

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

IAGO OGATTA MAIA
LEONARDO BUENO MOULIN E SILVA

**ANÁLISE LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA COM PLÁSTICO
RECICLADO**

PONTA GROSSA
2024

**IAGO OGATTA MAIA
LEONARDO BUENO MOULIN E SILVA**

**ANÁLISE LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA COM
PLÁSTICO RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador (a): Prof^a. Dra. Lilian Tais de
Gouveia

**PONTA GROSSA
2024**

IAGO OGATTA MAIA
LEONARDO BUENO MOULIN E SILVA

**ANÁLISE LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA COM PLÁSTICO
RECICLADO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Lilian Tais de Gouveia
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^a. Dra. Maria Magdalena Ribas Doll
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Sérgio Luiz Schulz
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 28 de outubro de 2024

RESUMO

A mistura asfáltica com plástico reciclado é um material relativamente novo que tem mostrado bons resultados em pavimentos. Ela apresenta melhoras significativas nas propriedades da mistura asfáltica e é uma maneira sustentável de destinar o plástico, ajudando a diminuir problemas ambientais. O presente trabalho tem como objetivo comparar os resultados obtidos da mistura asfáltica modificada com agregado de plástico quanto à estabilidade, resistência à compressão e resistência à tração com os valores de referência da Norma DNIT 031/2006 para concreto asfáltico. São analisados os parâmetros mecânicos e volumétricos da mistura para a obtenção dos resultados. Com base nos resultados obtidos no trabalho é possível concluir que as misturas asfálticas modificadas com plástico reciclado apresentam melhoras em relação a estabilidade e fluência do asfalto e pioram em relação à resistência à tração, quando comparados ao grupo de controle.

Palavras-chave: Agregado-plástico; Asfalto plástico via seca; Pavimento sustentável.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao apoio e colaboração de diversas pessoas e instituições, a quem expressamos nossa mais sincera gratidão.

Em primeiro lugar, agradecemos à nossa orientadora, Prof^a. Dra. Lilian Tais de Gouveia, pela paciência, dedicação e orientações valiosas ao longo de todo o processo. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e somos profundamente gratos pelo seu constante incentivo e sabedoria.

Agradecemos também à equipe do Laboratório de Pavimentação, que nos proporcionou o suporte técnico necessário para a realização dos ensaios. Sem a colaboração e disponibilidade de todos os envolvidos, este trabalho não teria sido possível.

Aos nossos familiares, pela compreensão, incentivo e apoio incondicional durante toda a jornada acadêmica, somos imensamente gratos. Agradecemos também aos nossos amigos, que sempre estiveram ao nosso lado, oferecendo suporte emocional e palavras de encorajamento.

Não poderíamos deixar de expressar nossa gratidão aos professores do curso de Engenharia Civil, que contribuíram para nossa formação acadêmica, transmitindo conhecimento e nos desafiando a buscar sempre o melhor.

Por fim, agradecemos à empresa 2D Plásticos pelo fornecimento dos materiais de PVC triturados utilizados na pesquisa, viabilizando a realização dos ensaios experimentais deste trabalho.

A todos, o nosso mais sincero muito obrigado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de fabricação do asfalto borracha via úmida	14
Figura 2 – Gráfico da Curva Granulométrica	21
Figura 3 – Agregados utilizados em um CP	22
Figura 4 – Curva Viscosidade x Temperatura	23
Figura 5 – Compactação dos CPs	24
Figura 6 – Remoção dos CPs do molde	24
Figura 7 – CPs feitos para a dosagem ótima	25
Figura 8 – PVC grosso junto com os agregados	26
Figura 9 – PVC fino junto com os agregados	26
Figura 10 – Amostras de PVC (120 g) em beckers de 250 ml	27
Figura 11 – PVC grosso com os agregados aquecidos	27
Figura 12 – PVC fino com os agregados aquecidos	28
Figura 13 – CPs modificados e CPs de controle	28
Figura 14 – Preparo da amostra para ensaio Densidade Rice	29
Figura 15 – Conjunto mesa vibratória e bomba	30
Figura 16 – Balança utilizada no ensaio de Densidade Aparente	32
Figura 17 – Ensaio de Estabilidade e fluência Marshall	33
Figura 18 – Fatores de correção para o ensaio de Estabilidade e fluência Marshall	34
Figura 19 – Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral	35
Figura 20 – Gráfico de densidade x teor de CAP	36
Figura 21 – Gráfico de estabilidade	38
Figura 22 – Gráfico de fluência	39
Figura 23 – Teor ótimo	40
Figura 24 – Gráfico de resultados do ensaio de densidade aparente PVC grosso	42
Figura 25 – Gráfico de comparação entre as médias de Dap de controle e com PVC grosso	42
Figura 26 – Gráfico de resultados do ensaio de densidade aparente PVC fino	43
Figura 27 – Gráfico de comparação entre as médias de Dap de controle e com PVC fino	43
Figura 28 – Gráfico de resultados do ensaio de estabilidade PVC fino	45

Figura 29 – Gráfico de comparação entre as médias de estabilidade de controle e com PVC fino	45
Figura 30 – Gráfico de resultados do ensaio de estabilidade PVC fino	46
Figura 31 – Gráfico de comparação entre as médias de estabilidade de controle e com PVC grosso	46
Figura 32 – CP G6, erro na leitura do ensaio e Figura 33 – CP G6, erro na leitura do ensaio	47
Figura 33 – Gráfico de resultados do ensaio de fluência PVC fino	48
Figura 34 – Gráfico de comparação entre as médias de fluência de controle e com PVC fino	48
Figura 35 – Gráfico de resultados do ensaio de fluência PVC grosso	49
Figura 36 – Gráfico de comparação entre as médias de fluência de controle e com PVC grosso	49
Figura 37 – Gráfico de resultados do ensaio de Resistência à tração do PVC fino	50
Figura 38 – Gráfico de comparação entre as médias de RT de controle e com PVC fino	51
Figura 39 – Gráfico de resultados do ensaio de Resistência à tração do PVC grosso	51
Figura 40 – Gráfico de comparação entre as médias de RT de controle e com PVC grosso	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Projeto Granulométrico	21
Tabela 2 – Teores e granulometria de CAP para dosagem	23
Tabela 3 – Valores do ensaio de Densidade Aparente para dosagem	37
Tabela 4 – Valores do ensaio de Estabilidade e fluência Marshall para dosagem	38
Tabela 5 – Resultado das dosagens	39
Tabela 6 – Valores do ensaio de Densidade Aparente	41
Tabela 7 – Valores do ensaio de Estabilidade Marshall	44
Tabela 8 – Valores do ensaio de fluência Marshall	47
Tabela 9 – Valores do ensaio de Resistência à tração indireta por compressão diametral	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAUQ	-Areia Asfalto Usinada à Quente
CA	-Concreto Asfáltico
CAP	-Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	-Cimento Betuminoso Usinado Quente
CNT	-Confederação Nacional de Transportes
CP	-Corpo de prova
DNER	-Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	-Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	-Emulsão asfáltica de petróleo
LA	-Lama asfáltica
MRAF	-Micro revestimento asfáltico
PE	-Polietileno
PET	-Polietileno tereftalato
PMF	-Pré-misturado a frio
PP	-Polipropileno
PS	-Poliestireno
PVC	-Policloreto de vinilo
VV	-Volume de vazios
WWF	-World Wide Fund for Nature

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	ASFALTOS MODIFICADOS	14
2.1.1	Asfalto Borracha	14
2.1.2	Asfalto Plástico	15
2.1.3	Asfalto modificado com polímero	15
2.2	PLÁSTICOS MAIS ADEQUADOS PARA PAVIMENTAÇÃO	16
2.2.1	Polipropileno (PP)	16
2.2.2	Poliestireno (PS)	17
2.2.3	Polietileno (PE)	18
2.2.4	Polietileno tereftalato (PET)	18
2.2.5	Policloreto de Vinila (PVC)	19
2.3	TÉCNICAS DE INCORPORAÇÃO POR VIA SECA	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	PROJETO GRANULOMÉTRICO DA MISTURA	20
3.2	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA (CPs)	22
3.3	ENSAIOS FÍSICOS	29
3.3.1	Ensaio Rice	29
3.3.2	Densidade aparente	32
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS	33

3.4.1	Estabilidade e Fluência Marshall	33
3.4.2	Resistência à tração indireta por compressão diametral	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	DOSAGEM	36
4.1.1	Densidade Aparente	36
4.1.2	Estabilidade e Fluência de Marshall	37
4.1.3	Ensaio Rice e Escolha do teor Ótimo	39
4.2	RESULTADO DOS CORPOS-DE-PROVA COM PVC	40
4.2.1	Densidade Aparente dos Corpos-de-prova com PVC	40
4.3	ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA DOS CPS COM PVC	43
4.3.1	Ensaio de Estabilidade dos CPs com PVC	44
4.3.2	Ensaio de Fluência Marshall dos CPs com PVC	47
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	50
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pela humanidade, seu uso vai desde a agricultura até a indústria, sendo o uso em pavimentação um dos mais importantes. A pavimentação asfáltica é utilizada em todo o mundo, no Brasil cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, sendo utilizado também em grande parte das vias urbanas, (BERNUCCI et al., 2008).

O revestimento asfáltico é a camada superior, que recebe diretamente as ações do tráfego e transmite às camadas inferiores, responsável por impermeabilizar o pavimento e gerar conforto e segurança para os usuários, (BERNUCCI et al., 2008).

Com o passar dos anos o número de usuários utilizando as vias é cada vez maior devido a esse aumento a melhoria da qualidade dos pavimentos é essencial, e a busca por essa melhoria ocorre através do desenvolvimento de novas tecnologias, de novos materiais e criação de outras técnicas. Conforme a pesquisa realizada pela Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2023), 67,5% das rodovias brasileiras têm sua extensão classificada como regular, ruim ou péssima, enquanto 32,5% foi classificada como ótima ou boa, enquanto em 2022 a pesquisa apontou 66% classificadas como regular, ruim ou péssima e 34% como ótima ou boa. No atual cenário de piora das rodovias do Brasil, o uso e pesquisa de misturas asfálticas modificadas vem se tornando cada vez maior, a fim de buscar melhorias nas estradas. No entanto, para implementar novas tecnologias e materiais não se deve pensar apenas no quesito resultado, mas sim em todo conjunto de sustentabilidade, economia e técnica. Pensando no quesito sustentabilidade, surge uma nova alternativa que pode melhorar a qualidade e durabilidade das vias, a mistura asfáltica com plástico reciclado.

1.1 JUSTIFICATIVA

A qualidade dos pavimentos rodoviários impacta diretamente nas operações de transporte rodoviário e na economia brasileira. Rodovias mal pavimentadas aumentam os custos operacionais de transporte, reduzem a segurança e o conforto dos usuários e cargas, além de causar prejuízos ambientais.

De acordo com a CNT (2018), alguns dos principais defeitos das rodovias brasileiras são trincas em malha tipo “couro de jacaré”, trincas em malha tipo “bloco”, afundamento de consolidação, desgaste, panela ou buraco, etc. Esses problemas podem ser causados pela falta de resistência, fim da vida útil e acúmulo de água no pavimento.

De acordo com a pesquisa realizada em 2019 do World Wide Fund for Nature (WWF) - Fundo Mundial para a Natureza, o Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico do mundo, com 11,3 milhões de toneladas. Desse total, mais de 10,3 milhões de toneladas foram coletadas (91%), mas apenas 145 mil toneladas (1,28%) foram efetivamente recicladas. Segundo a pesquisa, esse é um dos menores índices de reciclagem plástica, e está bem abaixo da média global, que é 9%.

A reciclagem de plásticos para uso adequado em misturas asfálticas na pavimentação tem se mostrado como uma solução sustentável para lidar com os resíduos plásticos enquanto pode melhorar a qualidade e durabilidade das estradas (Ma et al., 2021; Ministério das Ferrovias da Índia, 2019). Espera-se que ao utilizar plásticos reciclados na pavimentação alguns benefícios sejam alcançados, que incluem: redução da quantidade de resíduos plásticos destinados a aterros sanitários ou descartados no ambiente; a conservação de recursos naturais com a possível redução da quantidade de asfalto ou de agregados minerais no revestimento; melhoria da durabilidade e qualidade das estradas, pois há indícios de que plásticos reciclados incorporados às misturas asfálticas melhoram suas propriedades mecânicas, resultando em estradas mais duráveis e resistentes ao tráfego e às condições climáticas adversas e, por consequência, conduz à redução dos custos de manutenção e a frequência de manutenções e reabilitação dos pavimentos (Xu, 2022). Além disso, o uso de resíduo plástico na pavimentação tem o potencial de implementar a economia circular, pois a reciclagem de plásticos para uso em revestimentos asfálticos faz parte de um modelo de economia circular, no qual os materiais são reciclados para minimizar o desperdício e maximizar o valor dos recursos, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável (PNUMA, 2024; CE100 Brasil, 2017).

No entanto, é importante ressaltar que a utilização de plásticos reciclados na pavimentação requer pesquisa e desenvolvimento contínuos para garantir a

qualidade e o desempenho adequados das misturas asfálticas modificadas com plástico. Além disso, é necessário estabelecer regulamentações e padrões técnicos para orientar a utilização segura e eficaz de plásticos reciclados na pavimentação, garantindo a qualidade das estradas e a proteção do meio ambiente.

Considerando os problemas associados à disposição de resíduos plásticos e aos repetidos danos ao pavimento asfáltico, são necessários ensaios de avaliação mecânica e volumétrica dos efeitos do plástico reciclado na mistura asfáltica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades volumétricas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com plástico reciclado.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Investigar através de ensaios laboratoriais as misturas modificadas com agregado de plástico reciclado incorporado por via seca;
- b) Analisar comparativamente os resultados obtidos das misturas modificadas com plástico reciclado por via seca com os valores normalizados para concreto asfáltico na norma DNIT 031/2006 e com o grupo de controle.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASFALTOS MODIFICADOS

2.1.1 Asfalto Borracha

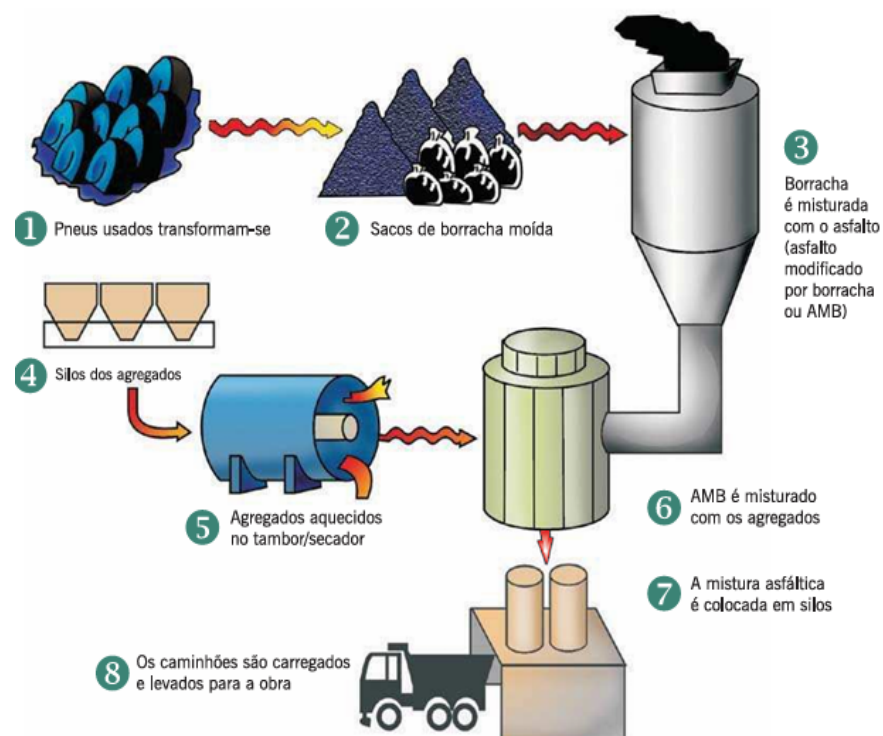
O asfalto borracha é uma forma alternativa de incorporar os benefícios de um polímero ao ligante asfáltico, ajudando a reduzir os problemas ambientais com o descarte de pneus (BERNUCCI *et al.*, 2008), seja pelo seu longo tempo de decomposição na natureza ou eliminando possíveis focos de dengue.

Para incorporar a borracha triturada nas misturas asfálticas existem dois métodos que são utilizados, são eles:

- a) Processo úmido;
- b) Processo seco.

No processo úmido, a borracha triturada é adicionada ao CAP aquecido, produzindo um ligante asfáltico modificado, chamado de asfalto borracha.

Figura 1 – Esquema de fabricação do asfalto borracha via úmida



Fonte: BERNUCCI *et al.*, (2008)

No processo seco, a borracha triturada entra como parte do agregado da mistura, dando origem ao “agregado-borracha”.

EcoPistas (2020) cita como as principais vantagens do asfalto borracha em relação ao CA convencional:

- a) Aumento da resistência;
- b) Aumento da elasticidade;
- c) Melhora da aderência;
- d) Redução do risco de aquaplanagem.

2.1.2 Asfalto Plástico

O concreto asfáltico modificado com plástico, também conhecido como asfalto-plástico, é o concreto asfáltico convencional adicionado de plásticos reciclados. Neste tipo de mistura podem ser utilizados diversos tipos de plásticos (MA *et al.*, 2021), que incluem: Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Polietileno tereftalato (PET), Polietileno (PE), Policloreto de Vinila (PVC).

De acordo com MA *et al.*, (2021), existem duas maneiras de incorporar o plástico reciclado na mistura asfáltica, o processo úmido e o processo seco. A escolha de qual processo utilizar vai depender do plástico utilizado, pois alguns deles vão apresentar melhores resultados em um método específico, devido a algumas características específicas de cada tipo de plástico.

No processo de via úmida, onde o plástico reciclado é acrescentado em forma de pó ao ligante asfáltico, os plásticos que apresentam melhores resultados são os que possuem uma temperatura de derretimento menor, como o PE (MA *et al.*, 2021). Já no processo de via seca, onde o plástico é adicionado como parte do agregado na mistura, os plásticos que apresentam melhores resultados são aqueles que possuem uma temperatura de derretimento maior, como o PET e o PS (MA *et al.*, 2021).

2.1.3 Asfalto modificado com polímero

Para que se entenda o conceito de asfalto modificado com polímero, é necessário compreender as definições de macromoléculas e polímeros segundo (MANO *et al.*, 1985, 1991):

- a) Macromoléculas são moléculas gigantescas que resultam do encadeamento de dez mil ou mais átomos de carbono, unidos por

ligações covalentes, podendo ser naturais (madeira, borracha, lã, asfalto etc.) ou sintéticas (plásticos, borrachas, adesivos etc.);

- b) Polímeros (do grego “muitas partes”) são macromoléculas sintéticas, estruturalmente simples, constituídas de unidades estruturais repetidas em sua longa cadeia, denominadas monômeros. Os homopolímeros são constituídos por apenas um monômero, e os copolímeros são os que apresentam pelo menos dois monômeros em sua estrutura.

Esses polímeros de vários tipos modificam a propriedade do asfalto melhorando o desempenho do ligante, satisfazendo os requisitos necessários para o bom desempenho de um asfalto.

Nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao CAP e nem todo CAP quando modificado por polímeros apresenta estabilidade à estocagem. Os asfaltos que melhor se compatibilizam com polímeros são aqueles que apresentam uma certa aromaticidade, ou seja, aqueles que possuem estruturas baseadas em anéis de carbono com ligações duplas conjugadas, como o benzeno. A quantidade de polímero que deve ser adicionada ao ligante é variável e depende das propriedades finais desejadas. É necessário também verificar a adequada dispersão do polímero no CAP, de forma que a matriz polimérica fique fixada na estrutura do asfalto, ocluída nas malhas do mesmo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O Grupo de polímeros mais utilizados na pavimentação, são os termoplásticos, que são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC (MANO *et al.*, 1985, 1991 e LEITE *et al.*, 1999).

Cada modificador (polímero) vai ter seus benefícios específicos, entre eles estão a redução de trincas térmicas e por fadiga, diminuição na deformação permanente e dano por umidade e ajuda a diminuir envelhecimento da mistura.

2.2 PLÁSTICOS MAIS ADEQUADOS PARA PAVIMENTAÇÃO

2.2.1 Polipropileno (PP)

O polipropileno ou PP é um polímero termoplástico produzido a partir da polimerização do gás propileno ou propeno. Trata-se de um tipo de plástico que pode ser moldado quando submetido a temperatura elevada, por isso é classificado como um termoplástico (MAIS POLÍMEROS, 2019).

Alguns exemplos de aplicação do Polipropileno (PP) são:

- a) Cadeiras plásticas;
- b) Brinquedos;
- c) Copos plásticos;
- d) Eletrodomésticos.

O polipropileno (PP) é uma resina de baixa densidade. Tem propriedades muito semelhantes às do polietileno (PE), mas seu ponto de amolecimento é mais elevado.

Suas principais características são:

- a) Resistência química;
- b) Fácil moldagem;
- c) Resistência moderada ao impacto;
- d) Boa estabilidade térmica;
- e) Resistência à flexão;
- f) Baixa absorção de umidade.

2.2.2 Poliestireno (PS)

O poliestireno ou PS é uma resina termoplástica dura, amorfa e transparente polimerizada através do estireno (vinil benzeno). Essa polimerização acontece com aquecimento de uma suspensão em água e utilizando-se peróxidos para iniciar a reação (MAIS POLÍMEROS, 2019).

O PS é um polímero sintético de adição versátil, por isso pode ser utilizado de 3 maneiras:

- a) Como poliestireno comum (cristal);
- b) Como poliestireno de alto impacto;
- c) Como isopor.

Dentre as principais características do poliestireno de alto impacto estão:

- a) Alta rigidez;
- b) Alta resistência ao impacto;

- c) Boa resistência térmica;
- d) Resistência química;
- e) Resistência à abrasão.

2.2.3 Polietileno (PE)

O polietileno ou PE é uma resina termoplástica parcialmente cristalina e flexível, obtida através da polimerização do etileno.

Em temperatura abaixo de 60 °C, o polietileno é parcialmente solúvel em todos os solventes. E sua temperatura de total deformação e fusão é entre 110 e 115 °C.

São 3 principais tipos de polietileno:

- a) PEBD (polietileno de baixa densidade),
- b) PEAD (polietileno de alta densidade)
- c) PEBDL (polietileno de baixa densidade linear).

O polietileno de baixa densidade (PEBD) possui um mix de propriedades que é único, combinando tenacidade, boa resistência ao impacto, flexibilidade alta, fácil processabilidade, propriedades elétricas notáveis e estabilidade (MAIS POLÍMEROS, 2019).

2.2.4 Polietileno tereftalato (PET)

O polietileno tereftalato, também conhecido popularmente como PET, é um dos plásticos mais reciclados no mundo. Consiste em um polímero termoplástico que apresenta uma combinação única de propriedades, como resistência, transparência, sustentabilidade, versatilidade e muito mais.

Quando aquecido acima de sua temperatura de fusão (cerca de 250 °C), ele fica macio e maleável, podendo ser moldado em diferentes formatos. Ao esfriar, ele solidifica novamente, mantendo a forma adquirida (ROMÃO *et al.*, 2009).

As principais características do PET são:

- a) Resistência mecânica (impacto e estrutural);
- b) Resistência química;

- c) Apresenta ótima barreira contra gases e odores;
- d) Rígido;
- e) Maleável;
- f) Impermeável.

2.2.5 Policloreto de Vinila (PVC)

Segundo o Instituto Brasileiro do PVC, este tipo de plástico é composto por uma mistura de 57% de cloro e 43% de eteno. Ele é largamente utilizado em diversas áreas da indústria brasileira, mostrando-se essencial para o seu desenvolvimento.

O seu maior uso é na construção civil, segmento que necessita de produtos competitivos, econômicos energeticamente e de longa vida útil. O ciclo de vida útil dos produtos de PVC varia de 15 a 100 anos, sendo a média superior a 60 anos.

As principais características do PVC são:

- a) Resistência mecânica (impacto e estrutural);
- b) Resistência química;
- c) Apresenta ótima barreira contra gases e odores;
- d) Durável;
- e) Impermeável.

2.3 TÉCNICAS DE INCORPORAÇÃO POR VIA SECA

Em uma pesquisa desenvolvida Arao *et al.* (2017), foi avaliado o desempenho de misturas asfálticas de concreto asfáltico com adição de PET em forma de flocos e pó de PET, ambos em substituição a parte do agregado miúdo. Foram realizadas misturas com a adição exclusiva de flocos e outras com a combinação de flocos e pó de PET, variando a porcentagem de incorporação, a granulometria dos flocos e a ação conjunta dos flocos com o pó de PET.

Dehghan e Modarres *et al.*, (2017) realizaram um estudo para avaliar o impacto das fibras recicladas de PET nas propriedades de fadiga de uma mistura usinada a quente, utilizando o processo de incorporação via seca. Foram usadas fibras em dois comprimentos, de 1 cm e 2 cm, ambas com um diâmetro médio de 30 μm .

Jegatheesan *et al.*, (2020) investigou as propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica quente que continha PET e partículas de madeira carbonizada, através da análise de propriedades físicas, estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração indireta e absorção de água. Partículas de madeira carbonizada foram utilizadas para substituir porcentagens da massa dos agregados finos na mistura.

A pesquisa de Brito *et al.*, (2020) mostrou o comportamento mecânico de misturas do tipo Areia Asfalto Usinada à Quente (AAUQ), substituindo parte da areia por PET micronizado através do processo seco.

Essa revisão bibliográfica abordou alguns aspectos e estudos sobre misturas asfálticas modificadas e técnicas de incorporação de plásticos reciclados nas misturas.

3 METODOLOGIA

Para iniciar a parte prática do presente trabalho, foram realizadas visitas e ligações para usinas de reciclagem em Ponta Grossa. Após falar com diversas usinas e saber quais tipos de plástico estavam disponíveis na cidade, optou-se por utilizar o Policloreto de Vinila (PVC) devido às suas características serem compatíveis com a utilização em altas temperaturas.

Foram obtidos duas amostras de PVC que vieram diretamente da empresa 2D Plásticos, uma amostra com granulometria fina e uma amostra com granulometria mais grossa.

3.1 PROJETO GRANULOMÉTRICO DA MISTURA

Para realizar o projeto granulométrico foi utilizada a faixa B do DNIT. O método das tentativas foi utilizado para o projeto granulométrico das misturas e o resultado obtido pode ser observado na Tabela 1 e o gráfico na Figura 2:

Figura 2 – Gráfico da Curva Granulométrica

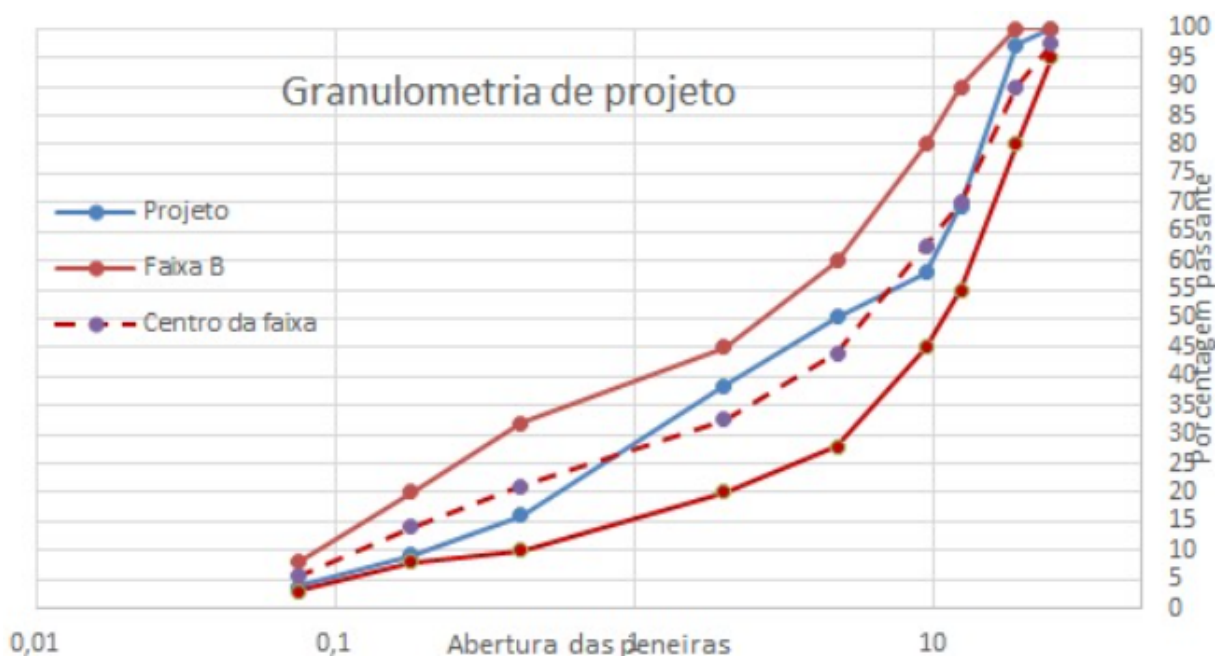


Tabela 1 – Projeto Granulométrico

Abertura	Gran. de Projeto	Massa para 1200g
24,4	100	0
19,1	97	36
12,7	69	336
9,5	58	132
4,8	50	96
2	38	144
0,42	16	264
0,18	9	84
0,075	4	60
Fundo		48
Total		1200

Fonte: Os autores (2024)

Foram utilizados 2 tipos de agregados, o diabásio e o granito rosa, o diabásio numa granulometria maior, para as primeiras peneiras, e o granito rosa numa granulometria menor, para as peneiras mais finas, como ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Agregados utilizados em um CP



Fonte: Os autores (2024)

3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA (CPs)

A moldagem dos corpos de prova foi feita seguindo as instruções da norma DNER 043/1995. Para a moldagem dos CPs foram utilizados 1200 gramas de agregado, conforme especificado pela norma, com energia de compactação de 75 golpes em cada face.

Os agregados ficaram por, pelo menos, 12 horas na estufa a uma temperatura de 175 °C antes de serem compactados. O CAP utilizado foi o 50/70 e foi misturado ao agregado quando atingiu a temperatura de 160 °C. Para a compactação a mistura foi levada ao molde quando estava com uma temperatura entre 138 °C e 143°C, conforme Curva de viscosidade x temperatura, apresentado na Figura 4. Depois disso foram feitos 75 golpes em cada face dos CPs, como mostra a Figura 5.

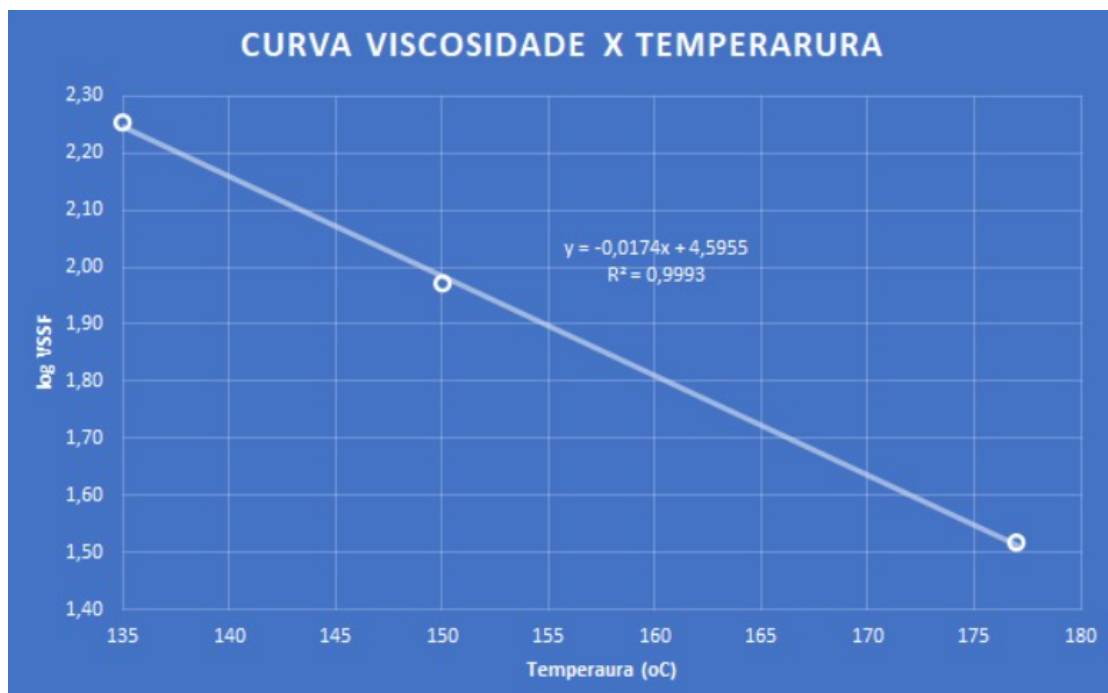
Inicialmente foram feitos 15 CPs, para realizar a dosagem do asfalto, sem a adição de plástico, como mostra a Tabela 2:

Tabela 2 – Teores e granulometria de CAP para dosagem

% CAP	Peso (g)
5	63,2
5,5	69,8
6	76,6
6,5	83,4
7	90,3

Fonte: Os autores (2024)

Figura 4 – Curva Viscosidade x Temperatura



Fonte: Os autores (2024)

Figura 5 – Compactação dos CPs



Fonte: Os autores (2024)

Após realizar a compactação dos CPs eles foram levados a água fria até atingirem uma temperatura de cerca de 21 °C para serem retirados do molde, através de um macaco hidráulico, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Remoção dos CPs do molde



Fonte: Os autores (2024)

Figura 7 – CPs feitos para a dosagem ótima



Fonte: Os autores (2024)

Posteriormente foram feitos mais 15 CPs, no teor ótimo de asfalto, sendo 3 deles de concreto asfáltico sem adição de plástico (grupo de controle), e outros 12 com adição de PVC.

Em resumo, foram moldados 15 CPs com o teor ótimo de asfalto, 3 como grupo de controle, 6 com adição de resíduo plástico grosso (Figura 8) e 6 com adição de resíduo plástico fino (Figura 9). A adição de plástico na mistura foi de 10% em relação à massa de agregados, ou seja, 120 g. A quantidade de resíduo plástico foi separada para cada corpo-de-prova para ser adicionado no momento da mistura, como mostra a Figura 10.

Figura 8 – PVC grosso junto com os agregados



Fonte: Os autores (2024)

Figura 9 – PVC fino junto com os agregados



Fonte: Os autores (2024)

Figura 10 – Amostras de PVC (120 g) em beckers de 250 ml



Fonte: Os autores (2024)

Para a incorporação do resíduo plástico à mistura, após retirar o agregado aquecido da estufa na temperatura de 175 °C, foi misturado o plástico não aquecido ao agregado quente, seguido pela adição do CAP na temperatura de 160 °C (Figura 11 e Figura 12). Optou-se por não colocar o plástico na estufa devido à sua temperatura de transição ser por volta de 87 °C (Canevarolo, 2006), que poderia prejudicar a adesão do asfalto nos agregados.

Figura 11 – PVC grosso com os agregados aquecidos



Fonte: Os autores (2024)

Figura 12 – PVC fino com os agregados aquecidos



Fonte: Os autores (2024)

Foram utilizados os mesmos processos e temperaturas dos 15 CPs iniciais para compactação e retirada do molde. Os corpos de prova podem ser vistos na Figura 13.

Figura 13 – CPs modificados e CPs de controle



Fonte: Os autores (2024)

3.3 ENSAIOS FÍSICOS

3.3.1 Ensaio Rice

O ensaio Rice foi realizado, seguindo a Norma AASHTO T (209/1999), para obter a densidade máxima teórica ou densidade máxima medida da mistura. Esse valor foi utilizado para os cálculos do Vv, absorção do ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado e teor de asfalto efetivo da mistura. (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Para o ensaio Rice o CP deve ser desmontado, separando todos os agregados. Os agregados que não foram totalmente cobertos com CAP devem ser retirados da amostra do ensaio, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Preparo da amostra para ensaio Densidade Rice



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

Com a amostra preparada, ela é colocada num kitassato e pesada, após isso a amostra é coberta com água destilada e levada para uma mesa vibratória com uma bomba de vácuo parcial conectada por cerca de 15 minutos, para retirar todo o ar presente na amostra (Figura 15).

Figura 15 – Conjunto mesa vibratória e bomba



Fonte: Os autores (2024)

Após retirar o kitassato da mesa vibratória ele é completado com água destilada e pesado, e depois foi feita a leitura da temperatura do conjunto. A determinação da DMM foi obtida como mostra a Equação 1.

$$DMM = \frac{A}{A+D-E} \quad (1)$$

Onde:

DMM = densidade máxima medida;

A = massa da amostra seca;

D = massa do kitassato preenchido com água;

E = massa do conjunto (kitassato, amostra, água);

Conhecida a DMM da mistura, foi calculada a densidade efetiva dos agregados, através da Equação 2.

$$\rho_{ef} = \frac{1-P_b}{\frac{1}{DMM} - \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ef} = densidade efetiva dos agregados;

P_b = porcentagem de asfalto na mistura;

ρ_b = densidade do asfalto;

O Volume de vazios foi determinado como mostra a Equação 3.

$$V_v = \frac{DMM - d_{ap}}{DMM} \times 100 \quad (3)$$

onde:

V_v = volume de vazios (%);

d_{ap} = densidade aparente.

O VCB (porcentagem de volume de vazios com betume na mistura asfáltica compactada) foi determinado utilizando a Equação 4.

$$VCB = \frac{d_{ap} \times P_b}{\rho_b} \quad (4)$$

O VAM (volume de vazios de agregados mineiras) foi calculado utilizando a Equação 5.

$$VAM = Vv + VCB \quad (5)$$

A RBV (Relação Betume Vazios) foi calculada utilizando a Equação 6.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (6)$$

A Abs_{cap} (absorção de asfalto pelo agregado) foi calculada pela Equação 7.

$$Abs_{cap} = 100 \times \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_b \quad (7)$$

Onde:

Abs_{cap} : teor de asfalto absorvido pelo agregado (%);

ρ_{ef} : densidade efetiva do agregado;

ρ_{ap} : densidade aparente do agregado;

ρ_b : densidade do asfalto.

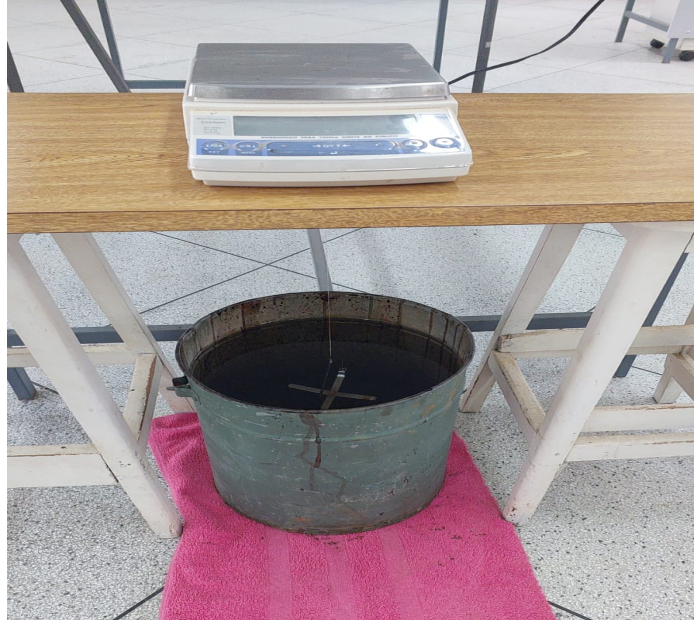
3.3.2 Densidade aparente

O ensaio de densidade aparente pode ser feito de duas maneiras diferentes. Seguindo a Norma ASTM D 2726 esse cálculo deve ser feito utilizando entre a massa saturada seca e submersa em água. Já para a Norma DNER-ME 117/94 o cálculo deve ser feito utilizando a relação entre a massa do corpo-de-prova seco e a diferença entre a massa seca e a massa seca do corpo-de-prova submerso em água.

Este ensaio foi realizado seguindo a Norma DNER-ME 117/94. Inicialmente foi medida a altura em 4 extremidades dos corpos-de-prova, com um paquímetro digital, e calculada a altura média de cada CP.

Todos os CPs foram pesados ao ar e, posteriormente, foram pesados submersos em água (Figura 16). Com esses valores disponíveis é possível calcular a densidade aparente dos corpos-de-prova utilizando a Equação 8.

Figura 16 – Balança utilizada no ensaio de Densidade Aparente



Fonte: Os autores (2024)

$$D_{ap} = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_i} \quad (8)$$

Onde:

dap = densidade aparente;

Par = massa no ar;

Pi = massa imersa;

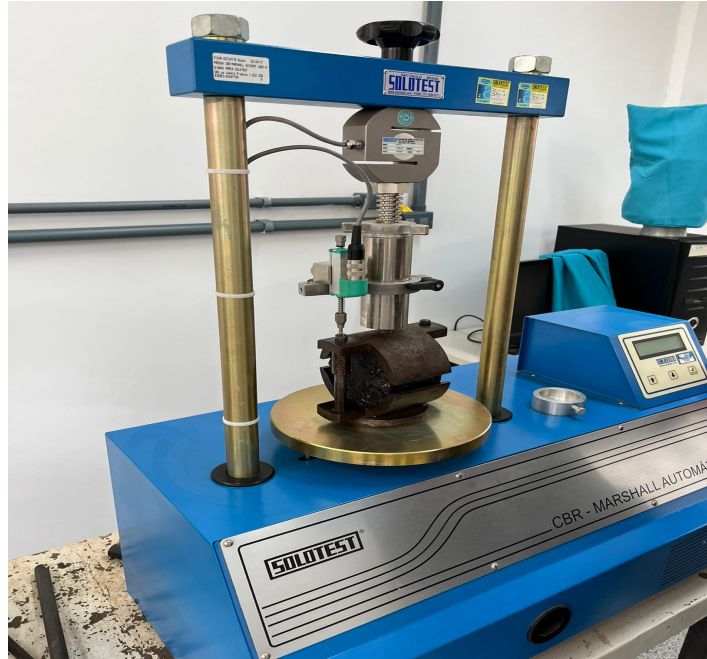
3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

3.4.1 Estabilidade e Fluência Marshall

Para o ensaio de estabilidade e fluência Marshall uma carga de compressão é aplicada no corpo-de-prova até a ruptura, podendo ocorrer deslocamento ou quebra de agregados (Figura 17). O valor máximo registrado é chamado de estabilidade Marshall e ocorre no momento da ruptura, o deslocamento vertical do prato inferior é chamado de fluência (BERNUCCI *et al.*, 2006). Para a realização do ensaio os CPs devem ficar na estufa a 60 °C por 40 minutos.

Com o valor de estabilidade obtido após o ensaio, foi feita sua correção utilizando a Tabela de correção de estabilidade, que leva em função a altura do corpo de prova, multiplicando o valor da estabilidade encontrado com o fator de correção (Figura 18).

Figura 17 – Ensaio de Estabilidade e fluência Marshall



Fonte: Os autores (2024)

Figura 18 – Fatores de correção para o ensaio de Estabilidade e fluência Marshall

Espessura do corpo de prova (mm)	Fator de correção (f)	Espessura do corpo de prova (mm)	Fator de correção (f)	Espessura do corpo de prova (mm)	Fator de correção (f)
50,8	1,47	56,3	1,22	64,3	0,98
51,0	1,45	56,6	1,21	64,7	0,97
51,2	1,44	56,8	1,20	65,1	0,96
51,6	1,43	57,2	1,19	65,6	0,95
51,8	1,42	57,4	1,18	66,1	0,94
52,0	1,41	57,7	1,18	66,7	0,93
52,2	1,40	58,1	1,16	67,1	0,92
52,4	1,39	58,4	1,15	67,5	0,91
52,6	1,38	58,7	1,14	67,9	0,90
52,9	1,37	59,0	1,13	68,3	0,89
53,1	1,36	59,3	1,12	68,8	0,88
53,3	1,35	59,7	1,11	69,3	0,87
53,5	1,34	60,0	1,10	69,9	0,86
53,8	1,33	60,3	1,09	70,3	0,85
54,0	1,32	60,6	1,08	70,8	0,84
54,2	1,31	60,9	1,07	71,4	0,83
54,5	1,30	61,1	1,06	72,2	0,82
54,7	1,29	61,4	1,05	73,0	0,81
54,9	1,28	61,9	1,04	73,5	0,80
55,1	1,27	62,3	1,03	74,0	0,79
55,4	1,26	62,7	1,02	74,6	0,78
55,6	1,25	63,1	1,01	75,4	0,77
55,8	1,24	63,5	1,00	76,2	0,76
56,1	1,23	63,9	0,99		

Fonte: DNIT 447/2024

3.4.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral

Este ensaio foi desenvolvido no ano de 1943 pelo professor Lobo Carneiro e ficou conhecido como ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração para concreto de cimento Portland. O ensaio é normatizado pela norma DNIT 136/2018.

O ensaio consiste em colocar os CPs na estufa, a 25 °C por 4 horas. Posteriormente eles são colocados numa prensa que aplicará duas forças concentradas de compressão em direções opostas, isso gerará tensões de tração uniformes, perpendiculares ao cilindro do CP, gerando a carga de ruptura obtida pelo ensaio (Figura 19).

Figura 19 – Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Os autores (2024)

Os cálculos foram realizados utilizando a Equação 9.

$$RT = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (9)$$

Onde:

RT = resistência a tração;

F = Carga de Ruptura, kgf;

D = diâmetro do corpo de prova (10 cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

Obtendo RT, é multiplicado por 0,098067 para obter a resistência a tração em Mega Pascals (MPa).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

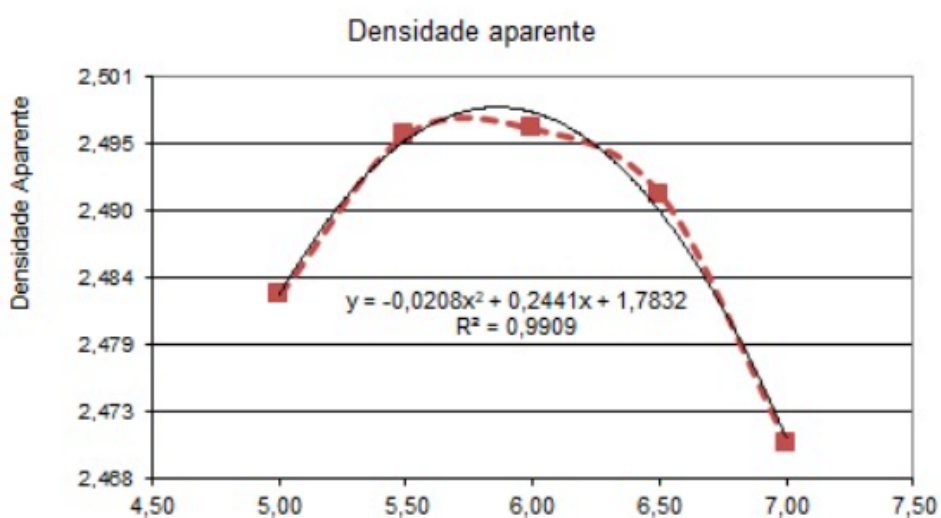
4.1 DOSAGEM

Os primeiros corpos de prova, confeccionados com o objetivo de determinar o teor de asfalto mais adequado, foram submetidos a uma série de ensaios técnicos: Densidade Aparente, Estabilidade, Fluência de Marshall e Rice. Esses ensaios forneceram dados importantes, como a densidade aparente, estabilidade, fluência e o volume de vazios presentes na mistura asfáltica. Essas informações são fundamentais para avaliar o comportamento do material e determinar a melhor proporção de asfalto que proporciona maior resistência e durabilidade do pavimento.

4.1.1 Densidade Aparente

Os primeiros resultados obtidos incluíram as leituras das alturas dos 15 corpos de prova (CPs), divididos em 5 teores distintos de asfalto (5%, 5,5%, 6%, 6,5% e 7%). A partir dessas leituras, calculou-se a altura média de cada grupo de CPs. Em seguida, foram medidos a massa ao ar e a massa imersa de cada corpo de prova, informações essenciais para calcular a densidade aparente. Após esse cálculo, foram determinadas as médias das densidades aparentes para cada um dos teores de asfalto, indicadas na Tabela 3 e ilustradas na Figura 20, possibilitando uma análise comparativa mais detalhada entre os diferentes teores testados.

Figura 20 – Gráfico de densidade x teor de CAP



Fonte: Os autores (2024)

Tabela 3 – Valores do ensaio de Densidade Aparente para dosagem

Nº do CP	Teor	Leituras				Altura média do CP (cm)	Densidade aparente da mistura		
		1ª	2ª	3ª	4ª		Mar	Mi	dap
1	5,0%	62,68	63,5	63,6	64,44	63,56	1254,83	753,39	2,502
2		64,5	63,49	63,61	64,29	63,97	1240,07	740,81	2,484
3		64,17	64	65,42	65,73	64,83	1242,07	741,69	2,482
dap média									2,490
4 (C1)	5,5%	63,52	64,37	63,95	63,05	63,72	1251,04	750,82	2,501
5 (C2)		63,41	63,46	63,49	63,96	63,58	1245,16	745,79	2,493
6 (C3)		63,32	62,72	63,46	64,38	63,47	1241,34	743,63	2,494
dap média									2,496
7	6%	64,26	64,39	63,35	63,95	63,99	1243,68	747,02	2,504
8		62,38	63,19	63,01	62,72	62,83	1258,08	753,02	2,491
9		63,58	64,07	63,34	63,61	63,65	1258,81	754,25	2,495
dap média									2,497
10	6,5%	63,26	62,46	62,15	63,09	62,74	1244,52	744,24	2,488
11		62,97	62,85	63,39	63,51	63,18	1258,33	754,25	2,496
12		63,85	63,4	63,72	63,44	63,60	1251,48	748,86	2,490
dap média									2,491
13	7%	62,86	62,64	63,7	63,94	63,29	1247,42	741,39	2,465
14		63,71	63,85	63,59	63,83	63,75	1251,29	745,72	2,475
15		63,82	63,05	63,27	64,44	63,65	1253,35	796,44	2,743
dap média									2,561

Fonte: Os autores (2024)

4.1.2 Estabilidade e Fluência de Marshall

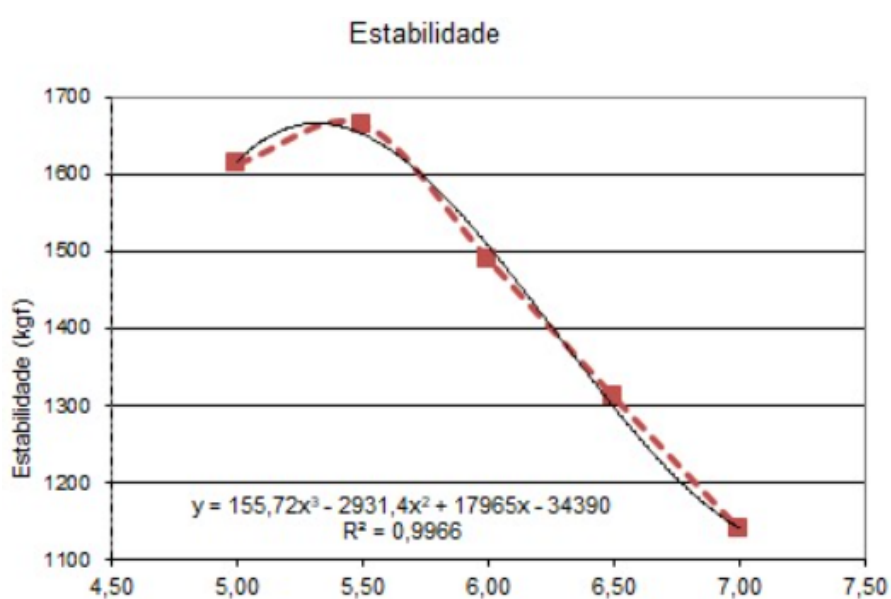
Os 15 corpos de prova (CPs) foram, então, submetidos ao ensaio de Estabilidade e Fluência de Marshall, durante esse ensaio, foram obtidos dois parâmetros fundamentais: a fluência e a estabilidade de cada corpo de prova. A estabilidade, especificamente, pode variar conforme a altura do corpo de prova, razão pela qual passa por um fator de correção que ajusta os resultados para eliminar possíveis variações decorrentes das diferenças de altura entre os CPs. Após a aplicação desse fator de correção, os resultados finais de fluência e estabilidade foram consolidados e estão apresentados detalhadamente na Tabela 4 e ilustrados na Figura 21 e na Figura 22. Esses dados são essenciais para identificar o teor de asfalto que oferece melhor desempenho mecânico da mistura testada.

Tabela 4 – Valores do ensaio de Estabilidade e fluência Marshall para dosagem

Nº do CP	Teor	E (kgf)	Fc	Ec (kgf)	F (mm)
1	5%	1766	1	1766	5,42
2		1623	0,99	1606,77	4,7
3		1404	0,97	1361,88	4,57
Média				1578,2167	4,90
4 (C1)	5,5%	1275	0,99	1262,25	1,8
5 (C2)		1915	1	1915	3,44
6 (C3)		1693	1	1693	4,93
Média				1623,4167	3,39
7	6%	1581	0,99	1565,19	4,4
8		1524	1,02	1554,48	5,19
9		1244	1	1244	3,79
Média				1454,5567	4,46
10	6,5%	1189	1,02	1212,78	4,88
11		1235	1,01	1247,35	5,32
12		1381	1	1381	5,13
Média				1280,3767	5,11
13	7%	1291	1,01	1303,91	7,55
14		1025	0,99	1014,75	6,36
15		1017	1	1017	7,25
Média				1111,8867	7,05

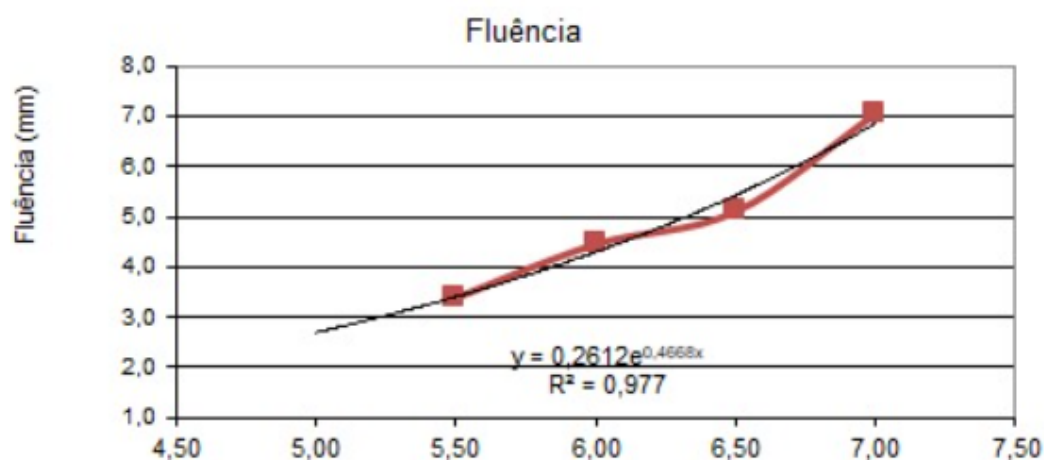
Fonte: Os autores (2024)

Figura 21 – Gráfico de estabilidade



Fonte: Os autores (2024)

Figura 22 – Gráfico de fluência



Fonte: Os autores (2024)

4.1.3 Ensaio Rice e Escolha do teor Ótimo

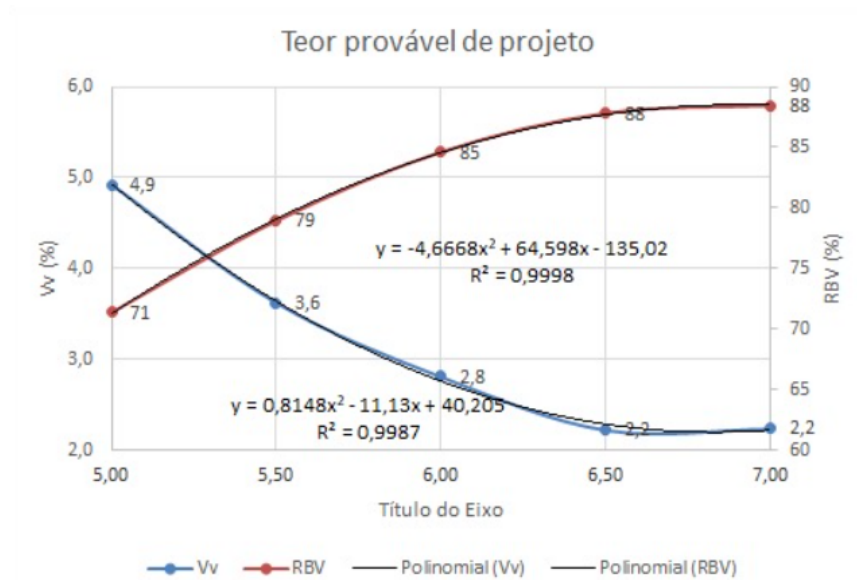
Com base nos valores obtidos nos ensaios, determinou-se que o teor de asfalto ideal para este experimento seria 5,5%. Foi utilizado o método gráfico de volume de vazios X relação betume vazios para determinação do teor ótimo de asfalto, com ilustra a Figura 23. Este teor foi escolhido porque seus resultados atenderam a todos os requisitos exigidos pela norma, além de apresentar os melhores desempenhos em termos de propriedades volumétricas e mecânicas Marshall, cruciais de um pavimento resistente e durável. Os resultados médios da dosagem podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado das dosagens

Teor	Dap	E (kgf)	F (mm)	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)	DMM
5,00	2,483	1614		4,9	71	17	2,612
5,50	2,496	1665	3,4	3,6	79	17	2,590
6,00	2,497	1489	4,5	2,8	85	18	2,569
6,50	2,491	1310	5,1	2,2	88	18	2,548
7.00	2.471	1138	7.1	2.2	88	19	2.527

Fonte: Os autores (2024)

Figura 23 – Teor ótimo



Fonte: Os autores (2024)

4.2 RESULTADO DOS CORPOS-DE-PROVA COM PVC

4.2.1 Densidade Aparente dos Corpos-de-prova com PVC

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados, sendo os 15 CPs fabricados na segunda etapa do experimento, sendo 3 CPs de controle, 6 corpos-de-prova com adição de PVC fino e 6 com adição de PVC grosso, submetidos ao ensaio de densidade aparente. Os CPs denominados C são os de controle, os G são com PVC grosso e F são com PVC fino (Tabela 6).

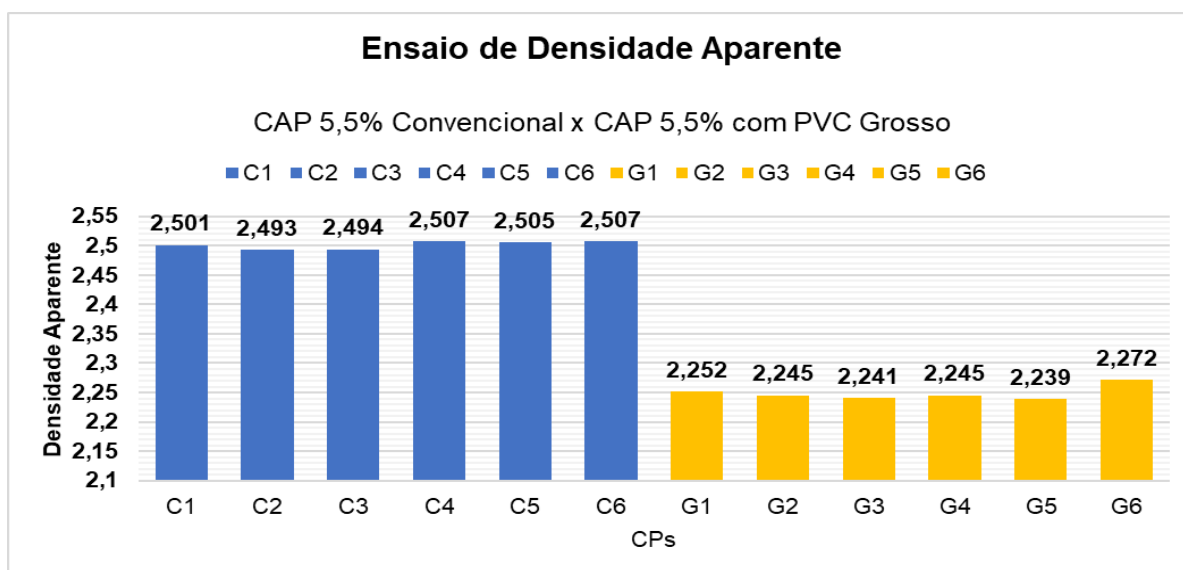
Tabela 6 – Valores do ensaio de Densidade Aparente

Nº do CP	Teor	Leituras				Altura média do CP (cm)	Densidade aparente da mistura		
		1ª	2ª	3ª	4ª		Mar	Mi	dap
C1	5,5%	63,52	64,37	63,95	63,05	63,72	1251,04	750,82	2,501
C2		63,41	63,46	63,49	63,96	63,58	1245,16	745,79	2,493
C3		63,32	62,72	63,46	64,38	63,47	1241,34	743,63	2,494
C4		64,16	63,41	62,81	63,57	63,49	1241,28	746,2	2,507
C5		64,64	63,09	62,05	63,31	63,27	1245,29	748,12	2,505
C6		62,9	63,59	64,03	63	63,38	1248,45	750,5	2,507
dap média									2,501
G1	5,5% Com PVC Grosso	80,36	79,91	80,39	80,12	80,20	1379,84	768,15	2,256
G2		81,33	80,63	80,47	80,66	80,77	1390,79	771,2	2,245
G3		82,13	82,98	82,94	82,26	82,58	1409,26	780,54	2,241
G4		80,56	80,83	81,3	80,97	80,92	1388,30	769,8	2,245
G5		82,24	81,49	80,65	80,82	81,30	1390,29	769,43	2,239
G6		81,35	82,61	82,14	82,14	82,06	1424,10	797,25	2,272
dap média									2,252
F1	5,5% Com PVC Fino	81,11	81,16	81,68	81,08	81,26	1369,56	732,91	2,151
F2		81,15	80,64	80,56	81,39	80,94	1371,23	738,87	2,168
F3		80,8	81,21	81,17	80,59	80,94	1371,85	737,98	2,164
F4		81,35	80,1	80,76	81,42	80,91	1374,02	739,62	2,166
F5		81,35	81,6	80,89	81,4	81,31	1375,18	736,86	2,154
F6		80,8	79,88	80,22	81,28	80,55	1367,76	736,35	2,166
dap média									2,162

Fonte: Os autores (2024)

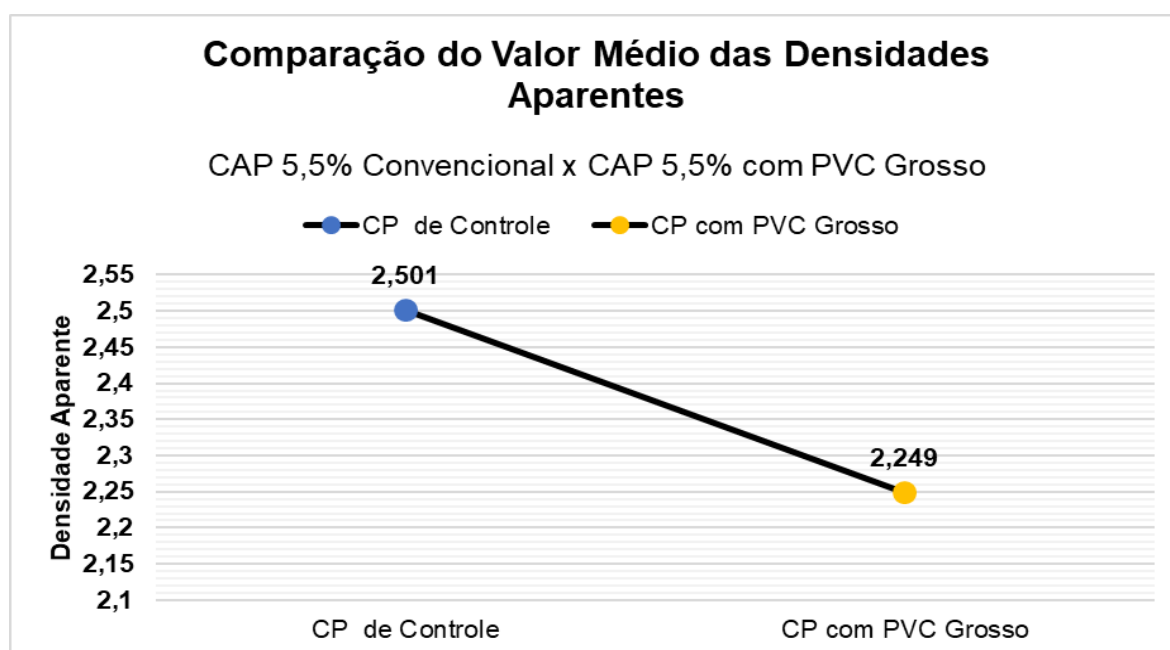
Ao comparar os valores obtidos nos ensaios, verificou-se que ambos os corpos de prova (CPs) com adições de PVC, tanto na forma de PVC grosso quanto PVC fino, apresentaram uma redução significativa na densidade aparente em relação aos CPs de controle. No caso dos CPs com adição de PVC grosso, a densidade aparente sofreu uma redução de 10,44%, esse comportamento está ilustrado nos gráficos apresentados nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Gráfico de resultados do ensaio de densidade aparente PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

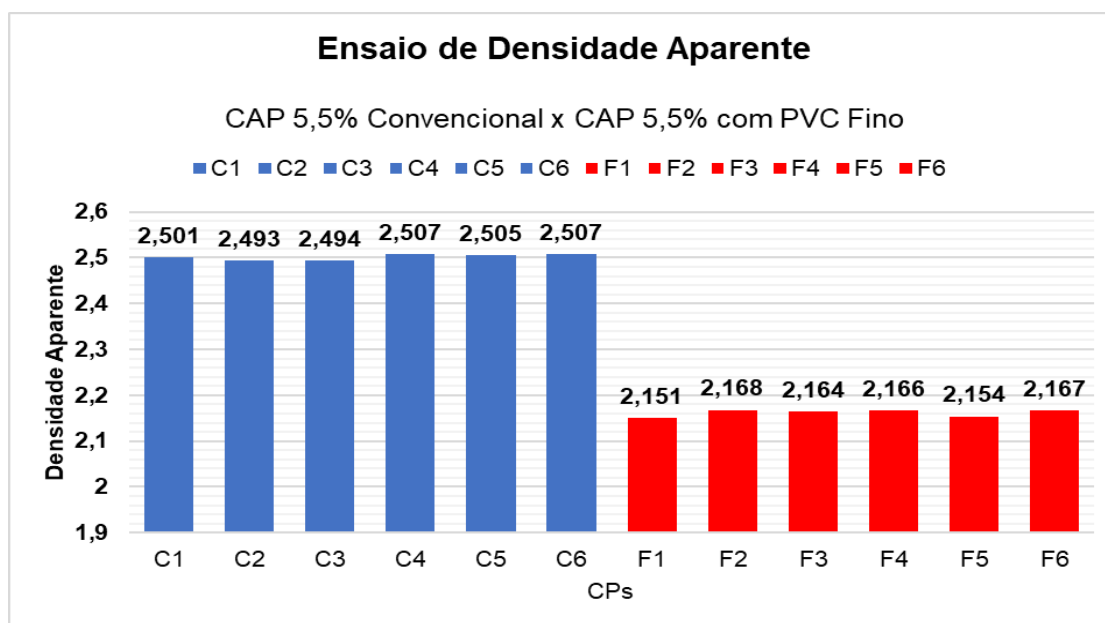
Figura 25 – Gráfico de comparação entre as médias de Dap de controle e com PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

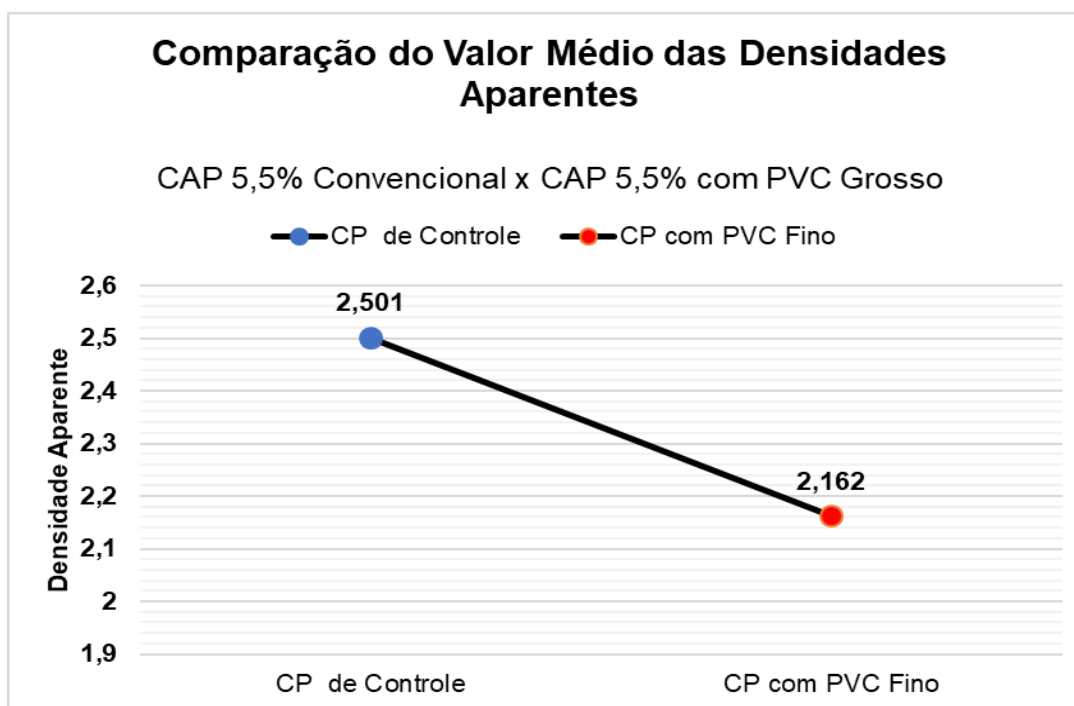
Já os CPs que receberam adição de PVC fino apresentaram uma queda ainda mais acentuada na densidade aparente, com uma redução de 13,57%. Essa diferença também está ilustrada nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Gráfico de resultados do ensaio de densidade aparente PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

Figura 27 – Gráfico de comparação entre as médias de Dap de controle e com PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

4.3 ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA DOS CPS COM PVC

4.3.1 Ensaio de Estabilidade dos CPs com PVC

Neste ensaio, foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 7 – Valores do ensaio de Estabilidade Marshall

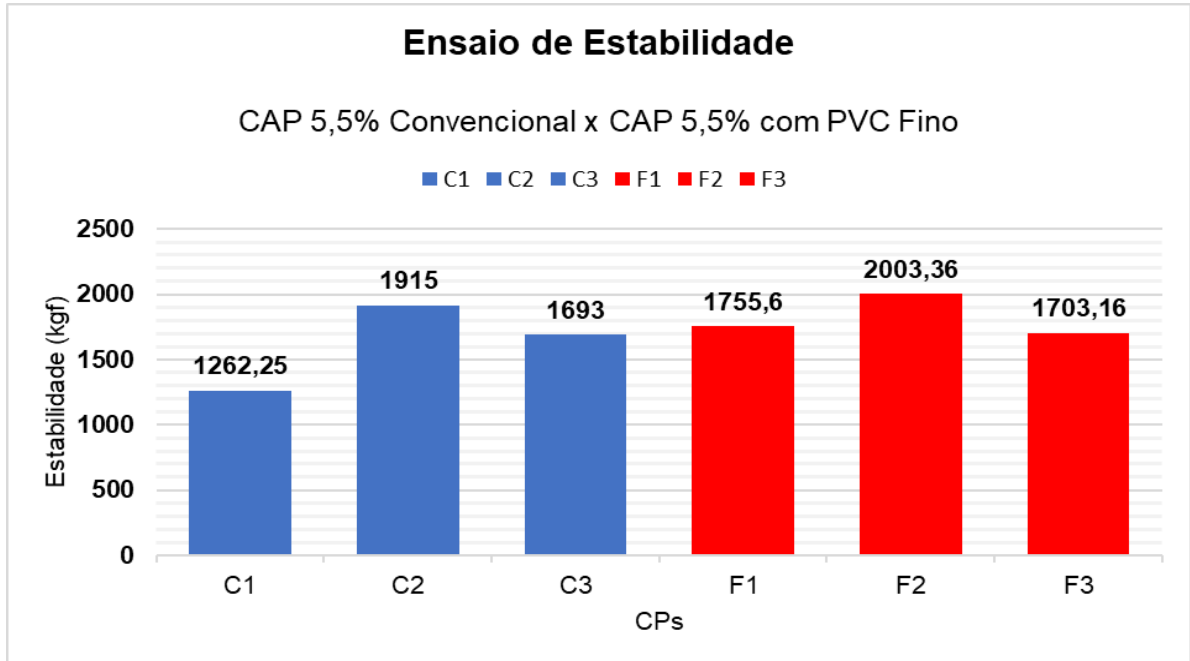
Nº do CP	Teor	E (kgf)	Fc	Ec (kgf)
F1	5,5%	2310	0,76	1755,6
F2	Com	2636	0,76	2003,36
F3	PVC	2241	0,76	1703,16
Média	Fino			1820,7067
G4	5,5%	2455	0,76	1865,8
G5	Com	2263	0,76	1719,88
G6	PVC	xxxx	xxxx	xxxx
Média	Grosso			1792,84

Fonte: Os autores (2024)

No ensaio de Estabilidade e Fluência realizado com os corpos de prova (CPs) contendo adição de PVC, foram obtidos resultados significativos que indicam elevação da estabilidade em comparação aos CPs de controle. Vale ressaltar que no ensaio no CP G6 houve um erro na leitura do equipamento.

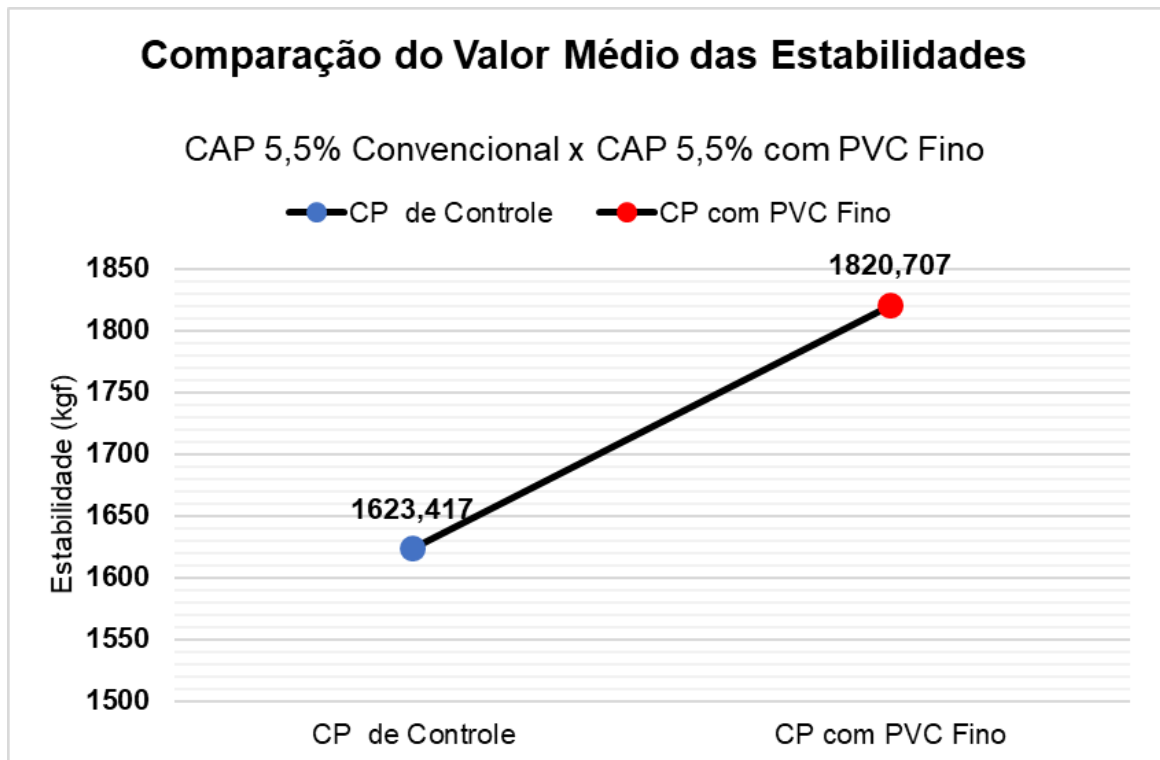
Os CPs com adição de PVC fino apresentaram um aumento de 12,15% na estabilidade em relação aos CPs de controle. Esse comportamento está ilustrado nos gráficos apresentados nas Figuras 28 e 29, que evidenciam a evolução positiva nos resultados de estabilidade.

Figura 28 – Gráfico de resultados do ensaio de estabilidade PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

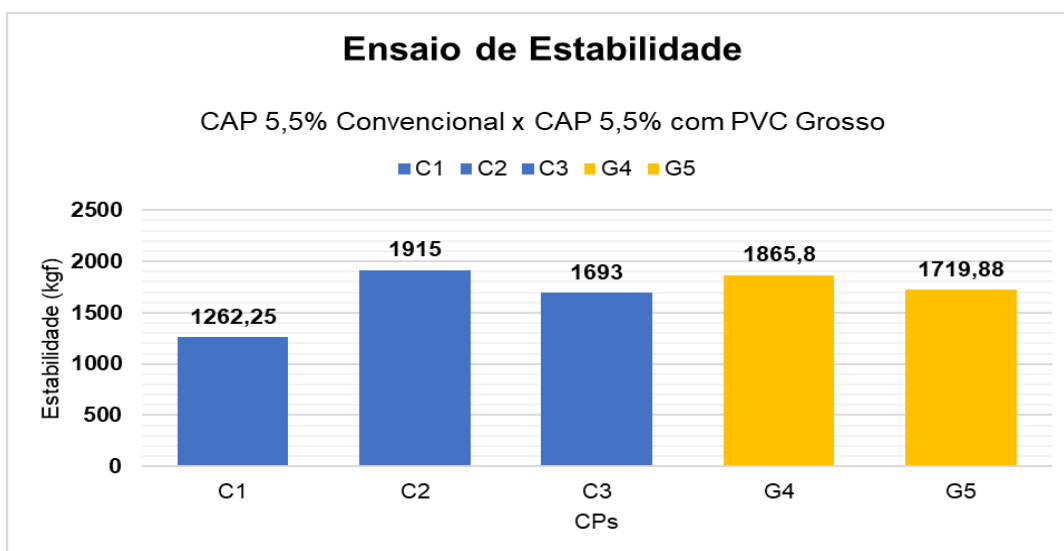
Figura 29 – Gráfico de comparação entre as médias de estabilidade de controle e com PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

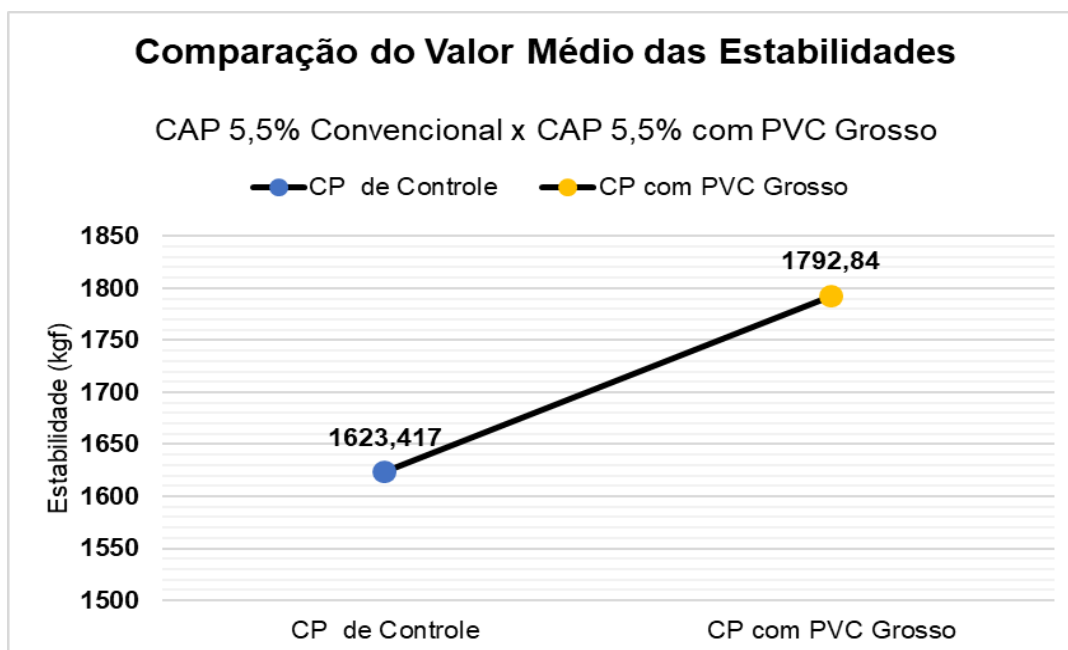
Os CPs com adição de PVC grosso também registraram uma melhoria na estabilidade, com um aumento de 10,43% em comparação aos CPs de controle. Embora a melhoria seja ligeiramente menor do que nos CPs com PVC fino, os resultados indicam que a adição de PVC grosso também tem um efeito positivo na resistência à compressão da mistura asfáltica, ilustrados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Gráfico de resultados do ensaio de estabilidade PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

Figura 31 – Gráfico de comparação entre as médias de estabilidade de controle e com PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

É importante destacar que, nas Figuras 32 e 33, os corpos de prova representados correspondem ao CP G6, no qual ocorreu um erro na leitura do ensaio.

Figura 32 – CP G6, erro na leitura do ensaio e Figura 32 – CP G6, erro na leitura do ensaio



Fonte: Os autores (2024)

Esses resultados, representados nos gráficos a seguir, mostram que a adição de PVC, tanto na forma fina quanto na forma grossa, pode melhorar a estabilidade da mistura asfáltica, o que é um indicativo promissor para o uso de materiais reciclados em pavimentação.

4.3.2 Ensaio de Fluência Marshall dos CPs com PVC

Os valores dos ensaios de Fluência Marshall estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores do ensaio de fluência Marshall

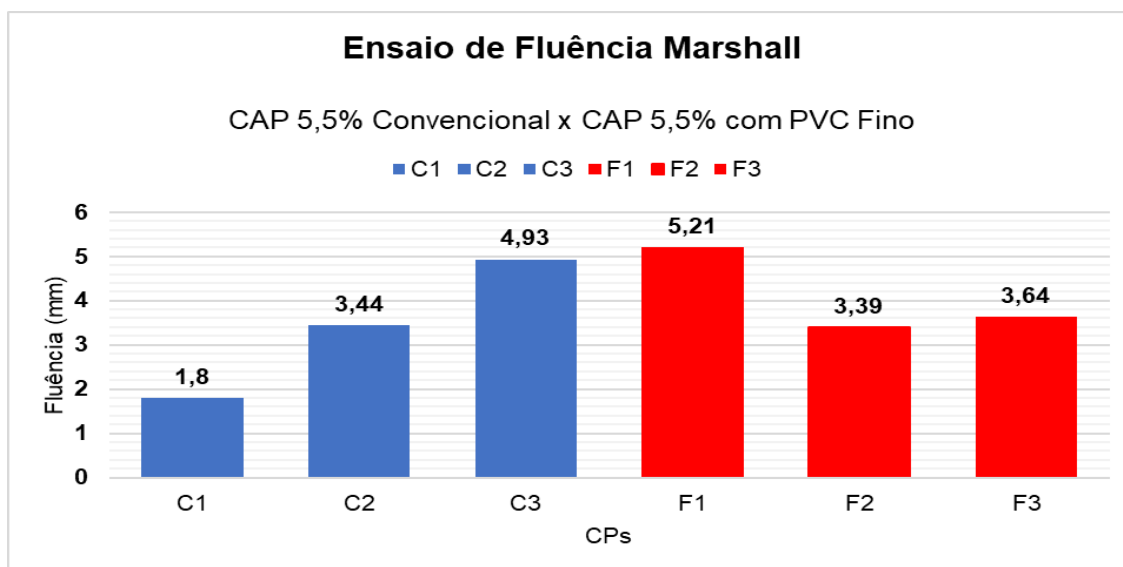
Nº do CP	Teor	E (kgf)	Fc	Ec (kgf)	F (mm)
F1	5,5%	2310	0,76	1755,6	5,21
F2	Com	2636	0,76	2003,36	3,39
F3	PVC	2241	0,76	1703,16	3,64
Média	Fino			1820,71	4,08
G4	5,5%	2455	0,76	1865,8	11,79
G5	Com	2263	0,76	1719,88	6,36
G6	PVC	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
Média	Grosso			1792,84	9,08

Fonte: Os autores (2024)

No caso da amostra contendo PVC fino, observou-se uma elevação da Fluência de 20,35% em comparação à amostra convencional (grupo de controle). Essa melhora indica que a adição de PVC fino contribuiu para uma menor resistência à deformação sob carga. Mesmo com essa elevação da Fluência, os valores obtidos permanecem dentro dos limites estabelecidos pela norma do DNIT.

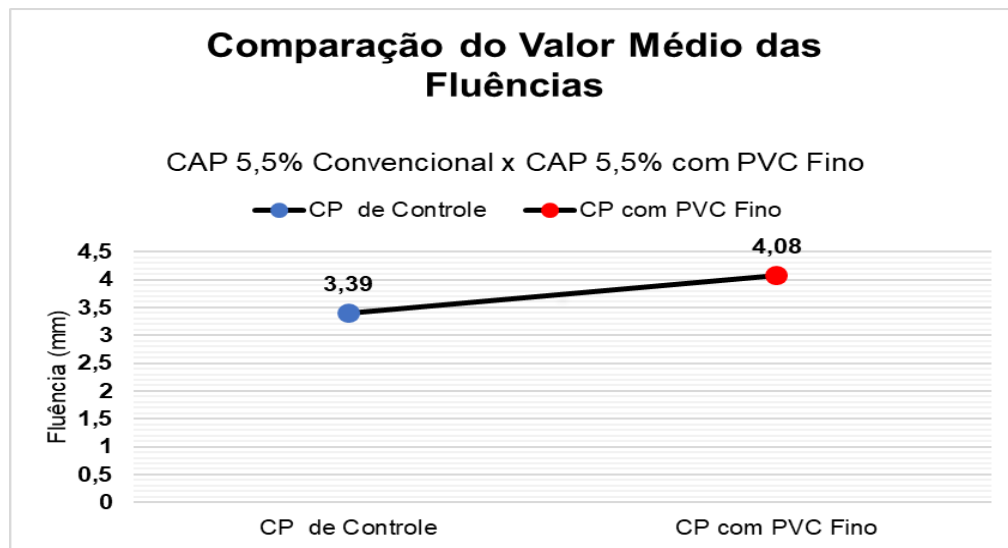
Esses resultados estão ilustrados nas Figuras 34 e 35, onde é possível observar a performance aprimorada da amostra com PVC fino.

Figura 33 – Gráfico de resultados do ensaio de fluência PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

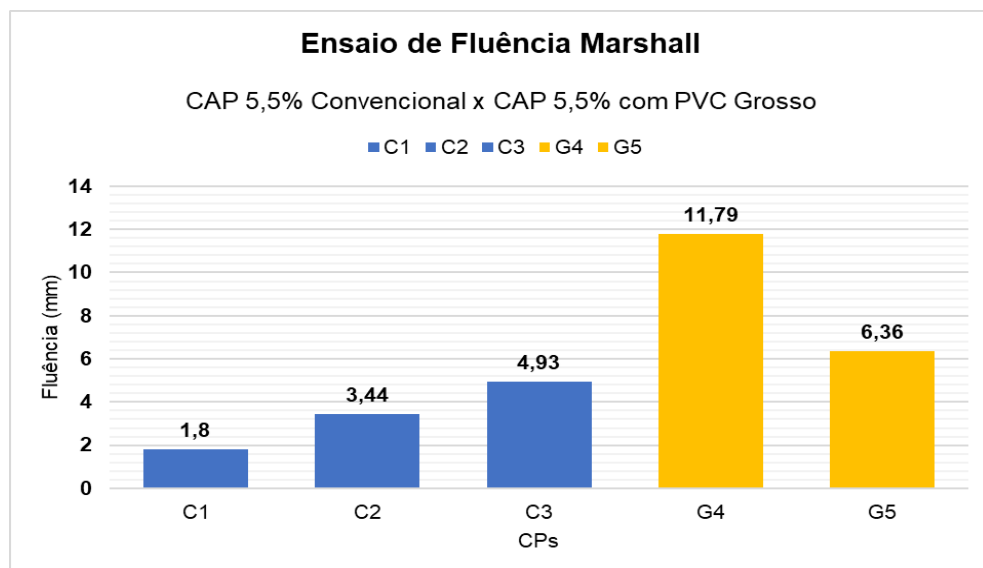
Figura 34 – Gráfico de comparação entre as médias de fluência de controle e com PVC fino



Fonte: Os autores (2024)

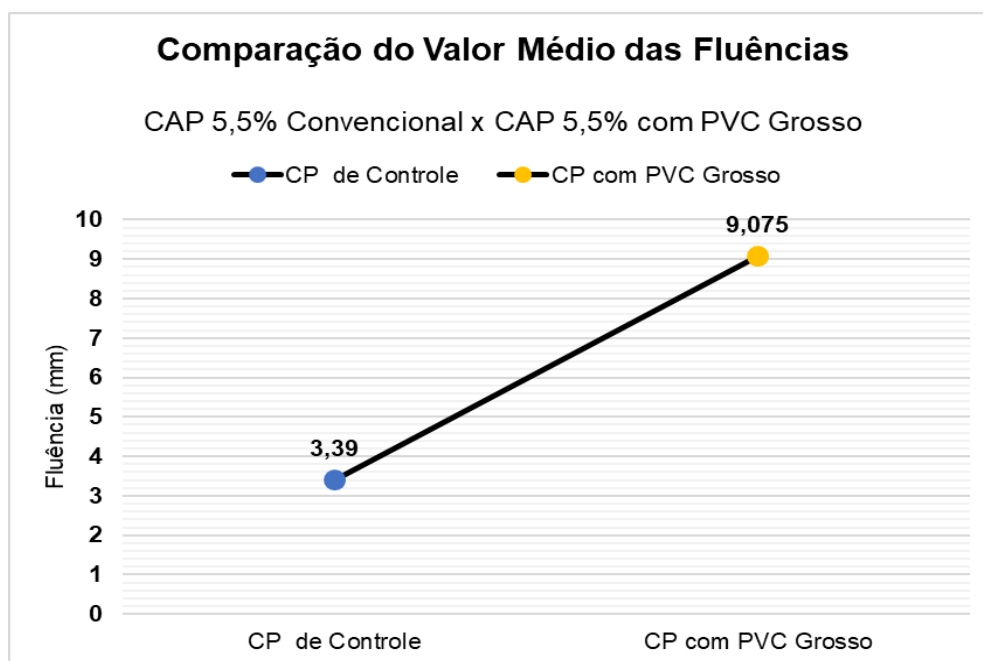
Por outro lado, a adição de PVC grosso resultou em uma elevação mais significativa de 167,70% na fluência, o que representa uma piora no desempenho da mistura. Esse aumento nos valores de fluência ultrapassa os limites estabelecidos pela norma do DNIT, que estabelece valores aceitáveis entre 2 mm e 4,5 mm. Os resultados desse ensaio podem ser vistos nas Figuras 36 e 37.

Figura 35 – Gráfico de resultados do ensaio de fluência PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

Figura 36 – Gráfico de comparação entre as médias de fluência de controle e com PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados do ensaio de resistência à tração obtidos no ensaio podem ser observados na tabela 9.

Tabela 9 – Valores do ensaio de Resistência à tração indireta por compressão diametral

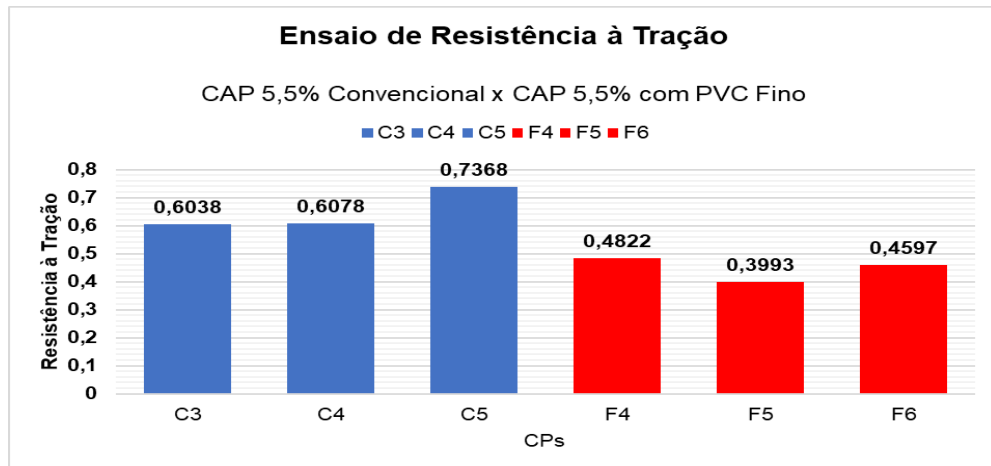
Nº do CP	Teor	F (kgf)	RT (kgf/cm²)	RT (Mpa)
C4	5,50%	614	6,1569	0,6038
C5		616	6,1979	0,6078
C6		748	7,5133	0,7368
Média				0,64947
F4	5,5%	625	4,9178	0,4823
F5	Com	520	4,0714	0,3993
F6	PVC	593	4,6870	0,4596
Média	Fino			0,44706
G1	5,5%	574	4,5566	0,4469
G2	Com	477	3,7595	0,3687
G3	PVC	551	4,2479	0,4166
Média	Grosso			0,41071

Fonte: Os autores (2024)

Para o ensaio de Resistência à tração foram utilizados 3 CPs de controle, 3 CPs com o PVC fino e 3 CPs com o PVC grosso, os CPs foram colocados no molde do ensaio na temperatura de 25 °C, como especificado pela norma.

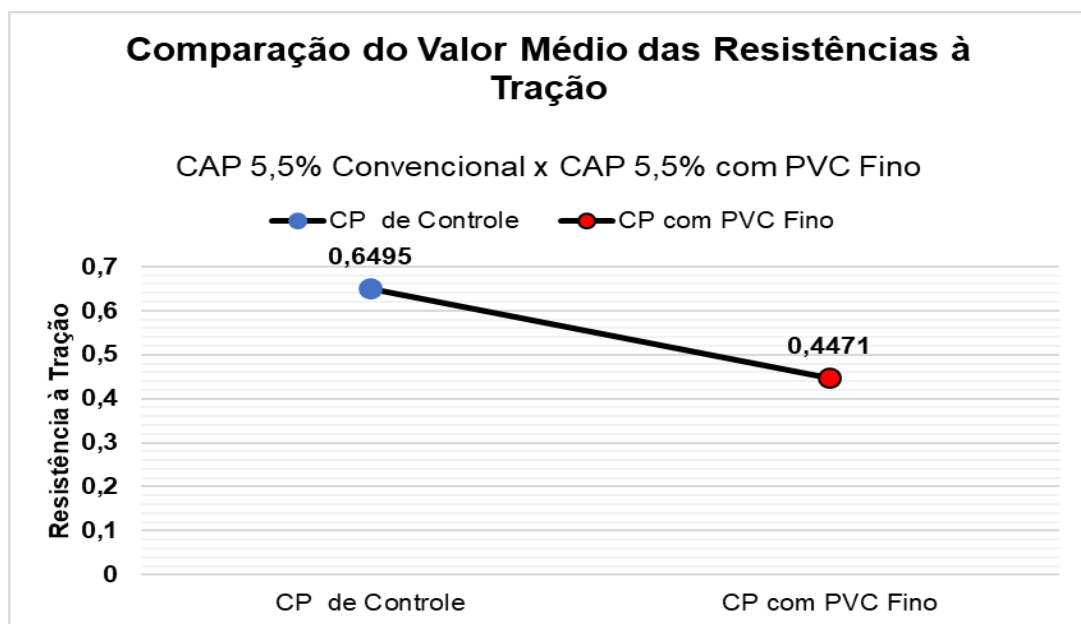
Os CPs modificados apresentaram uma piora significativa na resistência à tração quando comparados com os CPs de asfalto convencional. Quando adicionado PVC fino a piora foi de 31,16% e com o PVC grosso foi de 36,76%. Os valores podem ser observados nas Figuras 38, 39, 40 e 41.

Figura 37 – Gráfico de resultados do ensaio de Resistência à tração do PVC fino



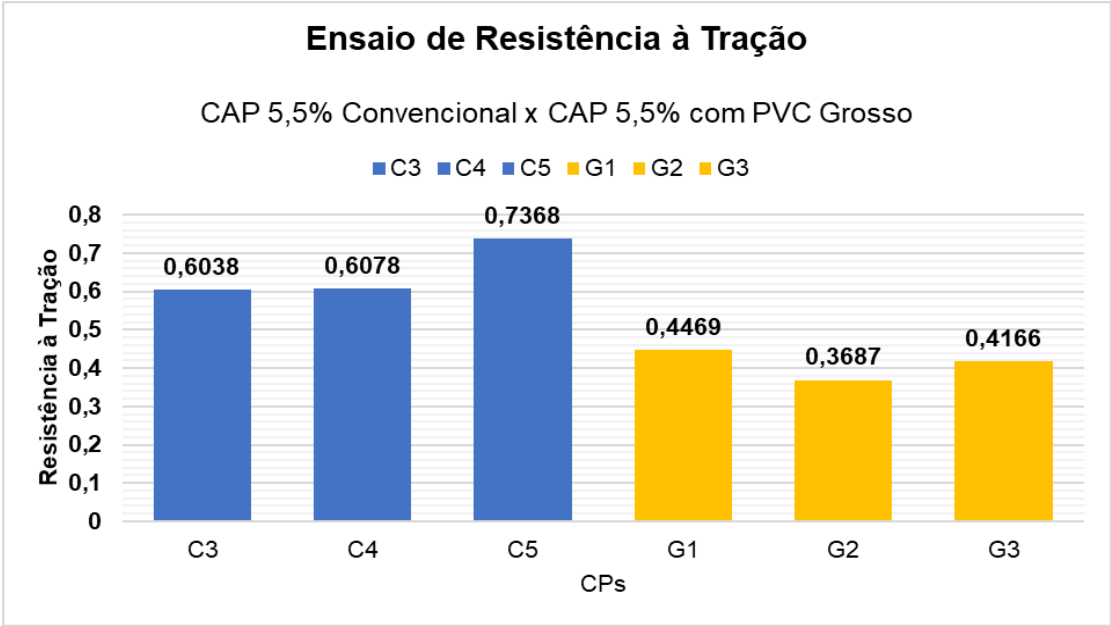
Fonte: Os autores (2024)

Figura 38 – Gráfico de comparação entre as médias de RT de controle e com PVC fino



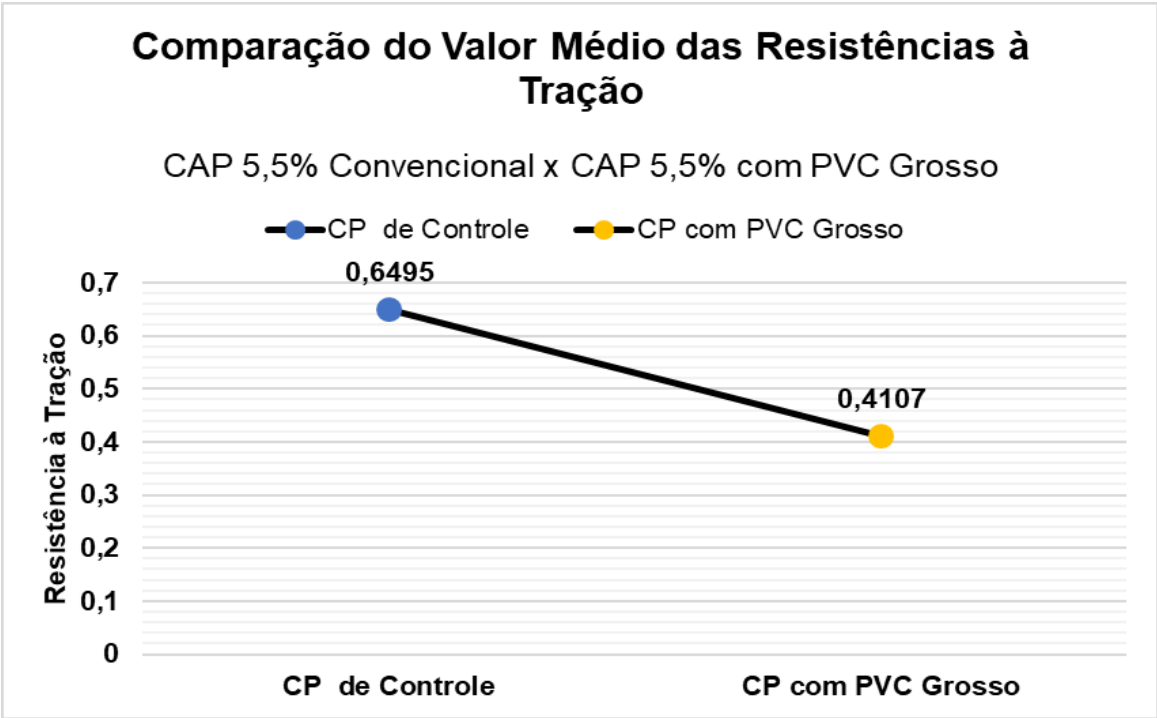
Fonte: Os autores (2024)

Figura 39 – Gráfico de resultados do ensaio de Resistência à tração do PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

Figura 40 – Gráfico de comparação entre as médias de RT de controle e com PVC grosso



Fonte: Os autores (2024)

5 CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado no presente trabalho, com base nos ensaios realizados no laboratório, é possível perceber que as misturas modificadas com plástico reciclado, tanto de granulometria mais fina, quanto na mais grossa apresentaram melhoras significativas em relação a estabilidade quando comparado às misturas convencionais, os valores de aumento foram de 12,15% e 10,43%, respectivamente.

Quando são analisados os valores de fluência as amostras com plástico tiveram um aumento significativo em comparação com os CPs sem adição de plástico, mas mesmo assim as amostras com o PVC mais fino estão dentro do limite da norma, no entanto, esse limite de 4,5 mm foi superado nas misturas com PVC grosso, evidenciando uma piora na Fluência.

Os CPs com plástico reciclado apresentaram uma piora relevante no ensaio de resistência à tração, comparando com os CPs de concreto asfáltico. O valor de

resistência à tração foi cerca de 30% inferior quando o plástico foi acrescentado na mistura.

Outro ponto que os CPs modificados apresentaram uma redução em relação a mistura asfáltica convencional foi na densidade dos CPs, tendo uma redução superior a 10% nesse parâmetro.

Pode-se concluir que a utilização de plástico reciclado na quantidade de 10% em relação à massa de agregados elevou a estabilidade e diminuiu a resistência a tração das misturas de concreto asfáltico, de uma forma geral.

Sugere-se que mais estudos sejam realizados utilizando um menor teor de plástico nas misturas. Para futuros estudos relacionados ao uso de plástico reciclado em misturas asfálticas, sugere-se ainda a realização de testes com diferentes métodos de dosagem, explorando variações nas quantidades de PVC incorporado e utilizando granulometrias alternativas. A continuação desse tipo de pesquisa é fundamental para aprofundar o entendimento sobre o impacto do PVC nas propriedades mecânicas e físicas das misturas, permitindo a identificação de proporções ideais que otimizem a performance do material.

Além disso, recomendamos a realização de experimentos com outros tipos de plásticos reciclados, como polietileno, polipropileno ou PET, a fim de ampliar o espectro de possibilidades e identificar quais plásticos oferecem os melhores resultados em termos de durabilidade, estabilidade e resistência ao tráfego. Isso permitirá uma avaliação mais completa de quais materiais reciclados são mais adequados para uso em pavimentação, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência das infraestruturas rodoviárias.

Por fim, sugerimos que os estudos também investiguem em quais contextos ou tipos de pavimentos as misturas asfálticas com adição de plástico reciclado se adaptam melhor. Essas avaliações podem considerar desde pavimentos de rodovias com tráfego intenso até ruas urbanas e estacionamentos, possibilitando a aplicação prática e eficiente dessas misturas em diferentes situações.

REFERÊNCIAS

Arao, M. **Avaliação Do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado.** Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

BERNUCCI, L B. et al., **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA:FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS** - Rio de Janeiro: PETROBRÁS:ABEDA.2006.

BRASIL, agência. **Pesquisa da CNT mostra que 67% das rodovias brasileiras têm problemas.** Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-11/pesquisa-da-cnt-mostra-que-67-das-rodovias-brasileiras-tem-problemas>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Brito, G. Q. **Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) micronizado.** 2020. xv, 71 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias**. Confederação Nacional de Transportes. 2018a. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/conheca-principais-defeitos-pavimento> . Acesso em: 4 abr. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - **DNIT Misturas asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem**. 2022

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 - ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

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

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ES DNER-ES 043/95**: Pavimentação - pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 1999.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ES DNER-ES 117/94**: Misturas betuminosas – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994.

ECOPISTAS. **4 motivos que fazem o asfalto borracha contribuir para a segurança viária**. Disponível em: <https://www.ecopistas.com.br/noticias/releases/4-motivos-que-fazem-o-asfalto-borracha-contribuir-para-a-seguranca-viaria-204918#:~:text=As%20características%20do%20pavimento%20com,o%20contato%20com%20o%20solo>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Franco, L., Oliveria, L., Moura, S. **Estudo do Pavimento Rígido com Adição de Fibras de Polietileno Tereftalato Pós-Consumo**. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET. Balneário Camboriú, 2019.

INSTITUTO DO PVC. **O que é PVC?** [2024]. Disponível em: <https://pvc.org.br/o-que-e-pvc/>. Acesso em: 02 out. 2024.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. **Análise de dosagem de pavimentos asfálticos pelo método superpave**. 2017

Jegatheesan, N., Rengarasu, T., Bandara, W. **Mechanical properties of modified hot mix asphalt containing polyethylene terephthalate fibers as binder additive and carbonized wood particles as fine aggregate replacement**. Asian Transport Studies, v. 6, p. 100029, 2020.

MA, Yuetan *et al.* **The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review.** 2021

MAFRA, Nailton *et al.* **Estado da arte do reaproveitamento de resíduos de polietileno tereftalato (pet) em materiais asfálticos.** Rio de Janeiro, UFRJ 2021

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia.** 1. ed. [S. l.]: Blucher, 2001. 218 p.

POLIMEROS, Mais. **Poliestireno (PS): entenda suas principais características, aplicações e tipos.** Disponível em: <https://maispolimeros.com.br/2019/02/25/poliestireno-ps/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

POLIMEROS, Mais. **Poliestireno (PS): entenda suas principais características, aplicações e tipos.** Disponível em: <https://maispolimeros.com.br/2019/02/20/polietileno-pe/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

POLIMEROS, Mais. **Polipropileno: o que é e o que você não pode deixar de saber.** Disponível em: <https://maispolimeros.com.br/2019/02/11/polipropileno-o-que-e/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

Romão, W.; Spinacé, M. A.; Paoli, M. Poli (Tereftalato de Etileno), **PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem.** Revista Polímeros, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009."

Serra, G. A., Guimarães, A. C. R.; Silveira, V. L.; Barros, A. M. S.; Reis, A. C. C. (2018). **Estudo da adição de resíduos de polietileno tereftalato (pet) como agregado alternativo para misturas asfálticas.** In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2018, Gramado. ANAIS DO 32º CONGRESSO ANPET 2018, 2018. v. 32. p. 1668-1678.

Silva J. D. A. A., Rodrigues, J. K. G., Lucena, L. C., Lucena, A. E., Patricio, J. D. (2013). **Estudo da Utilização do Politereftalato de Etileno (PET) para compor as Misturas Asfálticas dos Revestimentos Rodoviários.** 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária

WWF. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico.** Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 4 abr. 2024.