados os ensaios em três amostras contendo ligante, cujos resultados estão apresentados na Tabela 8. Verifica-se que a diferença entre os valores extremos de teor de ligante obtidos é inferior ao limite de 0,196% indicado pela norma AASHTO T 308-18 para ensaios realizados em um mesmo laboratório, evidenciando boa repetibilidade dos resultados.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios na Mufla. Fonte: Autor

	Teor de ensaio	Teor Médio	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Amostra 01	5,43%	5,40%	0,03%	0,49%
Amostra 02	5,39%			
Amostra 03	5,38%			

Considerando o teor de ligante de referência da mistura igual a 5,4%, observa-se que o valor médio obtido no laboratório da UFMS foi praticamente coincidente com o ponto de controle, apresentando diferença muito pequena em relação ao valor esperado, sendo levemente inferior ao valor de referência.

3.2.2. Mufla Laboratório TCE-MS

Os valores do fator de calibração para o equipamento de ignição (mufla) do laboratório do TCE-MS foram obtidos a partir da média dos resultados de duas amostras brancas ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios do fator de calibração. Fonte: Autor

Amostra 01	Amostra 02	Fator de Calibração
0,32%	0,25%	0,29%

Após a determinação desse fator, foram realizados os ensaios em três amostras contendo ligante, cujos resultados estão apresentados na Tabela 10. Verifica-se que a diferença entre os valores extremos de teor de ligante obtidos é inferior ao limite de 0,196% indicado pela norma AASHTO T 308-18 para ensaios realizados em um mesmo laboratório, evidenciando boa repetibilidade dos resultados.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios na Mufla. Fonte: Autor

	Teor de ensaio	Teor Médio	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Amostra 01	5,03%	5,11%	0,07%	1,30%
Amostra 02	5,14%			
Amostra 03	5,15%			

Em relação ao teor de referência da mistura (5,4%), o valor médio obtido no laboratório do TCE-MS apresentou diferença de aproximadamente 0,29%, sendo inferior ao ponto de controle, indicando uma tendência de subestimativa do teor de ligante.

3.2.3. Comparação entre os dois laboratórios

A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios realizados nas muflas dos laboratórios da UFMS e do TCE-MS foi realizada a partir dos valores médios de teor de ligantes determinados em cada local. Observa-se que a média obtida no laboratório da UFMS foi de 5,40%, enquanto no laboratório do TCE-MS foi de 5,11%, resultando em uma diferença entre as médias de 0,29%.

Conforme a norma AASHTO T 308-18, o valor aceitável de diferença entre resultados obtidos em laboratórios distintos é de aproximadamente 0,330%. Dessa forma, a diferença encontrada entre os dois laboratórios é inferior ao limite estabelecido, indicando que os resultados apresentam boa reprodutibilidade e estão em conformidade com o critério normativo.

Além disso, ao analisar os parâmetros estatísticos, verifica-se que os ensaios realizados no laboratório da UFMS apresentaram menor desvio padrão (0,03%) e menor coeficiente de variação (0,49%) quando comparados aos valores obtidos no laboratório do TCE-MS, que apresentaram desvio padrão de 0,07% e coeficiente de variação de 1,30%. Esse comportamento indica maior homogeneidade e precisão nos resultados obtidos na UFMS.

Essa menor variabilidade pode ser atribuída ao fato de que as amostras com teor de ligante previamente conhecido, utilizadas como referência para os ensaios, foram produzidas e preparadas no próprio laboratório da UFMS, o que tende a reduzir possíveis variações associadas ao manuseio e às condições de preparação do material.

3.3. Ensaios com Rotarex

Os resultados dos ensaios de determinação do teor de ligante asfáltico pelo método Rotarex estão apresentados na Tabela 11. Foram analisadas três amostras, cujos valores individuais, bem como o teor

médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação, encontram-se apresentados na referida tabela.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios no Rotarex. Fonte: Autor

	Teor de ensaio	Teor Médio	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Amostra 01	5,84%	5,76%	0,09%	1,49%
Amostra 02	5,67%			
Amostra 03	5,77%			

Observa-se que a diferença entre os valores extremos obtidos foi inferior ao limite adotado como referência. Como a norma utilizada para o ensaio Rotarex não estabelece um valor específico de variação aceitável entre resultados realizados em um mesmo laboratório, foi utilizado como parâmetro comparativo o critério indicado na AASHTO T 308-18 para o método da mufla, que estabelece um limite de repetibilidade de 0,196%. Dessa forma, verifica-se que a variação observada para o método Rotarex encontra-se abaixo desse valor, indicando boa consistência entre os resultados obtidos.

Considerando o teor de referência da mistura (5,4%), o valor médio obtido pelo método Rotarex apresentou diferença de aproximadamente 0,36%, sendo superior ao ponto de controle, indicando uma tendência de superestimativa do teor de ligante.

Além disso, após a realização dos ensaios, foi observada visualmente a presença de ligante aderido aos agregados recuperados, conforme apresentado na Figura 9. Esse fato indica que, em algumas determinações, pode não ter ocorrido a remoção completa do ligante asfáltico durante o processo de extração, o que pode ter influenciado os valores obtidos para o teor de ligante pelo método Rotarex.

Figura 9 – Amostra com ligante. Fonte: Autor



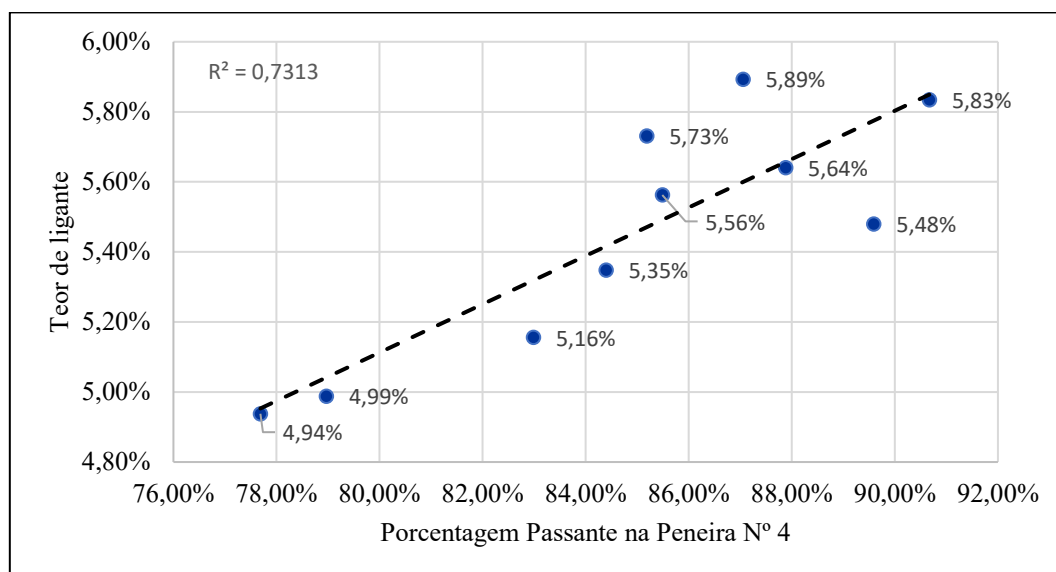
3.4. Ensaios de granulometria

3.4.1. Soxhlet

Como o método Soxhlet foi o único que apresentou maior flutuação nos valores de teor de ligante ao longo dos ensaios, realizou-se inicialmente uma análise das curvas granulométricas dos agregados recuperados. Verificou-se que, dentre as dez amostras analisadas, duas (Amostras 4 e 7) apresentaram pontos fora da faixa de trabalho estabelecida pela DNIT 031/2024-ES, enquanto as demais permaneceram dentro dos limites especificados.

Diante desse comportamento, foi realizada uma análise complementar considerando a influência da fração de agregados miúdos (material passando na peneira nº 4) e da fração fina (material passando na peneira nº 200) sobre os valores de teor de ligante obtidos. Conforme apresentado no Gráfico 1, observa-se uma tendência de relação entre o teor de ligante e a porcentagem de material passando na peneira nº 4, na qual amostras com menores teores de ligante apresentaram menores percentuais de material miúdo, enquanto amostras com maiores teores apresentaram maiores percentuais passantes nessa peneira.

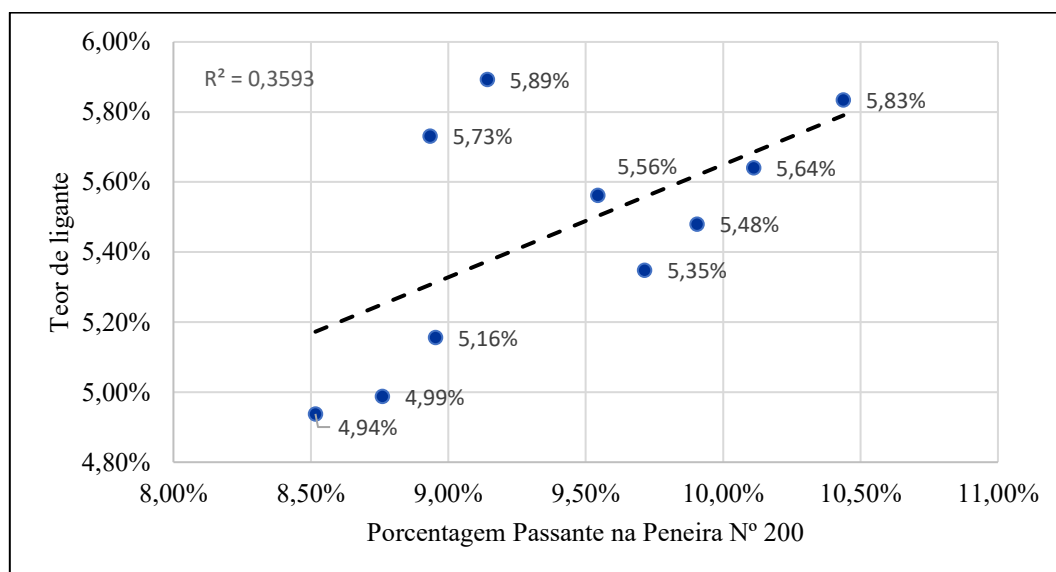
Gráfico 1 – Relação entre teor de ligante e o material passante na peneira Nº 4 – Soxhlet. Fonte: Autor



Comportamento semelhante foi observado para a fração fina, referente ao material passante na peneira nº 200, conforme apresentado no Gráfico 2. De modo

geral, verificou-se que quanto maior a quantidade de material fino presente na mistura, maior foi o teor de ligante determinado pelo método Soxhlet.

Gráfico 2 – Relação entre teor de ligante e o material passante na peneira Nº 200 – Soxhlet. Fonte: Autor



Assim, observa-se que as amostras iniciais (Amostras 1, 2 e 4) apresentaram menores porcentagens de material miúdo e fino, o que contribuiu para a obtenção de valores mais baixos de teor de ligante nessas determinações. Esse comportamento ajuda a explicar a maior variabilidade observada nos resultados do método Soxhlet quando comparado aos demais métodos analisados.

3.4.2. Mufla Laboratório UFMS

Nos Gráficos 3, 4 e 5 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados recuperados após os

ensaios realizados na mufla do laboratório da UFMS. Observa-se que as distribuições granulométricas obtidas permanecem inseridas dentro dos limites da faixa de trabalho estabelecida pela DNIT 031/2024–ES em todas as peneiras analisadas. Dessa forma, verifica-se que o processo de extração por ignição não provocou alterações significativas na composição granulométrica do material.

Gráfico 3 – Curva granulométrica Amostra 1 – Mufla UFMS. Fonte: Autor

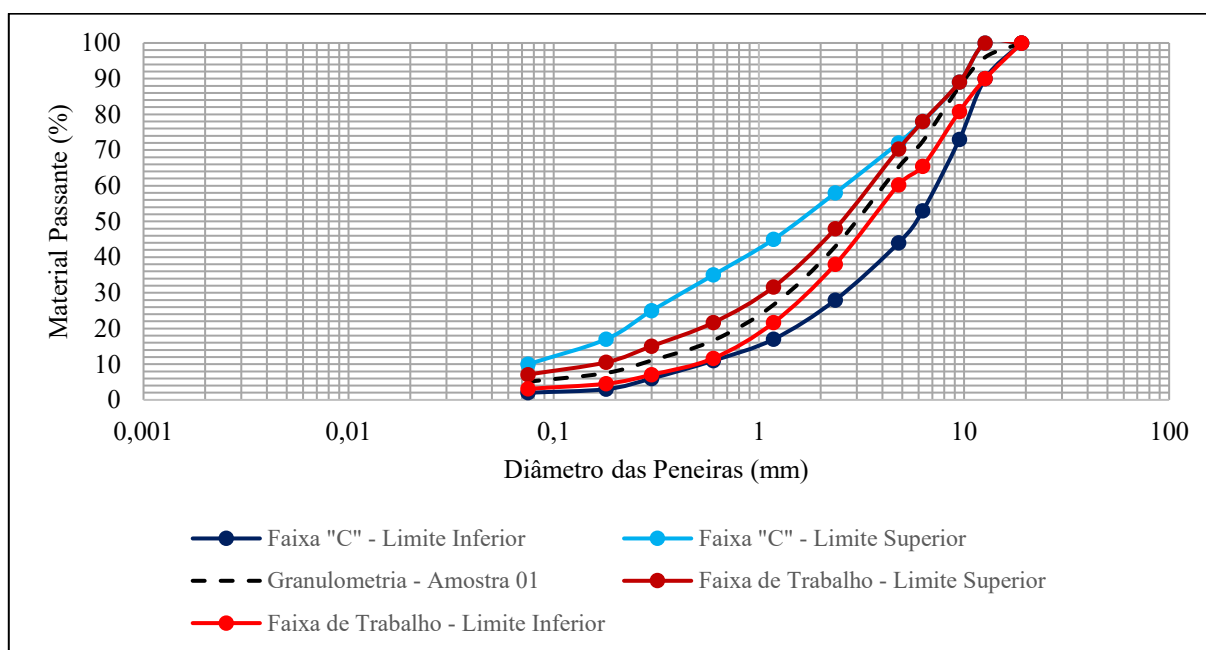


Gráfico 4 – Curva granulométrica Amostra 2 – Mufla UFMS. Fonte: Autor

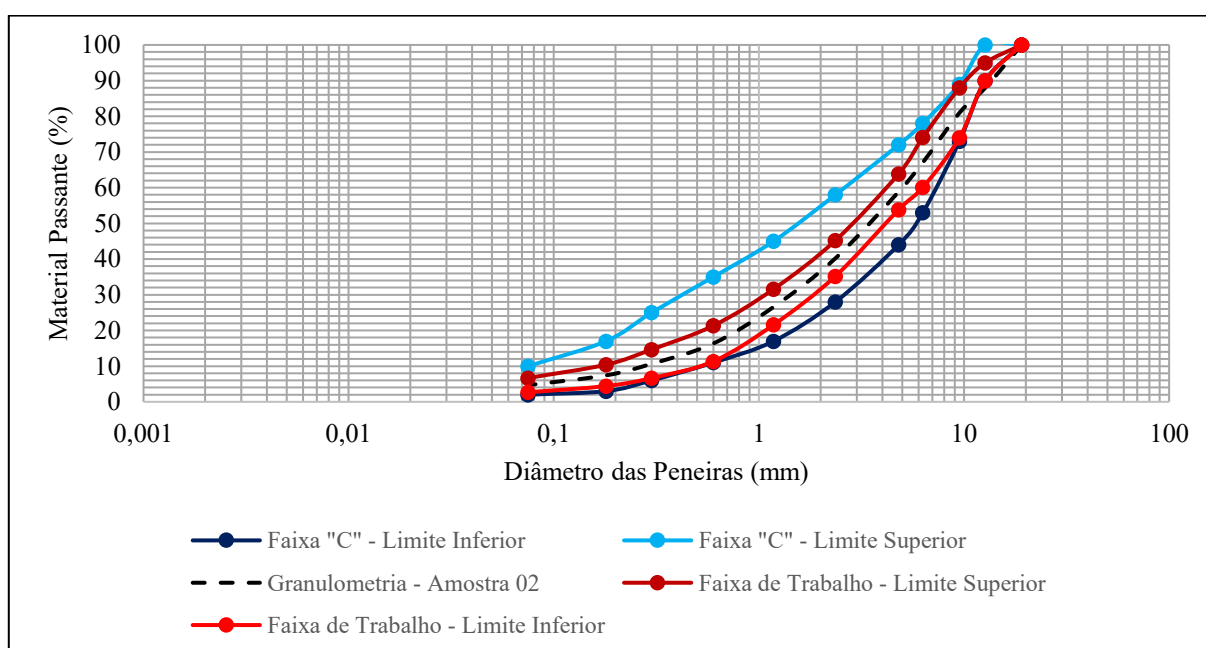
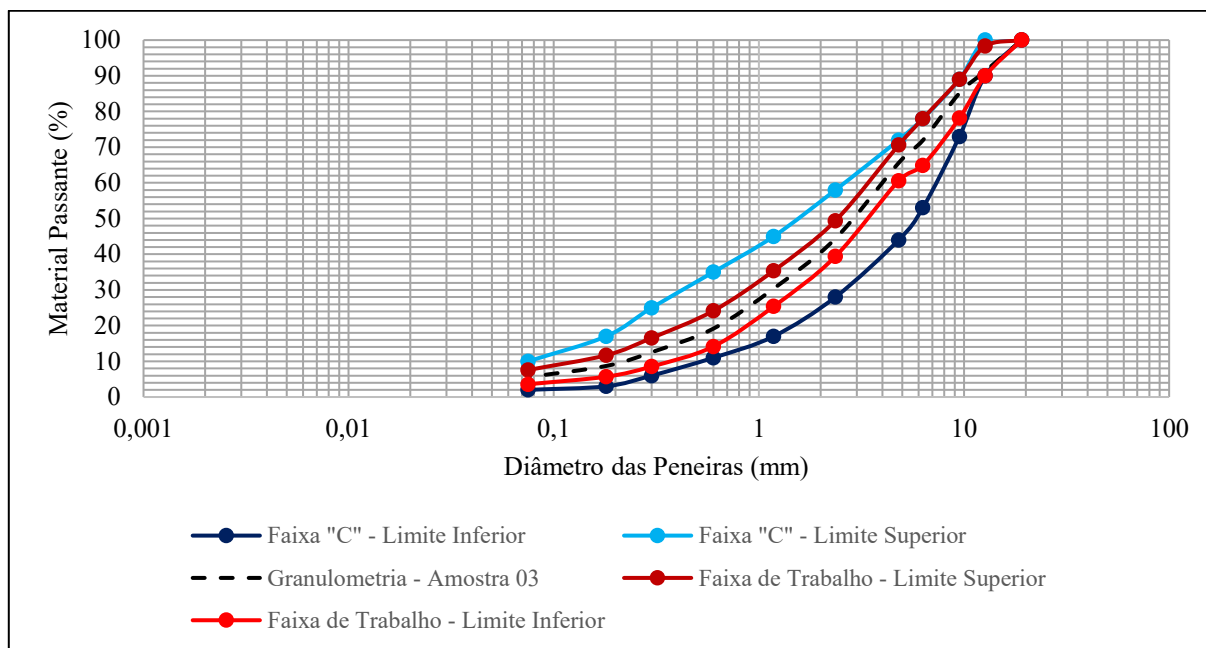


Gráfico 5 – Curva granulométrica Amostra 3 – Mufla UFMS. Fonte: Autor



3.4.3. Mufla Laboratório TCE-MS

Nos Gráficos 6, 7 e 8 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados recuperados após os ensaios realizados na mufla do laboratório do TCE-MS. Nota-se que as curvas apresentam

comportamento semelhante entre as amostras e se mantêm dentro dos limites da faixa de trabalho especificada pela DNIT 031/2024-ES. Esse resultado indica que o processo de extração preservou a distribuição granulométrica da mistura, não sendo observadas alterações relevantes após o ensaio.

Gráfico 6 – Curva granulométrica Amostra 1 – Mufla TCE-MS. Fonte: Autor

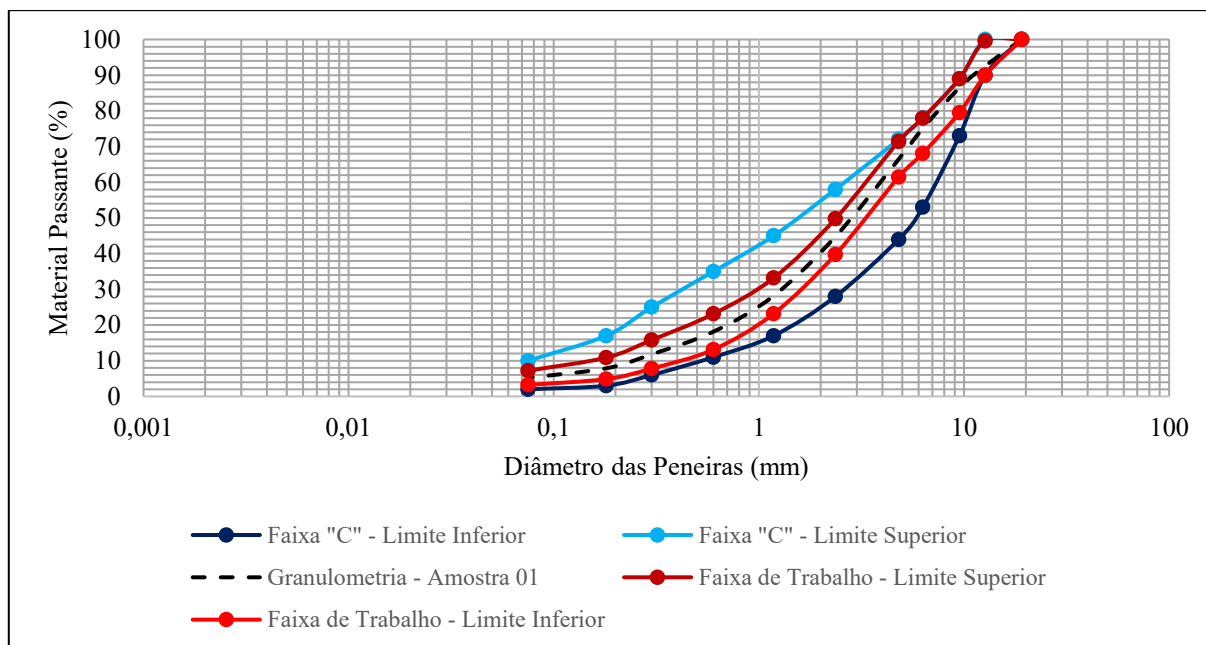


Gráfico 7 – Curva granulométrica Amostra 2 – Mufla TCE-MS. Fonte: Autor

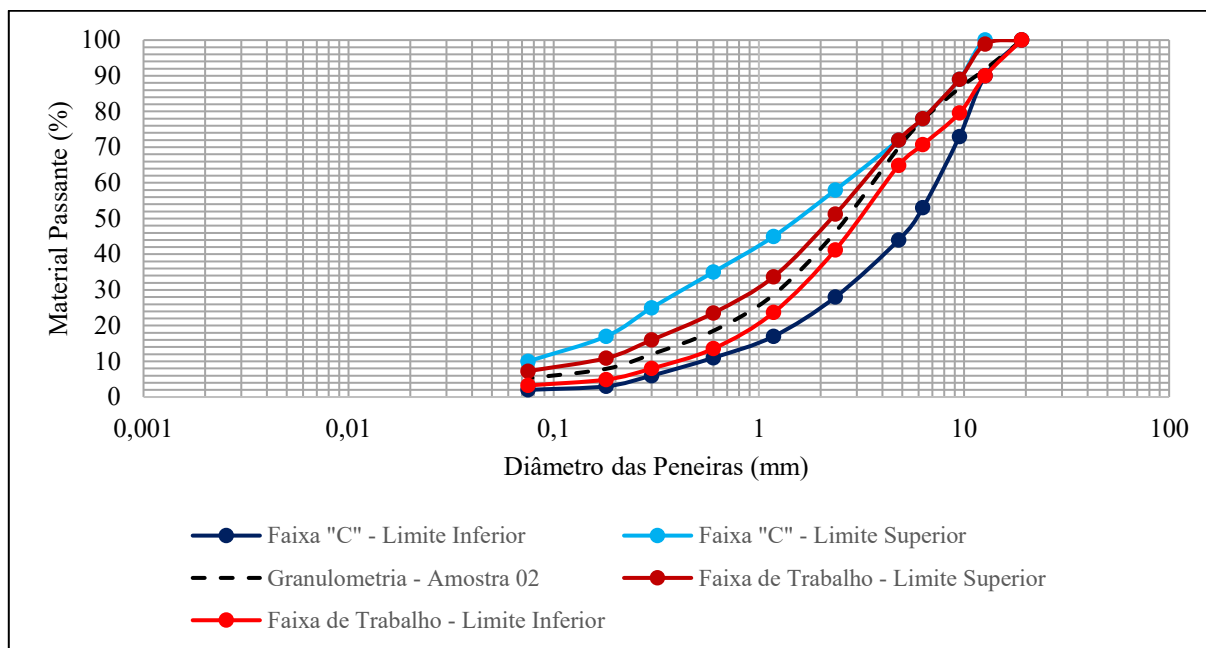
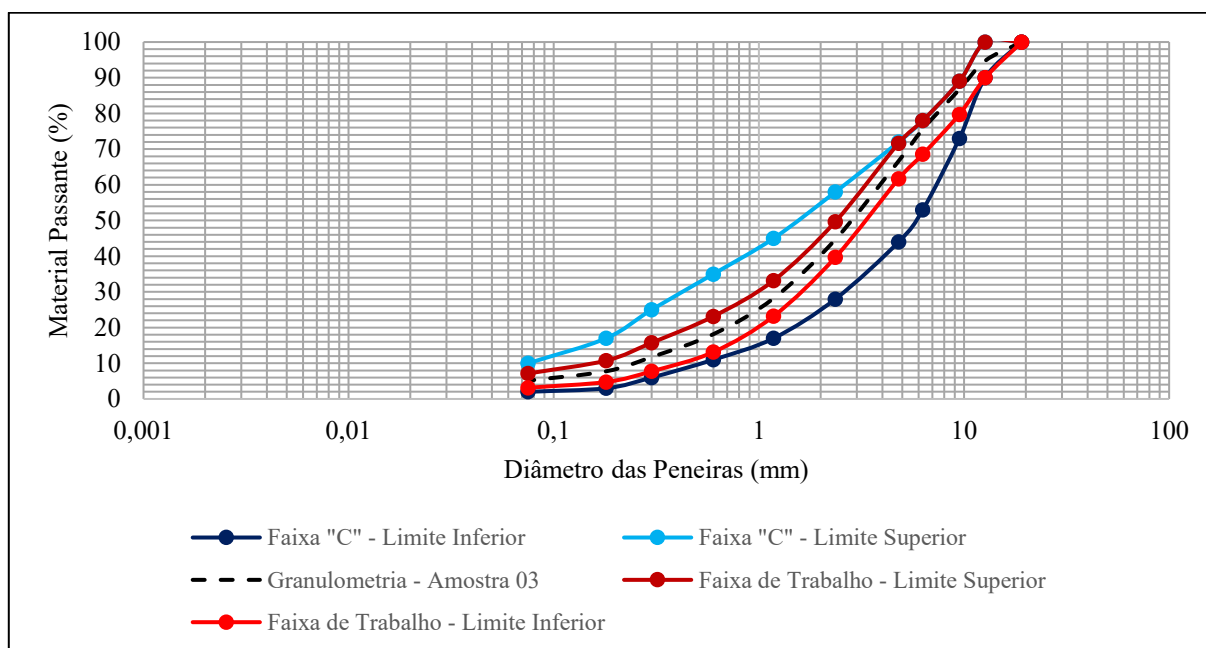


Gráfico 8 – Curva granulométrica Amostra 3 – Mufla TCE-MS. Fonte: Autor



3.4.4. Rotarex

Nos Gráficos 9, 10 e 11 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados recuperados após os ensaios realizados pelo método Rotarex. Verifica-se que as curvas obtidas apresentam distribuição

contínua e permanecem enquadradas dentro da faixa de trabalho definida pela DNIT 031/2024–ES ao longo das peneiras avaliadas. Assim, observa-se que o processo de extração por centrifugação não promoveu modificações significativas na composição granulométrica dos agregados recuperados.

Gráfico 9 – Curva granulométrica Amostra 1 – Rotarex. Fonte: Autor

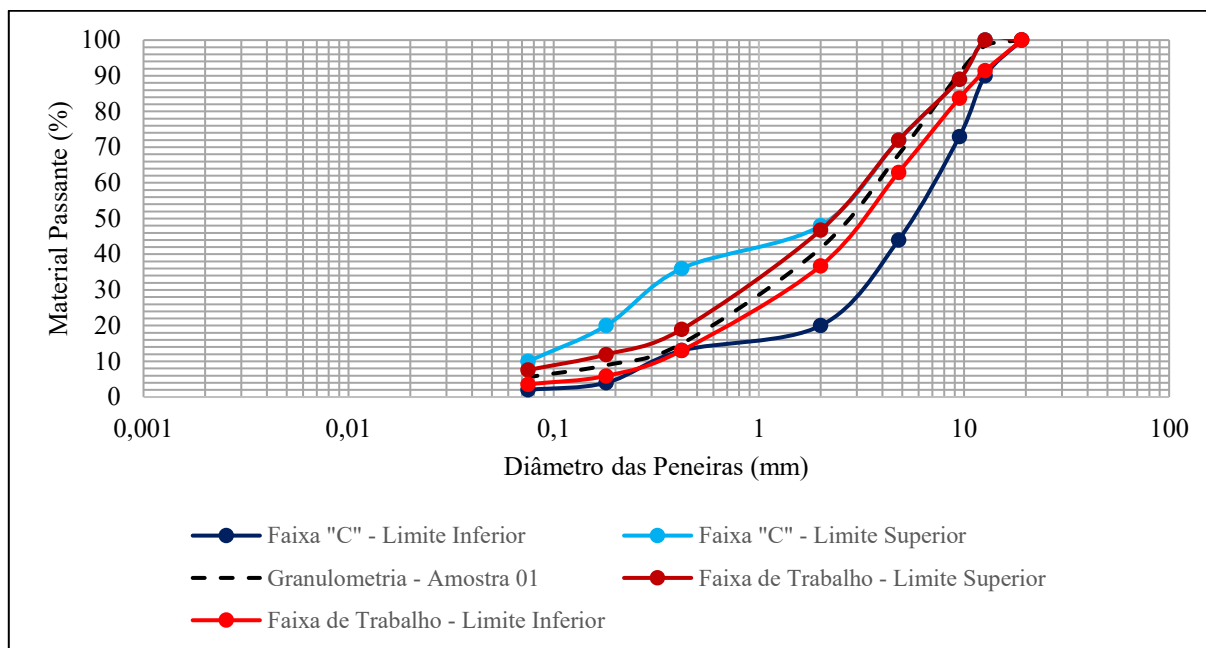


Gráfico 10 – Curva granulométrica Amostra 2 – Rotarex. Fonte: Autor

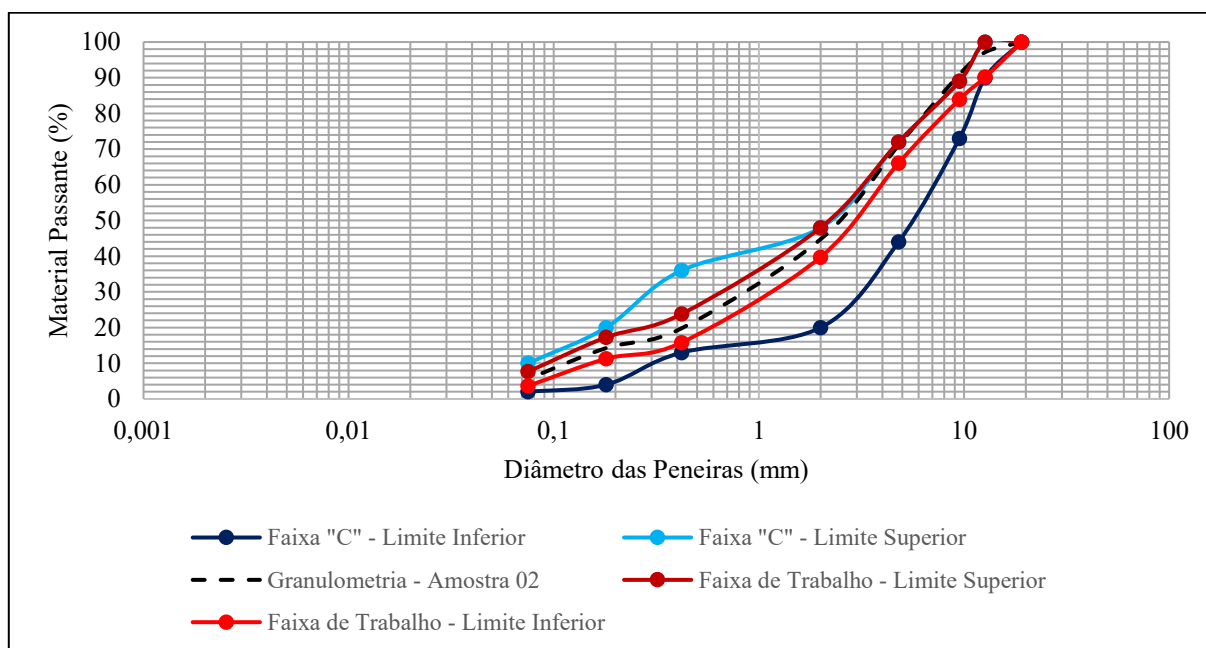
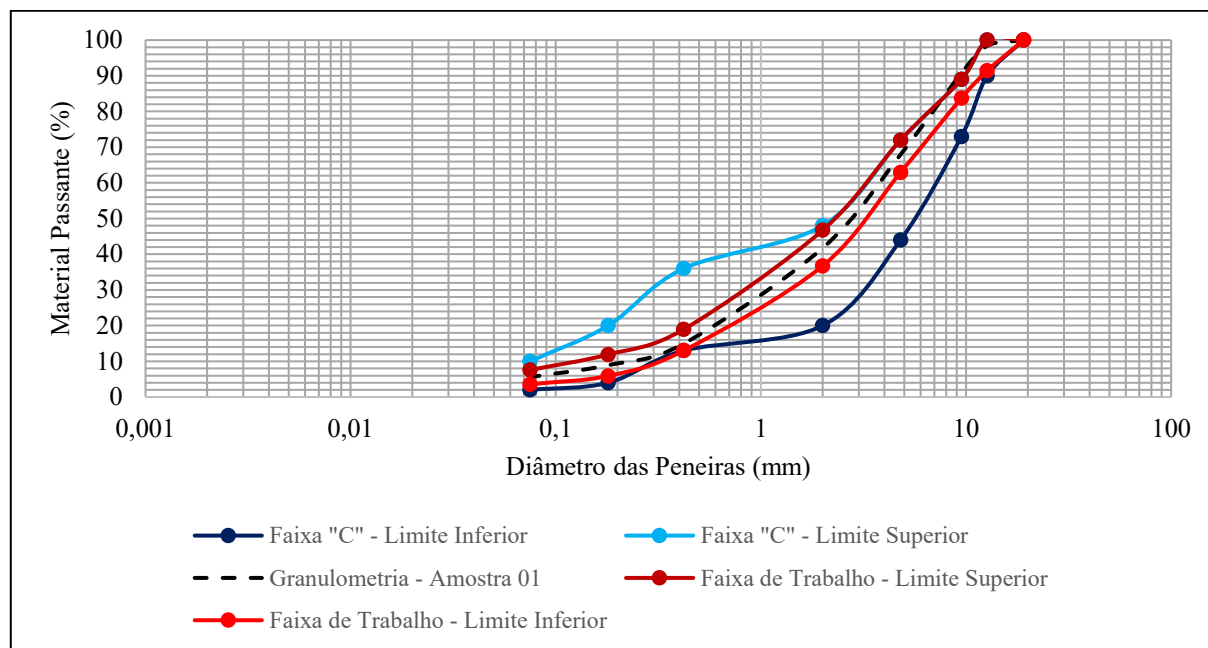


Gráfico 11 – Curva granulométrica Amostra 3 – Rotarex. Fonte: Autor



4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível comparar o desempenho dos métodos de extração por mufla, Rotarex e Soxhlet na determinação do teor de ligante asfáltico, adotando-se como referência o teor de controle de 5,4%. A análise conjunta dos dados permitiu avaliar não apenas a proximidade dos resultados em relação ao valor esperado, mas também a repetibilidade e a sensibilidade de cada método às características das amostras.

O método da mufla apresentou os resultados mais consistentes e próximos do teor de referência, além de menor variação entre as amostras analisadas. No laboratório da UFMS, o teor médio obtido foi de 5,40%, coincidindo com o valor de controle, enquanto no laboratório do TCE-MS foi de 5,11%, correspondendo a uma diferença de 0,29%. A discrepância entre as médias dos dois laboratórios também foi de 0,29%, valor inferior ao limite de 0,330% estabelecido pela AASHTO T 308-18 para ensaios conduzidos em locais distintos, evidenciando boa reprodutibilidade e concordância entre os resultados. Complementarmente, as análises granulométricas indicaram que os agregados recuperados permaneceram dentro da faixa de trabalho definida pela DNIT 031/2024-ES, demonstrando que o método não provocou alterações significativas na distribuição granulométrica.

Para o método Rotarex, o teor médio obtido foi de 5,76%, apresentando diferença aproximada de 0,36% acima do valor de referência, o que indica uma

tendência à superestimativa. Durante a avaliação visual do material após o ensaio, observou-se a presença de ligante aderido aos agregados, fator que pode ter influenciado diretamente nos resultados e contribuído para os valores mais elevados encontrados.

O método Soxhlet, por sua vez, apresentou maior dispersão entre os resultados ao longo das amostras ensaiadas. O teor médio geral foi de 5,49%, valor próximo ao teor de referência, porém com variabilidade superior à observada nos demais métodos. Verificou-se que as amostras que apresentaram teores mais baixos estavam associadas a menores porcentagens de material passando nas peneiras nº 4 e nº 200. A análise indicou ainda que amostras com maior quantidade de material miúdo e fino tendem a apresentar teores mais elevados de ligante, evidenciando a influência direta da granulometria sobre os resultados obtidos por esse método.

De modo geral, conclui-se que o método da mufla apresentou melhor desempenho global, destacando-se pela maior proximidade em relação ao teor de controle, menor variabilidade entre as determinações e boa reprodutibilidade entre diferentes laboratórios. O método Rotarex demonstrou tendência de superestimativa possivelmente associada à presença de ligante residual após o ensaio, enquanto o Soxhlet mostrou-se mais sensível às variações granulométricas das amostras, refletindo em maior dispersão dos resultados. Esses achados reforçam a importância da escolha adequada do método de extração, considerando as condições de ensaio e as

características do material analisado, para garantir maior confiabilidade na determinação do teor de ligante em misturas asfálticas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFMS e ao curso de Engenharia Civil pela formação. Ao Professor Daniel Anijar de Matos, pela orientação e pela liberação do laboratório da universidade. Ao técnico Andre Menezes Fermino, pelo auxílio essencial na execução dos ensaios. Agradeço também a Gabriel Araujo Silva Marques e ao TCE-MS, pela colaboração e permissão para utilização de suas instalações laboratoriais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 308-18: Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Asphalt Mixtures by the Ignition Method. Washington, DC, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16208: Misturas asfálticas — determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. Rio de Janeiro, 2013. informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ADEBEE, 2008.
- CARVALHO, A. L. Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Asfalto Fresado. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.
- CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2024: relatório principal. Brasília: CNT, 2024
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 053/94: Misturas betuminosas - determinação do teor de betume. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2024-ES: Pavimentos asfálticos - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 158/2011-ME: Misturas asfálticas - Determinação do teor de ligante pelo método de ignição - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.
- LEAL, Kindelly dos Santos; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; SOUZA, Thenisson Amorim de; SILVA NETO, Francisco Antônio da; COSTA, Weiner Gustavo Silva. Avaliação da eficiência da mufla na extração de ligantes de misturas asfálticas densas. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 34., 2020, evento digital. Anais... 2020.
- SILVA, P. B.; FORTES, R. M. Estudo comparativo entre os ensaios Rotarex, Soxlet e Mufla na determinação do teor de betume de uma massa asfáltica. In: SYMPOSIUM ON MAINTENANCE AND REHABILITATION OF PAVEMENTS AND TECHNOLOGICAL CONTROL, 2., 2001, Auburn. Anais... Auburn, Alabama: 2001. p. 1-13.