

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Douglas Gurgel Maia dos Santos

**MELHORIA DA DURABILIDADE E RESISTÊNCIA DO CBUQ COM ADIÇÃO
DE GRELHAS DE POLÍMERO RECICLADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Belo Horizonte – MG

2026

DOUGLAS GURGEL MAIA DOS SANTOS

**MELHORIA DA DURABILIDADE E RESISTÊNCIA DO CBUQ COM ADIÇÃO DE
GRELHAS DE POLÍMERO RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Graduação em Engenharia de Transportes do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Professor Doutor Geraldo Magela Damasceno.

Coorientador: Professor Doutor Mateus Justino da Silva.



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 6 / 2026 - CETR (11.51.07)

Nº do Protocolo: 23062.035366/2026-18

Belo Horizonte-MG, 08 de julho de 2026.

Douglas Gurgel Maia dos Santos

**MELHORIA DA DURABILIDADE E RESISTÊNCIA DO CBUQ COM ADIÇÃO DE GRELHAS DE
POLÍMERO RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Atividade de Projeto Final de Curso II, do curso de Graduação em Engenharia de Transportes do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em 18 de junho de 2026

Banca examinadora:

Dr. Geraldo Magela Damasceno — Orientador

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Dr. Mateus Justino da Silva — Coorientador

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Dr. André Henrique Campos Teixeira

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

M.e Mário de Souza Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

BELO HORIZONTE

2026

(Assinado digitalmente em 09/07/2026 10:42)

ANDRE HENRIQUE CAMPOS TEIXEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: 2089478

(Assinado digitalmente em 09/07/2026 10:09)

GERALDO MAGELA DAMASCENO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: 1450794

(Assinado digitalmente em 09/07/2026 10:17)

MARIO DE SOUZA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: 1812301

(Assinado digitalmente em 09/07/2026 10:33)

MATEUS JUSTINO DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: 3568965

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **6**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:
08/07/2026 e o código de verificação: **88e14839d1**

Santos, Douglas Gurgel Maia dos.
S237m Melhoria da durabilidade e resistência do CBUQ com adição de
grelhas de polímero reciclado / Douglas Gurgel Maia dos Santos. –
2026.
55 f. : il.
Orientador: Geraldo Magela Damasceno.
Coorientador: Mateus Justino da Silva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia
de Transportes, Belo Horizonte, 2026.

Bibliografia.

1. Engenharia de Transportes. 2. Pavimentação. 3. Pavimentos
de betume. 4. Sustentabilidade. 5. Geogrelhas. 6. Polietileno
tereftalato. I. Damasceno, Geraldo Magela. II. Silva, Mateus Justino
da. III. Título. CDD: 625.85

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por sua infinita misericórdia e por nunca ter deixado desistir, mesmo nos momentos mais difíceis. A minha esposa, meu alicerce, que esteve ao meu lado em todas as barreiras e acreditou em mim quando poucos acreditaram. Ao meu grande amigo e mestre, Jamilson Marcos, por todo companheirismo, ensinamento e dedicação ao longo da minha trajetória nas artes maciais.

Aos meus professores, Doutor Geraldo Magela Damasceno e Doutor Mateus Justino da Silva pela orientação, sabedoria e inspiração constante.

Cada um de vocês fez parte da minha caminhada e do homem que me tornei hoje. Minha gratidão será eterna.

GURGEL, Douglas M. S. **Melhoria da Durabilidade e Resistência do CBUQ com Adição de Grelhas de Polímero Reciclado**. Orientador: Prof. Dr. Geraldo Magela Damasceno. 2025. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Transportes. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2026.

RESUMO

De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias (2024), a malha viária brasileira possui 1.720.909 km de extensão, dos quais apenas 213,5 mil km (12,4%) são pavimentados. Destes, aproximadamente 99% correspondem a pavimentos do tipo flexível, enquanto 1,35 milhão de km (78,5%) ainda não possuem pavimentação. Diante desse cenário, diversos estudos têm investigado a incorporação de resíduos reciclados em misturas asfálticas, visando soluções mais sustentáveis para o setor rodoviário, com menor consumo de recursos não renováveis, redução de custos e aumento da durabilidade dos pavimentos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) modificado com grelhas de polímero reciclado (PET), em comparação às misturas convencionais, considerando aspectos de resistência mecânica e relação custo-benefício. Foram produzidas misturas contendo 1% e 2% de PET em forma de grelha, aplicadas como camada adicional no CBUQ.

Palavras-chave: Pavimentação; Sustentabilidade; Concreto Betuminoso Usinado a Quente; Grelhas de polímeros reciclados; PET.

GURGEL, Douglas M. S. **Improvement of Durability and Strength of HMA with Addition of Recycled Polymer Grids**. Advisor: Prof. Dr. Geraldo Magela Damasceno. 2025. 64 f. Undergraduate Thesis (Bachelor's in Transportation Engineering) – Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

ABSTRACT

According to the 2024 CNT Road Survey, the Brazilian road network comprises 1,720,909 km, of which only 213.5 thousand km (12.4%) are paved. Of this total, approximately 99% consist of flexible pavements, while 1.35 million km (78.5%) remain unpaved. In this context, several studies have investigated the incorporation of recycled materials into asphalt mixtures, aiming at more sustainable solutions for the road sector, with lower consumption of non-renewable resources, cost reduction, and increased pavement durability. This research aimed to evaluate the performance of Hot Mix Asphalt (HMA) modified with recycled polymer grids (PET), in comparison with conventional mixtures, considering mechanical resistance and cost-benefit ratio. Mixtures containing 1% and 2% of PET in grid form were produced and applied as an additional layer in the HMA. The tests were carried out at the Pavement Laboratory of the Department of Transportation Engineering (DET), Campus Nova Suíça, focusing on the analysis of the physical and mechanical properties of the material.

Keywords: Pavement; Sustainability; Hot Mix Asphalt; Recycled polymer grids; PET.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IRR	Índice Nacional de Recuperação de Resíduos
PET	Politereftalato de Etileno
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção típica de um pavimento flexível em concreto asfáltico	6
Figura 2 - Comportamento das tensões em seção típica de um pavimento flexível em concreto asfáltico	7
Figura 3 - Quadro de Classificação dos polímeros.....	9
Figura - 04 Fluxos das etapas para o ensaio.....	14
Figura 5 - Fonte das grelhas de PET utilizadas na pesquisa.....	16
Figura 6 - Esquema do ensaio de compressão diametral.....	20
Figura 7 - Equipamento utilizado no ensaio de compressão (esquerda) e peça de medição de fluência (direita).....	21
Figura 8 - ilustra a configuração de posicionamento do corpo de prova no equipamento.....	21
Figura 09 - Instrumentação do ensaio de curva granulométrica.....	23
Figura 10 - Confeção da grelha.....	26
Figura 11 - Pesagem do material para moldagem.....	27
Figura 12 - Etapas da moldagem da mistura de CBUQ.....	28
Figura 13 - Alocação e submersão em água dos CPs.....	29
Figura 14 - Grelhas de PET cortadas para aferição da massa (dosagem 2%)	31
Figura 15 - Homogeneização e identificação dos CPs com grelha.....	32
Figura 16 - Resultado visual da compactação dos CPs – 2% de Grelha/10cm.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cronograma de execução da pesquisa (março a maio de 2026).....	5
Tabela 2 - Resultados da utilização de resíduos plásticos em misturas asfálticas....	10
Tabela 3 - Ferramentas e equipamentos para realização da pesquisa.....	15
Tabela 4 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP).....	17
Tabela 5 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico.....	19
Tabela 6 - Relação de corpos de prova a serem moldados.....	19
Tabela 7 - Análise granulométrica do agregado graúdo – brita 0.....	23
Tabela 8 - Análise granulométrica do agregado miúdo – areia.....	24
Tabela 9 - Análise granulométrica do agregado miúdo – pó de pedra.....	24
Tabela 10 - Dosagem dos corpos de prova de revestimento betuminoso.....	27
Tabela 11 - Resultados do ensaio de compressão diametral – CPs sem Grelha.....	30
Tabela12 - Resultados do ensaio de compressão diametral – CPs com grelha.....	34
Tabela13 – Resultados do ensaio de compressão diametral – CPs com grelha.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas granulométricas agregados graúdos.....	25
Gráfico 2 - curvas granulométricas agregados miúdos.....	25
Gráfico 3 - Resultado do ensaio de compressão diametral –CPs sem grelhas.....	30
Gráfico 4 - Resultado do ensaio de compressão diametral –CPs com grelhas.....	34
Gráfico 5 – Resultado do ensaio de compressão diametral –CPs com grelhas.....	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1.1. Objetivos Gerais.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL	5
2.1.1. Composição do revestimento.....	6
2.1.2. Propriedades mecânicas das Misturas Asfálticas	6
2.2. POLÍMEROS.....	7
3. METODOLOGIA	11
3.1. RESULTADOS OBTIDOS COM A ADIÇÃO DAS GRELHAS E ÀS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	12
3.2. Potenciais impactos ambientais do uso do pet como grelha no revestimento flexível.....	15
3.3. MÉTODOS de ensaio para aplicação de grelhas	15
3.4. Equipamentos utilizados	16
3.5. Coleta, separação e organização dos materiais	17
3.6. Caracterização do CAP	18
3.7. Caracterização do agregado graúdo	19
3.8. Caracterização do agregado miúdo	20
3.9. Definição da dosagem dos corpos de prova	20

3.10. Dosagem e moldagem dos corpos de prova	21
3.11. Ensaio para caracterização das propriedades mecânicas.....	22
3.12. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral e fluência	22
4. RESULTADOS	24
4.1. Determinação da curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos.....	24
4.2. Confecção das grelhas utilizadas	28
4.3. Moldagem e ruptura dos corpos de prova sem fibra	29
4.4. Moldagem e ruptura dos corpos de prova com fibra	33
5. CONCLUSÕES FINAIS.....	38
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

O avanço do crescimento populacional associado à intensificação do processo de industrialização tem elevado significativamente a geração de resíduos, cujo acúmulo se tornou um dos grandes desafios ambientais contemporâneos. O Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos, elaborado pelo SINIR (2019), indica que o Índice Nacional de Recuperação de Resíduos (IRR) no Brasil corresponde a apenas 1,67%. Esse índice resulta da relação entre a soma das práticas de reutilização, reciclagem e recuperação energética e o volume total de resíduos sólidos urbanos gerados. Tal indicador revela que apenas uma fração mínima dos resíduos produzidos recebe destinação sustentável, enquanto a maior parte é direcionada a aterros, lixões ou descartada de forma inadequada em cursos d'água e oceanos.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2022), publicado pela Abrelpe, aponta que 39% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda têm disposição final inadequada. Esses resíduos são compostos predominantemente por matéria orgânica, incluindo restos e perdas de alimentos, resíduos vegetais e madeira, que representam 45,3%. Já os recicláveis secos somam 33,6%, com destaque para plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidro (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%).

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de soluções voltadas ao aproveitamento de resíduos plásticos, com ênfase no politereftalato de etileno (PET), objeto desta pesquisa. Segundo MacDonald (2002), o PET consolidou-se como um dos termoplásticos de maior relevância na produção mundial, devido à combinação de propriedades mecânicas e térmicas associadas ao baixo custo de fabricação.

Pesquisas recentes têm explorado a inserção de resíduos reciclados em diferentes estruturas de engenharia, buscando alternativas que promovam sustentabilidade, redução do uso de matérias-primas não renováveis e menores custos de implantação. Entre tais estruturas, destacam-se os pavimentos, foco central deste estudo, que tem como proposta avaliar a introdução de grelhas de polímero reciclado entre as camadas do pavimento asfáltico, a fim de melhorar a capacidade de resistência e a durabilidade da estrutura em comparação às misturas convencionais.

A Pesquisa CNT de Rodovias (2024) evidencia que a malha viária brasileira possui 1.720.909 km de extensão, dos quais apenas 213,5 mil km (12,4%) são pavimentados. As rodovias não pavimentadas representam a maior parte do sistema, com 1,35 milhão de km (78,5%). Além disso, entre as rodovias pavimentadas, cerca de 99% correspondem a pavimentos do tipo flexível.

“Um pavimento flexível é aquele que tem revestimento asfáltico e camada de base granular. A distribuição das tensões e deformações, geradas na estrutura pelas cargas de roda do tráfego, se dá de modo que as camadas de revestimento e base aliviem as tensões verticais de compressão no subleito por meio da “absorção” de tensões cisalhantes. Neste processo, ocorrem tensões e deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, as quais provocarão seu trincamento por fadiga com a repetição das cargas do tráfego. Ao mesmo tempo, a repetição das tensões e deformações verticais de compressão, que atuam em todas as camadas do pavimento, levarão à formação de afundamentos em trilha de roda, quando o tráfego tender a ser canalizado, e à ondulação longitudinal da superfície, quando a heterogeneidade do pavimento for significativa. (GONÇALVES, 1999).”

Projetos de pavimentos flexíveis com vida útil de 10 anos, executados de acordo com as especificações e com a atuação dos esforços esperados, iniciam o processo de degradação antes do prazo definido em projeto (MELLO et al., 2016). Um dos problemas encontrados no Brasil, relacionados à estrutura dos pavimentos flexíveis, é o não atendimento às exigências técnicas tanto da capacidade de suporte das camadas como da qualidade dos materiais empregados no revestimento (CNT, 2022).

1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos Gerais

Foi Avaliado a proporção de adição de grelhas de polímeros reciclados que teve como objetivo uma melhora da resistência do pavimento flexível e determinação com a relação de custo benefício em relação as misturas tradicionais.

1.1.2. Objetivos Específicos

Este trabalho teve como objetivos específicos:

- a) Realizar testes de resistência em corpos de prova sem e com adição de grelhas;
- b) Definir o melhor traço do concreto do pavimento flexível;
- c) Definir a melhor proporção de adição de grelhas no traço do pavimento flexível;
- d) Avaliar o comportamento da grelha de PET em diferentes temperaturas;
- e) Definir a melhor forma de disposição da grelha no corpo de prova do pavimento flexível;
- f) Verificar a melhoria da resistência do pavimento com a adição gradual de grelhas.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A crescente escassez de materiais nobres utilizados na pavimentação, somada ao elevado custo de aquisição e transporte desses insumos, tem se destacado como um dos principais entraves para a execução de projetos rodoviários no Brasil. Além disso, a indisponibilidade de áreas adequadas para extração de materiais em jazidas doadoras intensifica esse desafio, uma vez que limita o acesso a recursos tradicionalmente empregados na construção de pavimentos flexíveis. Paralelamente, observa-se no ambiente urbano e rural o acúmulo expressivo de resíduos sólidos, entre os quais se destaca o volume significativo de garrafas PET descartadas de forma inadequada. Esse cenário evidencia não apenas um problema ambiental, mas também a necessidade urgente de desenvolver alternativas tecnológicas sustentáveis que integrem eficiência construtiva, redução de impactos ambientais e viabilidade econômica.

Nesse contexto, o presente trabalho de pesquisa propõe a investigação e a validação da eficácia da incorporação de geogrelhas confeccionadas a partir de garrafas PET recicladas como elemento de reforço em revestimentos de pavimentos flexíveis. A utilização desse tipo de grelha, produzido a partir de um resíduo amplamente disponível e de baixo custo, representou uma oportunidade de transformar um passivo ambiental em um recurso de valor agregado para a engenharia rodoviária. Seu objetivo é que a aplicação das grelhas de PET reciclado contribua não apenas para a redução do consumo de materiais convencionais, mas também para a

mitigação dos custos globais associados à construção e à manutenção da infraestrutura viária.

Além disso, o estudo buscou verificar o potencial desse reforço polimérico em aprimorar o desempenho mecânico e estrutural do pavimento, aumentando sua capacidade de suporte, reduzindo a suscetibilidade à deformação permanente e prolongando sua vida útil. Além disso, este estudo buscou compreender, de forma prática e aplicável, como o uso de grelhas produzidas a partir de PET reciclado pode melhorar o desempenho real dos pavimentos.

Esperamos que esse reforço contribua para aumentar a capacidade de suporte das camadas, reduzir deformações ao longo do tempo e prolongar a vida útil das estruturas viárias. Mais do que uma solução técnica, trata-se de uma proposta que dialoga diretamente com os princípios da sustentabilidade e da economia circular, ao transformar um resíduo comum do nosso cotidiano em um recurso capaz de gerar benefícios concretos para a sociedade. Assim, a pesquisa pretende não apenas avançar no campo da engenharia de pavimentos, mas também incentivar práticas mais responsáveis, acessíveis e alinhadas às demandas ambientais e sociais do nosso tempo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados aspectos relacionados às características do pavimento flexível, dos polímeros em forma de grelhas. Foram abordados resultados de estudos similares e uma discussão em torno da aplicação do PET no cenário da pavimentação para melhoria das condições de resistência.

Na Tabela 1 é apresentado o cronograma de atividades que foram realizadas para o Trabalho de Conclusão de curso II. De modo geral, as etapas desta pesquisa consistem na revisão e adequação da espessura da grelha, orientação e locação dessa no corpo de prova e sua modelagem, extração e preparação do corpo de prova, ensaios e análise dos resultados obtidos.

Tabela 1 - Cronograma de execução da pesquisa (março a maio de 2026)

Etapas	Março/2026	Abril/2026	Maio/2026	Junho/2026
1.Revisão e adequação.	●			
2. Conformação e caracterização da grelha polimérica.	●●●	●		
3. Moldagem dos corpos de prova.	●●●	●●●		
4. Extração e preparação dos corpos de prova.		●●●	●●●	
5. Ensaaios de rompimento e análise dos resultados.			●	●●●

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

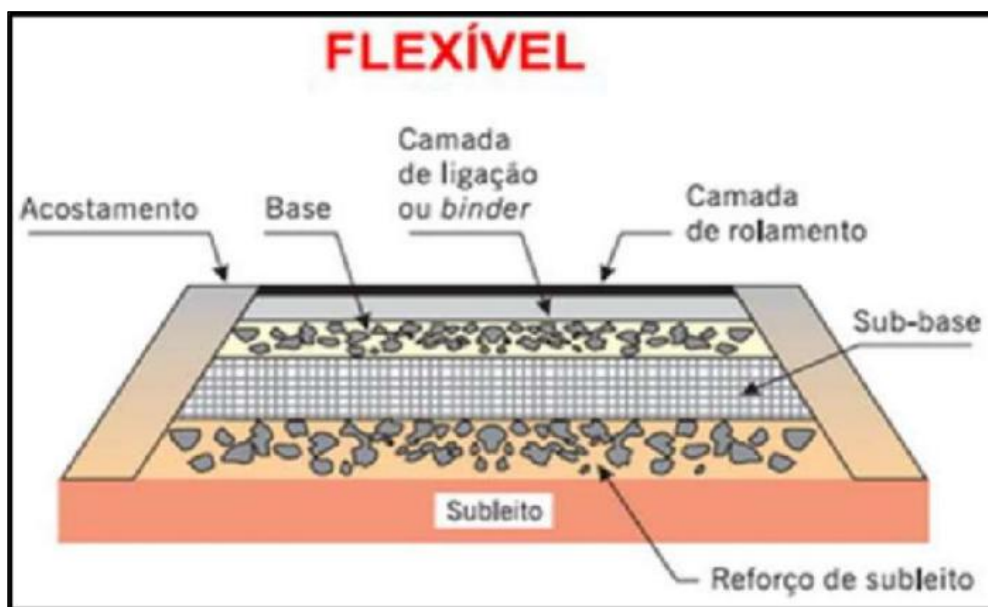
Legenda:

● = execução parcial ●●● = execução principal

2.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL

Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito (DNIT, 2006). O pavimento flexível é composto pela camada de subleito, sub-base, base, camada de ligação ou binder, camada de rolamento ou revestimento. Na Figura 1 é apresentado um desenho esquemático da seção transversal típica de um pavimento flexível.

Figura 1 - Seção típica de um pavimento flexível em concreto asfáltico



Fonte: BERNUCCI et al., 2006

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores (BERNUCCI et al., 2006).

2.1.1. Composição do Revestimento

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), que se comporta como um aglomerante betuminoso, é um subproduto pesado derivado do refino do petróleo. Este material vital para a pavimentação de vias possui propriedades singulares que garantem o desempenho estrutural: é um adesivo termo-viscoplástico, ou seja, sua consistência e rigidez são diretamente influenciadas pela temperatura; sua natureza hidrofóbica confere-lhe excelente impermeabilidade; e a estabilidade química que apresenta assegura uma longevidade estrutural e baixa suscetibilidade a reações (BERNUCCI et al., 2006).

2.1.2. Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

A estrutura dos pavimentos flexíveis é definida por uma característica fundamental: a capacidade de todas as suas camadas de experimentarem uma deformação elástica considerável sob a aplicação de um carregamento veicular. Segundo a concepção do

DNIT (2006), essa deformação permite que o carregamento aplicado seja distribuído de forma progressivamente atenuada e equivalente por todo o sistema multicamadas.

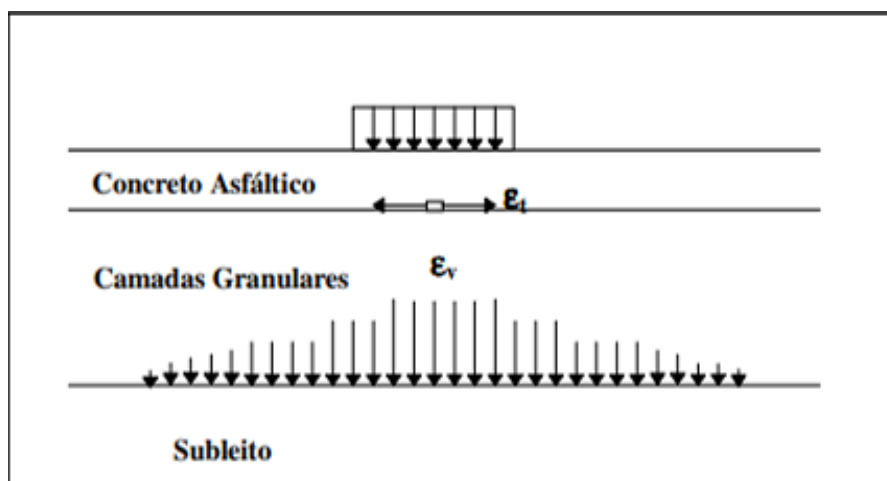
“As camadas superiores do pavimento, notadamente o revestimento e a base, funcionam como elementos estruturais chave para proteger o subleito. Elas cumprem essa função ao atenuar as tensões verticais de compressão. A distribuição da carga é realizada, em parte, pela "absorção" dos esforços horizontais, ou tensões cisalhantes, gerados pelo tráfego.

Entretanto, esse processo de flexão da estrutura induz uma solicitação crítica no ligante asfáltico: o cisalhamento e a flexão da placa asfáltica sob o carregamento resultam no desenvolvimento de tensões e deformações de tração na sua face inferior (a que está em contato com a base).

É a repetição cíclica dessas tensões de tração que, com o volume e a frequência do tráfego, leva ao trincamento por fadiga do revestimento asfáltico (GONÇALVES, 1999). Esse é o principal mecanismo de deterioração estrutural que limita a vida útil da camada superficial do pavimento flexível.”

A Figura 2 ilustra o comportamento das camadas do pavimento segundo a definição de Gonçalves.

Figura 2 - Comportamento das tensões em seção típica de um pavimento flexível em concreto asfáltico



Fonte: GONÇALVES, 1999

2.2. POLÍMEROS

As macromoléculas conhecidas como polímeros são compostos formados por uma vasta e repetitiva agregação de unidades químicas elementares, podendo ter origem natural ou sintética (AKCERULD, 2007). Um parâmetro físico de grande relevância na

sua caracterização é a massa molar, cujo valor se encontra tipicamente na faixa de 10^4 a 10^6 g/mol.

O grau de polimerização, que corresponde ao número de unidades que se repetem na cadeia, determina o comprimento efetivo da cadeia polimérica. Ao se analisar polímeros de alto grau de polimerização (também referidos como altos polímeros), constata-se uma relação direta: o aumento da massa molar eleva, correspondentemente, a resistência mecânica do material. Entretanto, esse ganho de resistência atinge um ponto de estabilização, onde variações adicionais na massa molar já não implicam melhorias significativas na propriedade mecânica.

Os polímeros são classificados por diversos critérios, incluindo sua estrutura química, o método de preparação e seu comportamento mecânico (AKCERULD, 2007). Na Figura 3 é apresentado um quadro, o qual sintetiza as modalidades de classificação mais frequentemente utilizadas na área de materiais.

Figura 3 - Quadro de Classificação dos polímeros

Classificação	Categorias
Estrutura química	i. Polímeros de cadeia carbônica a. Poliolefinas b. Polímeros de dienos c. Polímeros estirênicos d. Polímeros clorados e. Polímeros fluorados f. Polímeros acrílicos g. Polivinil ésteres h. Poli(fenol-formaldeído) ii. Polímeros de cadeia heterogênea a. Poliéteres b. Poliésteres c. Policarbonato d. Poliamidas e. Poliuretanos f. Aminoplásticos g. Derivados da celulose h. Siliconas
Método de preparação	i. Polímeros de adição ii. Polímeros de condensação
Comportamento mecânico	i. Plásticos a. Termoplásticos b. Termorrígidos c. Baroplásticos ii. Elastômeros iii. Fibras
Desempenho mecânico	i. Termoplásticos convencionais (commodities) ii. Termoplásticos especiais iii. Termoplásticos de engenharia (TE) iii. Termoplásticos de engenharia especiais

Fonte: Canevarolo Jr. (2013)

O politereftalato de etileno - PET, polímero que será empregado como objeto desse estudo, enquadra-se nas categorias apresentadas a seguir.

- Quanto à estrutura química: polímero de cadeia heterogênea - poliésteres;
- Quanto ao método de preparação: polímero de condensação;
- Quanto ao comportamento mecânico: fibra;
- Quanto ao desempenho mecânico: termoplásticos de engenharia (TE).

A relevância das classificações de comportamento e desempenho mecânico é indiscutível para o sucesso da aplicação de polímeros em projetos de engenharia, como no reforço de pavimentos. Por exemplo, a classificação do material como fibra implica um aumento de sua resistência mecânica devido à formação de cadeias e

cristais orientados de forma forçada, possibilitando a produção de fios finos, como é o caso do PET (CANEVAROLO JR., 2013).

O PET (poli tereftalato de etileno) é um representante notável dos termoplásticos de engenharia, que se destacam por suas propriedades superiores. Estes materiais são valorizados por apresentarem bom desempenho em dispositivos mecânicos, alta resistência, notável tenacidade (característica de absorver grande energia antes da ruptura) e estabilidade dimensional (capacidade de manter suas dimensões sob tensão e variações ambientais).

O desenvolvimento do PET tem sua origem em uma pesquisa precursora de Wallace Carothers, culminando na patente de 1941 pelos químicos John Rex Winfield e James Tennant Dickson (BELLIS, 2021).

Inicialmente, pesquisadores documentaram que a estiragem do material gerava fibras longas e robustas a partir de uma substância pegajosa, levando à sua classificação inicial como poliéster (SILVA; MESQUITA, 2022). Com o aprofundamento dos estudos, o PET foi consolidado como um polímero cristalino de significativo potencial molecular.

A popularidade global do PET advém da sua combinação estratégica de propriedades térmicas e mecânicas com um custo de produção acessível. Além disso, o material desfruta de vasta aceitação para uso em contato direto com alimentos (MACDONALD, 2002).

Um marco em sua aplicação ocorreu em 1973, quando o processo de injeção e sopro com bi orientação, desenvolvido pela Du Pont, permitiu a utilização do PET na fabricação de garrafas para acondicionamento de bebidas carbonatadas. Esta inovação foi introduzida no Brasil no ano de 1989.

“A produção de PET corresponde a 9 wt. (%) da produção total de polímeros no Brasil, entretanto a fração de PET no RSU correspondente aos polímeros é, em média, de 20 wt. (%). Isto se deve ao fato do PP e do PVC serem utilizados como matéria-prima na fabricação de produtos acabados com longa vida útil nas indústrias de bens de consumo e construção civil; o PET é usado em produtos com curta vida útil como as embalagens. Devido à grande quantidade e variedade das aplicações dos polímeros e o seu tempo de degradação relativamente longo, eles são considerados os grandes vilões

ambientais por ocuparem uma boa parte do volume dos aterros. No entanto, os problemas ambientais não são causados pelos polímeros e sim pelo seu descarte de forma inadequada. A reciclagem sistemática dos polímeros é a solução para minimizar esse impacto ambiental. (MOURÃO et al., 2009).”

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseou-se na incorporação de uma grelha polimérica como elemento de reforço em corpos de prova asfálticos. Inicialmente, procedeu-se à caracterização física e mecânica da grelha, com o intuito de determinar suas propriedades estruturais e sua compatibilidade com o ligante asfáltico utilizado. Após essa etapa, a grelha foi inserida no corpo de prova, posicionada entre as camadas de mistura asfáltica, de modo a constituir uma camada adicional ao compósito.

O método empregado foi de natureza experimental e tem como principal objetivo avaliar o efeito da presença da grelha sobre o desempenho mecânico do corpo de prova, especialmente no que se refere à resistência e à coesão entre as camadas. O modelo conceitual da grelha pressupõe que ocorra uma interação física e química entre as camadas superior e inferior, promovendo o aglutinamento do ligante asfáltico e aumentando a aderência interfacial. Essa interação visa impedir o deslocamento relativo entre as camadas, contribuindo para uma melhor distribuição de tensões e para a durabilidade estrutural do sistema.

Os ensaios experimentais serão conduzidos de forma a comparar o comportamento dos corpos de prova com e sem a presença da grelha, possibilitando a análise do ganho de resistência e da eficiência do reforço polimérico. Os resultados obtidos permitirão avaliar o potencial da utilização de grelhas poliméricas como técnica de reforço em misturas asfálticas, contribuindo para o aprimoramento do desempenho mecânico e da vida útil dos pavimentos.

3.1 RESULTADOS OBTIDOS COM A ADIÇÃO DAS GRELHAS E ÀS MISTURAS ASFÁLTICAS

A tabela 2 mostra resultados de trabalhos de resíduos plásticos em misturas asfálticas. Esses resultados servem para embasar nossa pesquisa e ajudar nas discussões e conclusões que foram geradas na pesquisa.

Tabela 2 - Resultados da utilização de resíduos plásticos em misturas asfálticas

Autores	Título da publicação	Conclusões
A. Hassan, H. Ganjidoust, and Maghanaki (2005)	Uso de grelhas plásticas (PET) em mistura de concreto asfáltico como substituição de agregados	A utilização do PET em grelhas (5% do peso total da mistura betuminosa) substituindo 20% dos agregados finos melhora o resultado do ensaio Marshall, com aumento da estabilidade e menor fluência
Z. N. Kalantar, M. R. Karim, and A. Mahrez (2012)	Uma revisão da utilização de resíduo e polímero virgem em pavimentos	Observou-se a utilização do PET como um aditivo na mistura betuminosa. O binder foi misturado a uma temperatura de 150° C com a proporção de 2%, 4%, 6%, 8 % e 10% de PET, em relação ao peso ideal da mistura betuminosa. Como resultado foi observada uma melhor resistência contra afundamento e deformações permanentes quando comparado ao binder tradicional.
D. MovillaQuesada, et al (2019)	Uso de resíduos plásticos em misturas asfálticas adicionadas pelo método seco como substituição parcial do betume	O estudo propõe a utilização de resíduos plásticos adicionados pelo método seco como substituição parcial ao uso do betume em misturas asfálticas. Os resíduos plásticos utilizados eram compostos da mistura triturada de tereftalato de polietileno (PET), HDPE e PVC, gerando flocos de formato irregular. A seguir,

		apresentam-se os resultados e observações obtidas a partir dos ensaios. • As partículas de resíduos devem ter tamanho inferior a 2 mm para que envolvam os agregados com mais facilidade e tenham bom desempenho na presença de água; • A proporção de resíduos plásticos e binder não deve exceder 1:1; Com base nos resultados parciais obtidos, a utilização de resíduos plásticos como ligante seco pode ser considerada viável, permitindo a utilização de aproximadamente uma a duas toneladas por quilômetro, assumindo uma camada superficial pavimentada de 5 cm de espessura com duas pistas.
--	--	--

Autores	Título da publicação	Conclusões
Francesca Russo, Cristina Oreto, Rosa Veropalumbo (2022)	Promoção da conservação de recursos em pavimentos flexíveis rodoviários utilizando jet grouting e resíduos plásticos como filler	Avaliou-se o potencial ambiental e os benefícios mecânicos do uso de resíduos plásticos (HDPE, LDPE, PP e PET) para produção de mástiques asfálticos quentes compostos de betume e filler a ser aplicado na camada de base. A quantidade máxima da massa de resíduos plásticos triturados introduzidos na mistura, em relação ao total de betume, foi de 10%. Como resultado, avaliou-se que a utilização dos resíduos plásticos apresentou, em média, 30% menor conformidade de fluência não recuperável a 50 °C abaixo de 0,1 e 3,2 kPa, do que os outros tipos de resíduos utilizados e o betume puro. O que revela sua habilidade na redução de deformações permanentes. A análise do ciclo de vida desse material também apresentou uma melhor performance ambiental ao apresentar menores danos à saúde, ecossistemas e indicadores de recursos disponíveis; redução de -13% no consumo de energia e combustíveis, durante a fabricação de mistura asfáltica e transporte até o canteiro de obras; e vida útil mais longa em comparação com uma solução tradicional (+5 anos).

Fonte: Adaptado pelo autor

De maneira geral, a literatura técnica indica que o PET possui propriedades capazes de otimizar o desempenho de pavimentos flexíveis, promovendo ganhos em rigidez, estabilidade e viscosidade, o que reduz a fragilidade do revestimento frente a

variações térmicas e danos por fadiga. Todavia, nota-se que a maioria das publicações foca na introdução do PET como agregado ou modificador de ligante (binder). A utilização de grelhas de PET como reforço em camadas asfálticas ainda é um campo com escassa documentação científica, o que impõe desafios à análise comparativa direta entre os dados de desempenho obtidos neste estudo e as evidências de pesquisas anteriores.

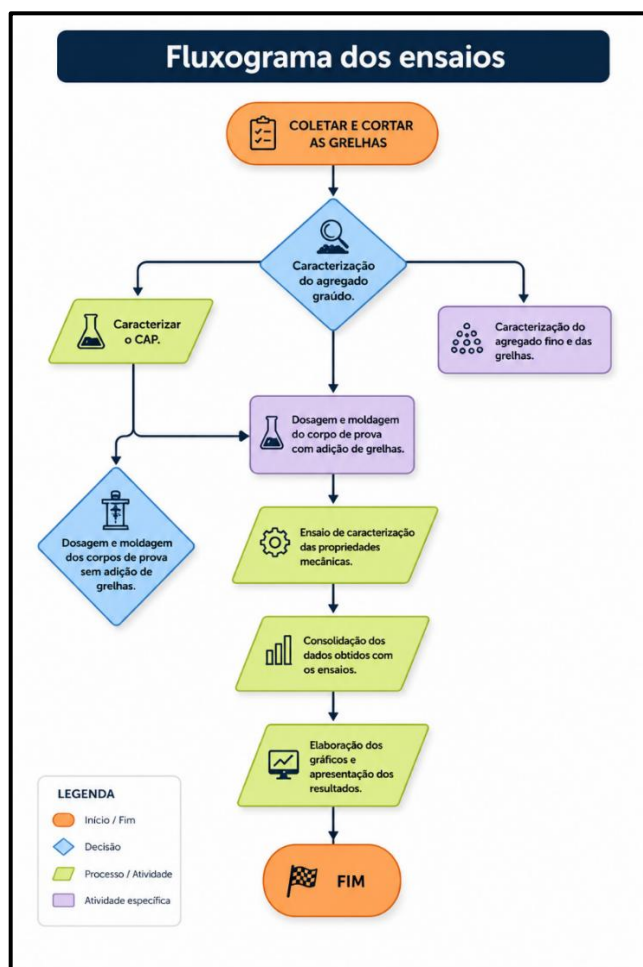
3.2 POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DO PET COMO GRELHA NO REVESTIMENTO FLEXÍVEL.

A gestão de resíduos sólidos tornou-se um dos desafios críticos da sociedade contemporânea, impulsionada pela ascensão do consumo de produtos industrializados e, especialmente, pelo descarte de plásticos de uso único. Nesse cenário, a incorporação de grelhas de PET em misturas asfálticas surge como uma alternativa promissora para o reaproveitamento desse material. Contudo, conforme apontado por Ashish et al. (2023), o impacto dessas misturas modificadas quanto à emissão de gases poluentes e à dispersão de microplásticos ainda carece de investigações mais profundas, representando uma lacuna técnica relevante.

3.3 MÉTODOS DE ENSAIO PARA APLICAÇÃO DE GRELHAS

Este capítulo apresenta os processos e ensaios aplicados para a avaliação do potencial do PET como grelha do revestimento flexível, conforme propõe o fluxograma da Figura 4.

Figura – 04 Fluxos das etapas para o ensaio.



Fonte: Elaboração do autor

3.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os ensaios experimentais integrantes desta pesquisa foram conduzidos utilizando a infraestrutura listada na tabela 3, pertencente ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentos e Ferrovias, localizado no Campus Nova Suíça do CEFET-MG.

Tabela 3 - Ferramentas e equipamentos para realização da pesquisa

Descrição	Aplicação	Norma de referência
Balança de precisão	Aferição das massas dos materiais	-
Peneiras para análise granulométrica	Definição da granulometria dos agregados graúdos, agregados miúdos, filler.	DNER - ME 083-98
Estufa	Estufa	-
Moldes cilíndricos para moldagem de corpos de prova - padrão AASHTO	Moldagem dos corpos de prova	DNIT 447/2024 -ME
Equipamento de banho térmico	Aquecimento dos corpos de prova para extração do molde	DNIT 447/2024 -ME
Extrator de amostras	Extração dos corpos de prova dos moldes cilíndricos	DNIT 447/2024 -ME
Soquete Marshall Elétrico CI	Compactação de corpos de prova de asfalto mediante a programação de golpes	DNIT 447/2024 -ME
Prensa	Ensaio de compressão diametral	DNIT 447/2024 -ME

Fonte: Elaboração do autor

3.5 COLETA, SEPARAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a confecção do reforço, utilizaram-se grelhas extraídas de garrafas de PET, aproveitando a geometria de tiras pré-existentes no material adquirido (Figura 5). O ajuste do comprimento dessas tiras foi realizado manualmente para garantir a

compatibilidade com o diâmetro nominal de 10 cm do molde adotado, assegurando o correto posicionamento do reforço no interior da mistura asfáltica.

Figura 5 – Fonte das grelhas de PET utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor

Os agregados finos, grãos e o CAP 50/70 utilizados na pesquisa são insumos disponíveis no laboratório de Tecnologia de Tecnologia dos Pavimentos e Ferrovias do Campus Nova Suíça do CEFET-MG.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO CAP

O CAP 50/70 utilizado nos ensaios foi adquirido novo para a realização da pesquisa, a fim de garantir suas características regulamentadas por norma, sendo as principais definidas pelas normativas citadas a seguir e os valores de referência conforme Tabela 4.

- Adesividade a ligante betuminoso (DNER-ME 078/94);
- Ductilidade (norma ABNT NBR 6293:2015);
- Penetração (norma ABNT NBR 6576:2007);
- Ponto de fulgor (norma ABNT NBR 11341:2014);
- Ponto de amolecimento (norma ABNT NBR 6560:2016);
- Viscosidade (norma ABNT NBR 14950:2003 e NBR 15184:2021);

Tabela 4 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30 - 45	CAP 50 - 70	CAP 85 - 100	CAP 150 - 200	ABNT NBR	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25oC)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	6576	D5
Ponto de amolecimento, mín.	o C	52	46	43	37	6560	D36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	14950	E102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60		
OU							
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	15184	D4402
a 150°C, SP 21, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114		
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	11341	D92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	14855	D2042
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	6293	D113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85min							
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5	-	D2872
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	6293	D113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	6560	D36
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	6576	D5

Fonte: Resolução ANP nº 897, 2022

3.7 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

Agregado graúdo é o material retido na peneira nº 10 (2,0 mm): britas, cascalhos, seixos etc. (DNIT, 2006). O material utilizado na pesquisa, disponível no laboratório, atende as principais especificações conforme normas enumeradas adiante.

- Faixa Granulométrica (norma DNIT 031/2024);
- Ensaio de desgaste Los Angeles (norma DNIT 451/2024);
- Ensaio de desgaste Los Angeles (norma DNIT 451/2024);
- Determinação do índice de forma (norma DNIT 425/2020).

3.8 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

Agregado miúdo é o material que passa na peneira nº 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075 mm): pó-de-pedra, areia etc. (DNIT, 2006). O material utilizado na pesquisa, disponível no laboratório, atende as principais especificações conforme normas enumeradas adiante.

- Faixa Granulométrica (norma DNIT 031/2024);
- Teor de materiais pulverulentos (norma ABNT NBR NM 46:2003);
- Massa específica, densidade relativa e absorção (norma DNIT 411/2021 - ME).

3.9 DEFINIÇÃO DA DOSAGEM DOS CORPOS DE PROVA

As curvas granulométricas para os agregados devem atender à norma DNIT 412 – ME, que os combinados formem uma mistura que se enquadre nas faixas granulométricas definidas no Tabela 5.

Tabela 5 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico

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	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: DNIT (norma 031/2024, tabela 1)

3.10 DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a dosagem dos corpos de prova foram adotados os percentuais de CAP de 4,5%, 5,5% e 6,5%, conforme limites indicados na norma DNIT 031/2024 - ES para a camada de rolamento. Para avaliação do desempenho dos corpos de prova sem fibra com as diferentes porcentagens de CAP, agregados graúdos e miúdos e fibras de PET serão moldados 3 corpos de prova para cada mistura, conforme definido na norma DNIT 031/2024 - ES. O quantitativo dos corpos de prova é apresentado pela Tabela 6.

Tabela 6 – Relação de corpos de prova a serem moldados

Teor de CAP (%)	Qtde. corpos de prova (sem fibra)
4,5	3
5,5	3
6,5	3
Total	9

Fonte: Elaboração do autor

Dessa forma, totalizando 3 corpos de prova, sem fibra, que serão misturados, moldados e compactados. O percentual do CAP para os corpos de prova com fibra foi definido com base na dosagem sem fibra que apresentou os maiores resultados de resistência. A compactação foi realizada de forma mecanizada com Soquete Marshall Elétrico CI, executando 75 golpes em cada face do corpo de prova, conforme norma DNIT 447/2024 – ME. O item 3.8 deste trabalho determina os ensaios a serem realizados nos corpos de prova citados anteriormente.

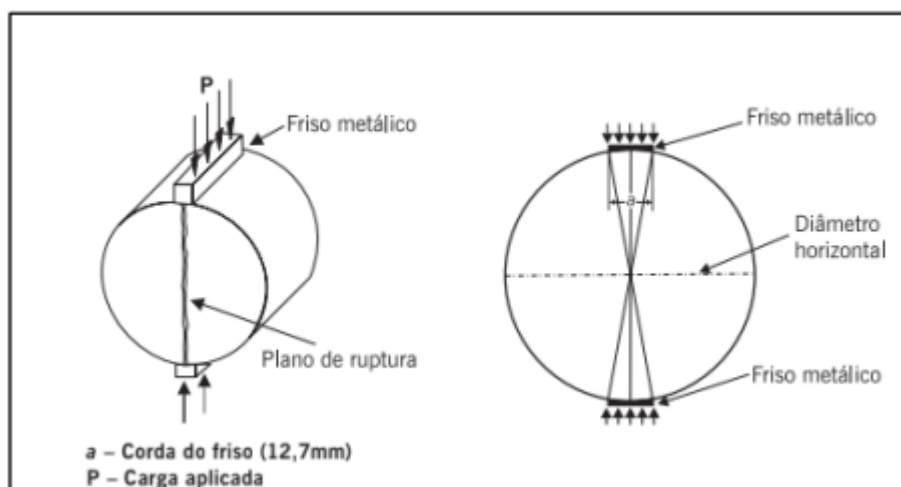
3.11 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os ensaios citados a seguir tem sua metodologia definida pelas normas DNIT 136/2018 - ME e DNIT 447/2024 -ME

3.12 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E FLUÊNCIA

A metodologia do ensaio de compressão diametral foi desenvolvida por Lobo Carneiro, em 1943, para análise de concreto de cimento Portland. Com a sua difusão no Brasil, também foi aplicada para as misturas asfálticas. A aplicação das forças se dá através de frisos metálicos de 12,7mm de largura com curvatura adequada ao corpo-de-prova cilíndrico (BERNUCCI et al., 2006), conforme Figura 6.

Figura 6 – Esquema do ensaio de compressão diametral

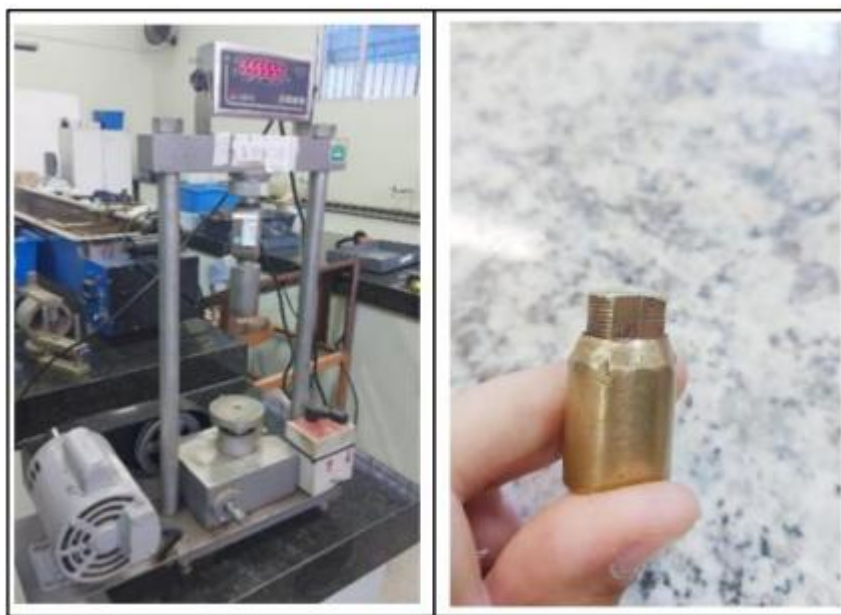


Fonte: BERNUCCI et al., Figura 6.19, 2006

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram fabricados em laboratório, conforme item 3.4 a 3.9

As Figuras 7 e 8 apresentam os equipamentos utilizados para a realização do ensaio, disponíveis no laboratório de Tecnologia dos Pavimentos e Ferrovias do Campus Nova Suíça do CEFET-MG.

Figura 7 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão (esquerda) e peça de medição de fluência (direita)



Fonte: Isabelle Moreira, 2024

A Figura 8 ilustra a configuração de posicionamento do corpo de prova no equipamento.



Fonte: Acervo do autor

Após a aplicação das forças e medição da carga de ruptura do corpo de prova, é possível determinar sua resistência à tração, através da Equação 1.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (1)$$

onde,

σ_R – resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

F – Carga de ruptura, em N;

D – Diâmetro de corpo de prova, em mm;

H – Altura do corpo de prova (espessura), em mm.

Os valores de referência para resistência à tração, conforme a norma DNIT 031/2024-ES, determina um valor mínimo 0,65MPa para concretos asfálticos.

4. RESULTADOS

O conteúdo seguinte demonstra as etapas contidas nos ensaios realizadas para desenvolvimento e discussão de resultados.

4.1 DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS

O material foi armazenado no laboratório em recipientes identificados e foram secados em estufa para a execução dos ensaios. O primeiro executado foi de determinação da faixa granulométrica dos agregados, conforme Figura 09. Para a granulometria do agregado graúdo foram utilizadas as peneiras de abertura: 12,5, 9,52, 6,3 e 4,75 mm. Para granulometria do agregado miúdo as peneiras de abertura: 4,75, 2,35, 1,18, 0,59, 0,297 e 0,15 mm.

Figura 09 – Instrumentação do ensaio de curva granulométrica



(a) peneiras utilizadas para agregado graúdo (b) peneiras utilizadas para agregado miúdo

Fonte: Acervo do autor

Para cada tipo de agregado, utilizou-se uma amostra de 1 kg. O procedimento de peneiramento manual foi conduzido por meio de movimentos circulares e laterais alternados, nos planos horizontal e vertical, com duração de um minuto. Subsequentemente, as frações retidas em cada peneira foram pesadas em balança com precisão de 1g. Validou-se o ensaio verificando se o somatório das massas retidas apresentava variação inferior a 0,3% em relação à massa seca inicial, atendendo aos critérios da norma DNER 083/98. Os dados resultantes estão compilados nas Tabelas 7,8 e 9.

Tabela 7 – Análise granulométrica do agregado graúdo – brita 0

Abertura Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada	% passante	Módulo de finura
12,5	105,84	10,58%	10,58%	89,42%	0,00
9,52	602,91	60,29%	70,88%	29,13%	0,01
6,3	259,95	26,00%	96,87%	3,13%	0,01
4,75	29,00	2,90%	99,77%	0,23%	0,01
Fundo	2,09	0,21%	99,98%	0,00%	0,01
Amostra	1.000,00				
Amostra final	999,79				
Variação	0,02%				

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 8 – Análise granulométrica do agregado miúdo – areia

Abertura Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada	% passante	Módulo de finura
4,75	3,37	0,34%	0,34%	99,66%	0,00
2,36	107,29	10,73%	11,07%	88,93%	0,00
1,18	765,8	76,58%	87,65%	12,35%	0,01
0,59	87,99	8,80%	96,45%	3,56%	0,01
0,297	28,79	2,88%	99,32%	0,68%	0,01
0,15	4,49	0,45%	99,77%	0,23%	0,01
Fundo	1,16	0,12%	99,89%	0,00%	0,01
Amostra	1.000,00				
Amostra final	998,89				
Variação	0,11%				

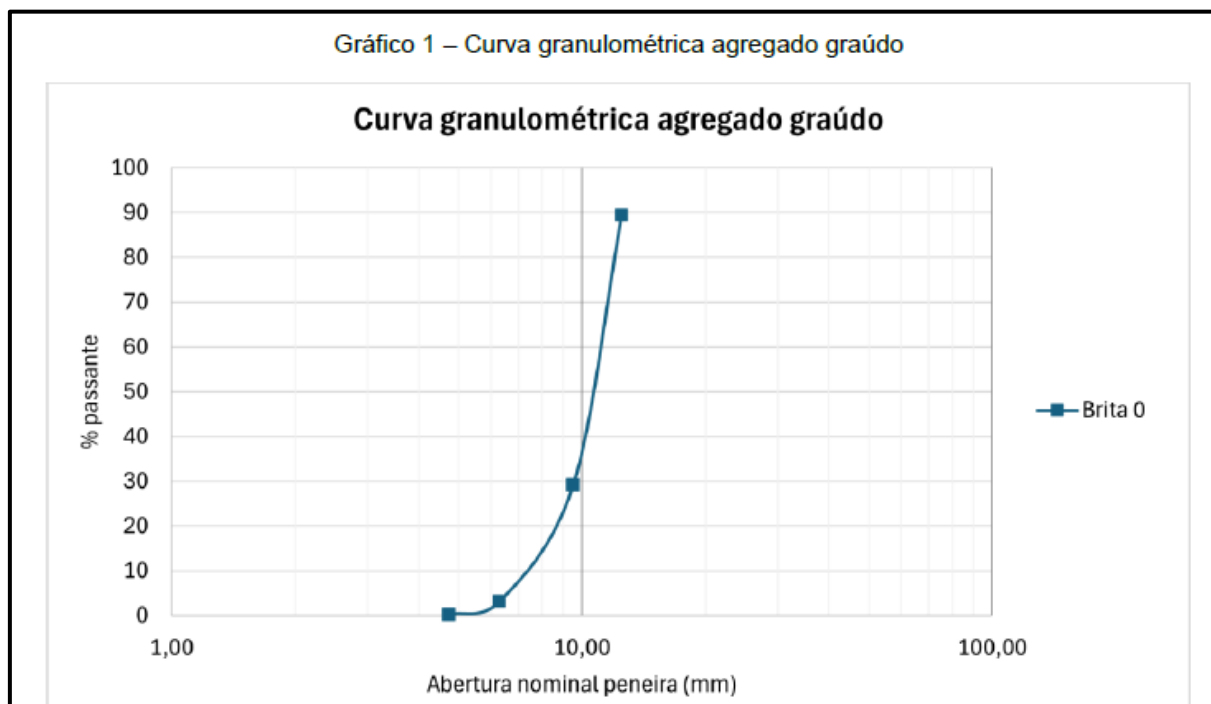
Fonte: Elaboração do autor

Tabela 9 – Análise granulométrica do agregado miúdo – pó de pedra

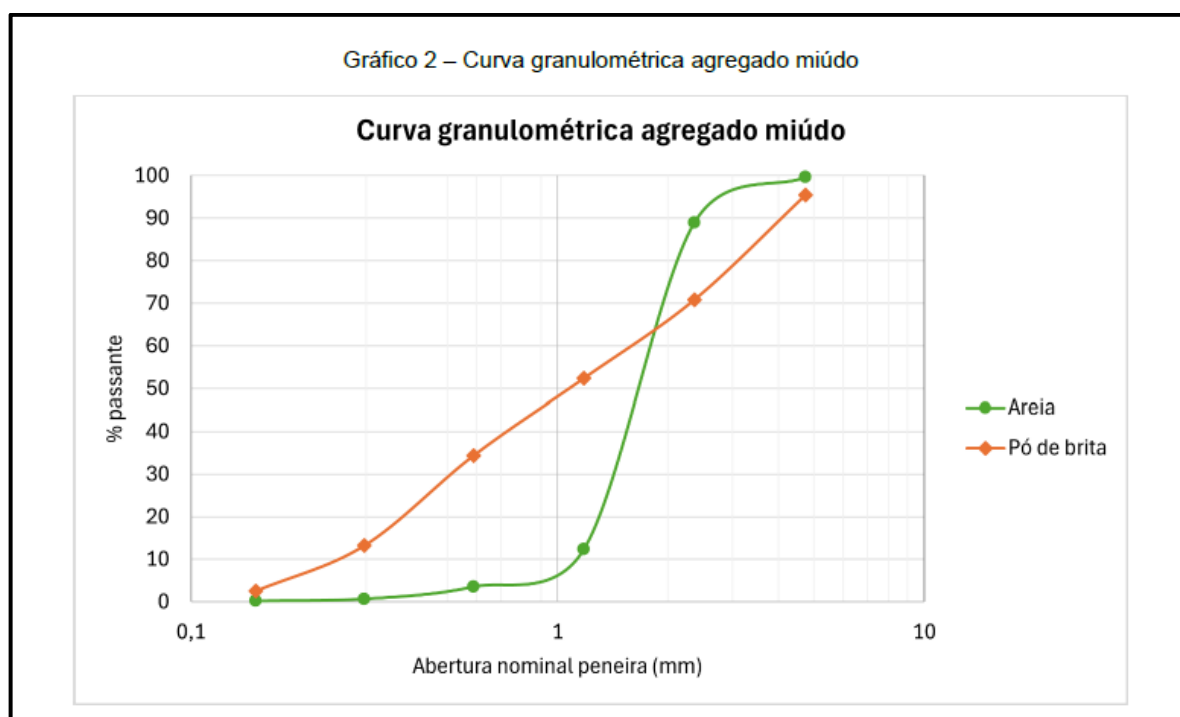
Abertura Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada	% passante	Módulo de finura
4,75	45,66	4,6%	4,6%	95,4%	0,00
2,36	246,22	24,6%	29,2%	70,8%	0,00
1,18	183,82	18,4%	47,6%	52,4%	0,00
0,59	180,02	18,0%	65,6%	34,4%	0,01
0,297	211,47	21,1%	86,7%	13,3%	0,01
0,15	106,89	10,7%	97,4%	2,6%	0,01
Fundo	25,35	2,5%	99,9%	0,0%	0,01
Amostra	1.000,00				
Amostra final	999,43				
Variação	0,06%				

Fonte: Elaboração do autor

. Os Gráficos 1 e 2 apresentam os valores obtidos da curva granulométrica.



Fonte: Elaboração do autor



Fonte: Elaboração do autor

A dosagem adotada para os corpos de prova foi realizada conforme a faixa granulométrica “C” para concreto asfáltico, resultando nas massas dos agregados conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Dosagem dos corpos de prova de revestimento betuminoso

Material utilizado (g)						
% CAP	CAP	Brita 1	Brita 0	Areia	Pó de pedra	Total
4,5	54,00	0,00	412,56	425,40	308,04	1200,00
5,5	66,00	0,00	408,24	420,94	304,82	1200,00
6,5	78,00	0,00	403,92	416,49	301,59	1200,00

Fonte: Elaboração do autor

4. 2 CONFEÇÃO DAS GRELHAS UTILIZADAS

A preparação das grelhas foi confeccionada de forma manual com a superação e corte do PET (Figura 10).

Figura 10 – Confeção da grelha



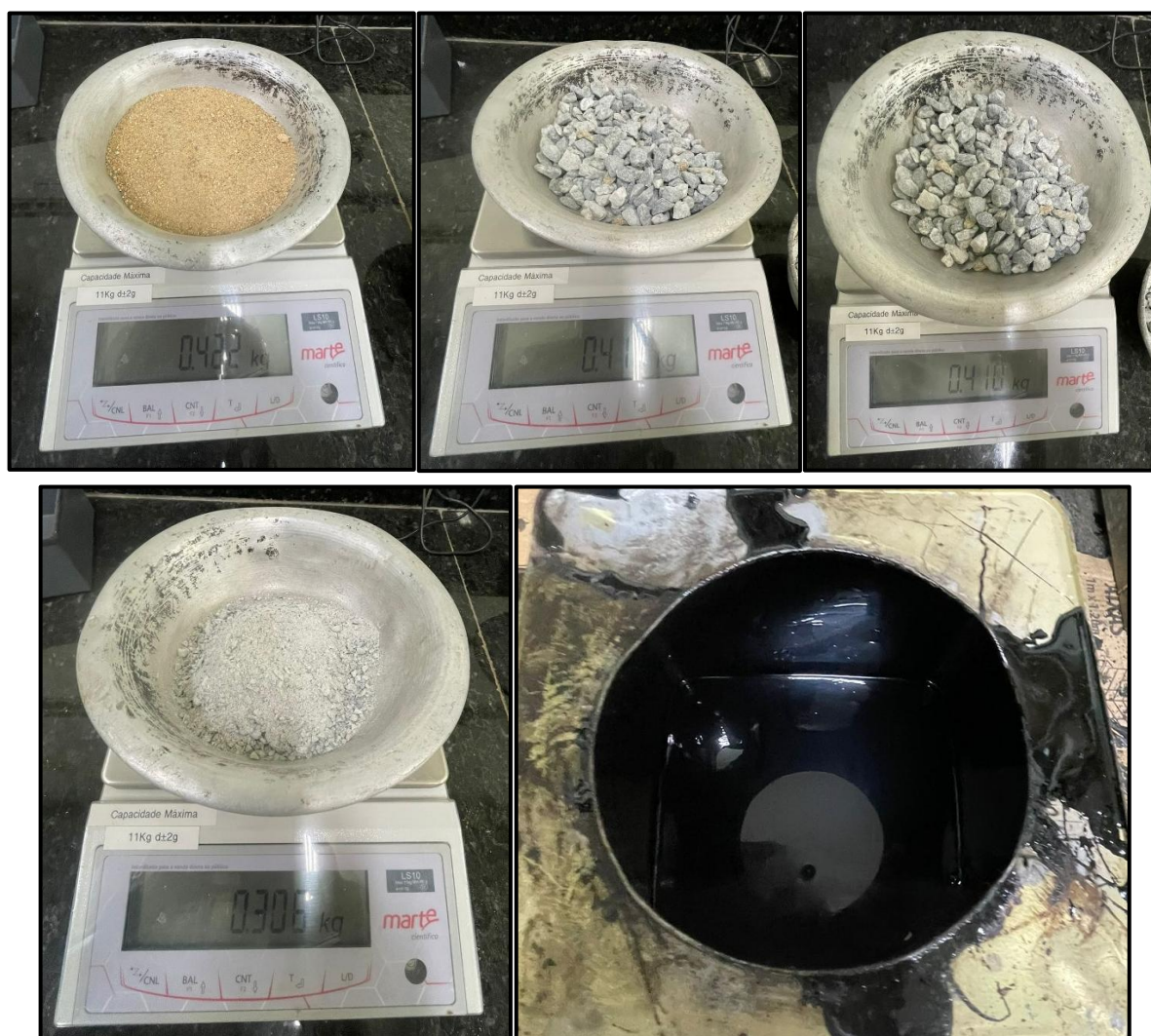
Fonte: Elaboração do autor

Após a higienização das garrafas foi cortada de forma circular e aberturas de formas conforme observa-se na figura 10.

4.3 MOLDAGEM E RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA SEM FIBRA

Os ensaios foram executados segundo a norma DNIT 447/2024 – ME. A primeira etapa consiste na secagem dos materiais utilizados na moldagem, conforme Figuras 11, 12A, 12B, 12C e 12D.

Figura 11 – Pesagem do material para moldagem



Fonte: Elaboração do autor

Figura 12 – Etapas da moldagem da mistura de CBUQ



(A) Mistura de todos os materiais.

(B) adição do CAP



(C) Molde para os corpos de prova

(D) Mistura completa do material

Fonte: Acervo do autor

Ressalta-se que os moldes cilíndricos são pré-aquecidos para o processo de moldagem. Após a homogeneização, a mistura é transferida para o cilindro para o início da compactação, aplicando-se 75 golpes em cada face do corpo de prova (CP). Finalizada essa etapa, os CPs permaneceram nos moldes para resfriamento em temperatura ambiente, sobre uma superfície lisa e plana, por um período mínimo de 12 horas. Para otimizar a organização durante o ensaio de resistência, as amostras foram identificadas com fitas indicando o teor de CAP, conforme ilustrado na Figura 12 C. Após o resfriamento, os corpos de prova foram submetidos a banho-maria por uma hora, a 50 °C, procedendo-se, em seguida, com a extração das amostras (Figura 13).

Figura 13 – Alocação e submersão banho Maria a 50°C



Fonte: Acervo do autor

Em estrita observância à norma **DNIT 447/2024**, o intervalo entre a retirada do corpo de prova do banho-maria e o seu rompimento não deve ultrapassar 30 segundos. Tal celeridade é indispensável para garantir que o material seja ensaiado em sua condição crítica de resistência. Para assegurar a estabilidade térmica, as amostras remanescentes foram mantidas submersas até o momento exato de cada ruptura. A configuração do ensaio de compressão está detalhada na Figura 16.

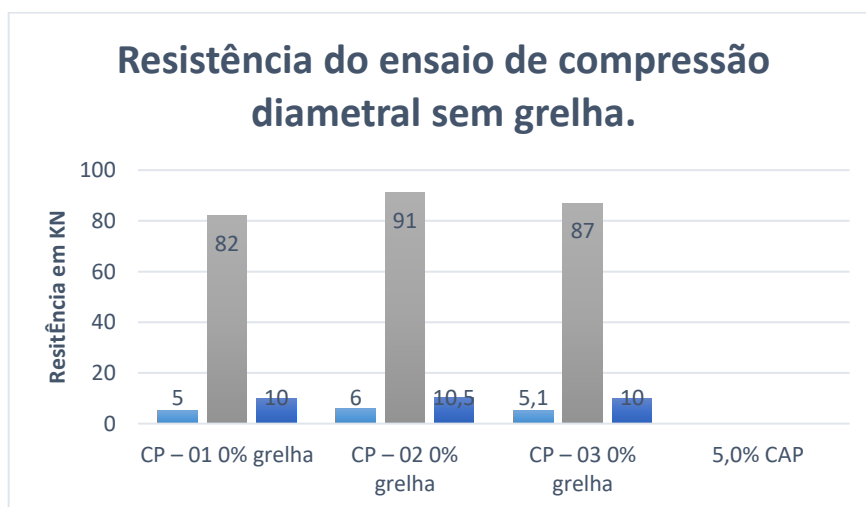
A dosagem do corpo de prova com 5,0% de CAP apresentou a maior resistência, conforme apresentado na Tabela 6 e gráfico 8, portanto foi a escolhida para os testes com as grelhas na tabela 11 e no gráfico 3.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de compressão diametral – CPs sem Grelha

Nº corpo de prova	% CAP	Fluência Inicial	Carga final KN	Fluência final
CP – 01	5,0	5 mm	82 KN	10 mm
CP – 02	5,0	6 mm	91 KN	10,5 mm
CP – 03	5,0	5,1 mm	87 KN	10, 2 mm

Fonte: Elaboração do autor

Gráfico 3 – Resultado do ensaio de compressão diametral –CPs sem grelhas



Fonte: Elaboração do autor

4.4 MOLDAGEM E RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM FIBRA

A preparação do material de reforço consistiu no corte das grelhas de PET em comprimentos de 5 cm e 10 cm, mantendo uma largura média de 0,5 cm. Para garantir a precisão da dosagem, as massas foram aferidas em balança de precisão para representar, respectivamente, 1% e 2% da massa total projetada para cada corpo de prova (CP), conforme demonstrado na pesagem ilustrada na Figura 14 abaixo.

Figura 14 – Grelhas de PET cortadas para aferição da massa (dosagem 2%)



Fonte: Acervo do autor

Os protocolos de granulometria, moldagem, extração e compactação das amostras seguiram as mesmas diretrizes estabelecidas no item 4.3 (Moldagem e ruptura dos corpos de prova sem reforço). No que tange à incorporação do material polimérico, as grelhas de PET foram posicionadas entre as camadas de agregados após o preenchimento parcial do molde. O processo de mistura e aquecimento prosseguiu até a estabilização da temperatura de compactação especificada, sendo os corpos de prova (CPs) sequencialmente identificados, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Homogeneização e identificação dos CPs com grelha



Fonte: Acervo do autor

Três corpos de prova foram dosados para a seguinte combinação de comprimento de fibra e porcentagem em relação ao CP sem fibra:

- 2% (24g) com 10 cm;
- 1% (12g) com 10 cm;
- 1% (12g) com 5 cm.

O resultado visual após o rompimento do 1º corpo de prova com fibra - 2% e 10 cm de comprimento de fibra é demonstrada pela Figura 16.

Figura 16 – Resultado visual da compactação dos CPs – 2% de Grelha/10cm



Fonte: Acervo do autor

A análise dos corpos de prova com 2% de grelha revelou um bom grau de compactação e pouca presença de vazios macroscópicos.

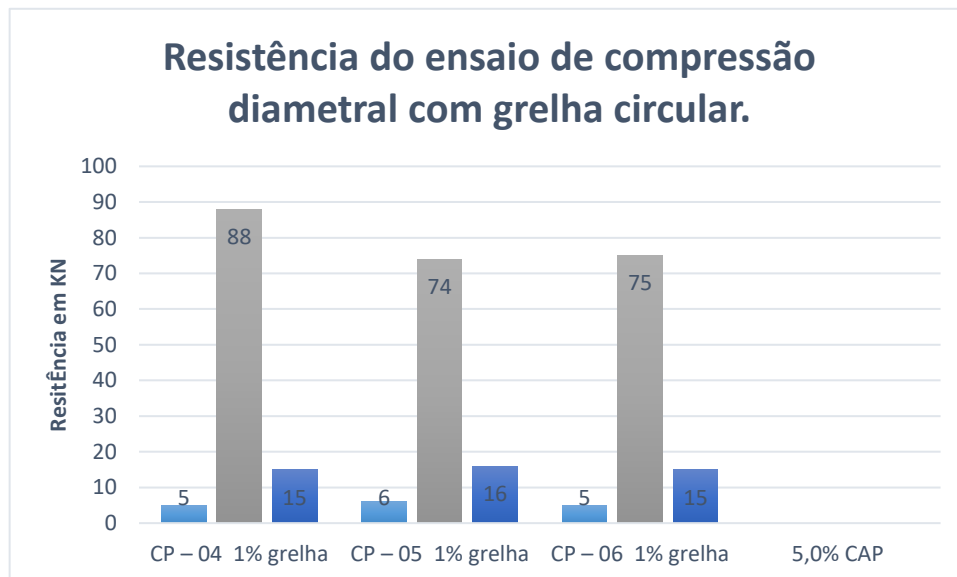
O ensaio de resistência à compressão diametral foi realizado para os 6 corpos de prova elencados anteriormente, com os mesmos procedimentos citados no item 4.3. A Tabela 12 apresenta a descrição dos resultados obtidos.

Tabela12 – Resultados do ensaio de compressão diametral – CPs com grelha

Nº corpo de prova	% CAP	Fluência Inicial	Fluência final	Fluência	Carga final KN
CP – 04	5%	5mm	15 mm	10 mm	88 kn
CP – 05	5%	6mm	16 mm	10 mm	74 kn
CP – 06	5%	5mm	15 mm	10 mm	75 kn

Fonte: Elaboração do autor

Gráfico 4 – Resultado do ensaio de compressão diametral –CPs com grelhas.



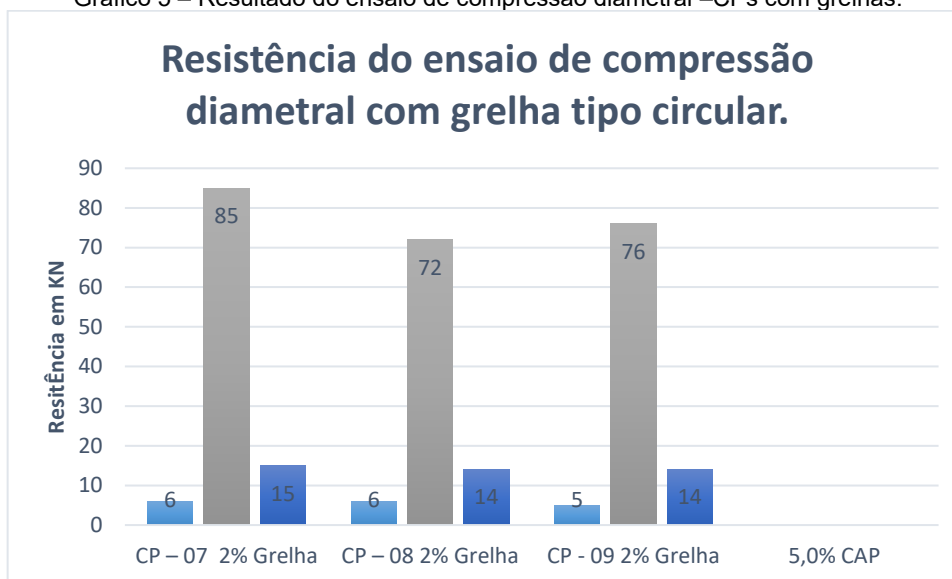
Fonte: Elaboração do autor

Tabela13 – Resultados do ensaio de compressão diametral – CPs com grelha.

Nº corpo de prova	% CAP	Fluência Inicial	Carga final KN	Fluência final
CP – 07	5%	6mm	85 kn	15 mm
CP – 08	5%	6mm	72 kn	14 mm
CP – 09	5%	5mm	76 kn	14 mm

Fonte: Elaboração do autor

Gráfico 5 – Resultado do ensaio de compressão diametral –CPs com grelhas.



Fonte: Elaboração do autor

5. CONCLUSÕES FINAIS

Conclui-se que os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral indicaram que as misturas contendo 2% de grelha de pet e 5 % de cap atenderam ao requisito mínimo de resistência estabelecido pela norma dnit 136/2018 – me ($\geq 0,65$ mpa). No entanto, houve um ganho expressivo de resistência em comparação às misturas sem a adição de fibras, o que sugere que de acordo com o método utilizado podemos incorporar as grelhas na utilização de revestimentos asfálticos.

A metodologia adotada, conforme detalhado no item 3, incluiu a caracterização dos materiais, dosagem e moldagem dos corpos de prova, bem como a realização de ensaios laboratoriais para avaliação das propriedades mecânicas da mistura asfáltica. A análise termogravimétrica foi essencial para garantir a estabilidade térmica do pet no processo de compactação do CBUQ, confirmando que a temperatura de moldagem dos corpos de prova (140 a 160 °c) estava significativamente abaixo do ponto crítico de degradação do polímero (430 °c).

Ao avaliar os corpos de prova com grelha que obtiverem valores de resistência aceitáveis, com adição de 2% de massa de pet, utilizaríamos 10 kg de material reciclado por tonelada de revestimento produzido, material este que deixará de ser descartado na natureza e contribuirá para a diminuição do passivo ambiental.

Dessa forma, a pesquisa demonstrou que a utilização de fibras de pet em misturas asfálticas é viável do ponto de vista técnico.

Este trabalho teve como objetivo central avaliar o desempenho do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) modificado com a adição de grelhas de polímero reciclado (PET), analisando sua resistência mecânica e a viabilidade técnica de sua aplicação na pavimentação flexível.

A pesquisa baseou-se na premissa de que a incorporação de grelhas produzidas a partir de resíduos de PET pode não apenas contribuir para a destinação sustentável de plásticos descartados, mas também oferecer uma alternativa eficaz para reforçar a estrutura do pavimento. A revisão da literatura corroborou a relevância do tema ao destacar que problemas de degradação precoce e fadiga em pavimentos flexíveis

frequentemente derivam do não atendimento às exigências técnicas de suporte e qualidade dos materiais.

Os procedimentos metodológicos adotados permitiram a caracterização dos materiais e a execução experimental com a inserção de grelhas de PET em corpos de prova, validando a hipótese de que tal interação física entre as camadas do pavimento pode melhorar a coesão e o desempenho mecânico. Conforme discutido, a utilização de PET — um termoplástico de engenharia de alta tenacidade — transforma um passivo ambiental em um recurso capaz de prolongar a vida útil das estruturas viárias.

Desta forma, conclui-se que a adição de grelhas de polímero reciclado apresenta-se como uma solução promissora, alinhada aos princípios da economia circular e da sustentabilidade na engenharia de transportes. Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para futuras práticas construtivas que visem a redução do consumo de materiais virgens e a mitigação dos custos globais de manutenção de pavimentos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da escala dos ensaios, incluindo a análise de comportamento sob diferentes condições climáticas e tráfego real, bem como a avaliação comparativa detalhada dos custos operacionais em aplicações de campo, a fim de consolidar a viabilidade econômica do reforço com PET reciclado em larga escala.

REFERÊNCIAS

MOREIRA, Isabelle Giovanna Pereira. **Melhoria da resistência de CBUQ com a adição de fibras de polímero reciclável na execução de pavimentos rodoviários**. 2025. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46: Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6293:2015: ligantes asfálticos – determinação da ductilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6560:2016: Ligantes asfálticos – determinação do ponto de amolecimento – método do anel e bola**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6576:2007: materiais asfálticos – determinação da penetração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11341:2015: Derivados de petróleo – determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14950:2003: materiais betuminosos – determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15184:2021: materiais betuminosos – determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 07 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 897, de 18 de novembro de 2022. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-897-2022>. Acesso em: 12 nov. 2025.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Barueri, SP: Manole, 2007.

ASHISH, P. K. et al. **Closing the Loop: Harnessing waste plastics for sustainable asphalt mixtures** – A comprehensive review. Construction and Building Materials, v. 400, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132858>. Acesso em: 2 nov. 2025.

BELLIS, Mary. **The History of Polyester**. ThoughtCo, fev. 2021. Disponível em: <https://thoughtco.com/history-of-polyester-4072579>. Acesso em: 30 out. 2025.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2006.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber, 2013.

CARNEIRO, F. L. **Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2024**. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/cbf59b9e-fd1a-41fc-b230-172c4dc42100>. Acesso em: 6 out. 2025.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 079/94: **Agregado – adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 083/98: **Agregados – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT **IPR-719: Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2024 – ES: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Brasília, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136/2018 – ME: **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Brasília, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 411/2021 – ME: **Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio**. Brasília, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 412/2019 – ME: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio**. Brasília, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 425/2020 – ME: **Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 447/2024 – ME: **Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio**. Brasília, 2024.

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

FRANCESCA, Russo; ORETO, Cristina; VEROPALUMBO, Rosa. **Promoting resource conservation in road flexible pavement using jet grouting and plastic waste as filler. Resources, Conservation and Recycling, v. 187, 2022.** Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106633>. Acesso em: 8 nov. 2025.

GONÇALVES, Fernando Pugliero. **Desempenho dos Pavimentos Flexíveis.** Rio Grande do Sul, 1999.

HABIBI, N. Z. et al. **Rheological properties of polyethylene and polypropylene modified bitumen. World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 72, n. 12, p. 293–297, 2010.** Acesso em: 5 nov. 2025.

MELLO, L. G. R.; FARIAS, M. M.; PREUSSLER, E. S.; PREUSSLER, R. **Análise do impacto do período de projeto de pavimentos no custo global de obras rodoviárias. TRANSPORTES, v. 24, n. 4, p. 64–74, 2016.** Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1056>. Acesso em: 8 set. 2023.

MOURÃO, Romão; SPINACÉ, Márcia A. S.; DE PAOLI, Marco A. **PoliTereftalato de Etileno) – PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009.** Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000200009>. Acesso em: 14 set. 2025.

MOVILLA-QUESADA, D. et al. **Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. Waste Management, v. 87, 2019.** Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.018>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SILVA, E. F. da; MESQUITA, M. V. **Use of Ethylene Polyterephthalate (PET) as aggregate in concrete block. Research, Society and Development, v. 11, n. 12.** Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/34198>. Acesso em: 10 nov. 2025.