



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ALUSKA THAYUANNE ROCHA NUNES**

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE GIRASSOL COMO ADITIVO DE MAM VISANDO A  
INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE MATERIAL FRESADO**

**Orientador: Professor Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena.**

**Coorientador: Jeovanesa Régis Carvalho**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2021**

ALUSKA THAYUANNE ROCHA NUNES

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE GIRASSOL COMO ADITIVO DE MAM VISANDO A  
INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE MATERIAL FRESADO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado à Universidade Federal de  
Campina Grande, como requisito necessário  
para conclusão do curso de Engenharia Civil.

Orientador: Adriano Elísio de Figueiredo  
Lopes Lucena.

Coorientadora: Jeovanesa Régis Carvalho.

Campina Grande - PB

2021

Ficha catalográfica elaborada pela biblioteca central da UFCG

ALUSKA THAYUANNE ROCHA NUNES

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE GIRASSOL COMO ADITIVO DE MAM VISANDO A  
INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE MATERIAL FRESADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado à Unidade Acadêmica de  
Engenharia Civil pela Universidade Federal de  
Campina Grande como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenheira Civil.

Área de Estudo: Geótenica  
Área Específica: Pavimentação

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena.  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Co-orientador (a): MSc. Jeovanesa Régis Carvalho  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Avaliador: Prof. Dsc. Carina Silvani  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Avaliador (a): MSc. Talita Miranda de Sousa  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, mãe e irmão, que sempre se mostraram fortaleza e perseverança, ajudando a conquistar os meus sonhos com a certeza que o amor tudo suporta. À Deus que aumentou a minha fé, e à Santíssima Virgem Maria à quem pedi com devoção discernimento para alcançar este sonho. Assim como, à todos os meus amigos e familiares que apoiam os meus projetos.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo fortalecimento da minha fé, mostrando-me o tamanho do seu amor e misericórdia, sendo sempre meu ponto de refúgio, agraciando todos os meus planos e à minha vida.

À Santíssima Virgem Maria, à quem tenho tamanha devoção, por interceder por mim junto à Deus Pai, sendo colo em todas as minha orações, estando comigo em todo o período do curso.

Aos meus pais, Júnior e Josilene, que sempre dedicaram-se oferecendo-me o melhor, sendo minha base, minha referência e o meu orgulho. Ensinaram-me a ter fé, persistência, integridade e hombridade. Maiores incentivadores dos meus sonhos e meus planos, apoiaram-me em todas as minha decisões e dispuseram-se com todo carinho para ajudar-me a vencer as minhas batalhas, à vocês todo o meu amor e admiração.

Ao meu irmão, Thaynan Andrey, minha maior fonte de inspiração, sendo sempre incentivador de minhas conquistas e vitórias, estando sempre ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

Aos meu avós (in memoriam), meus tios, tias, primos, primas e demais familiares que sempre torceram e vibraram com minha conquistas, sendo estímulo para alcançar meus sonhos.

Ao meu orientador, professor Adriano Elísio, que desde as disciplinas iniciais do curso mostrou-se disponível e solícito, despertando-me a vontade de efetuar a pesquisa na área geotécnica, especificamente relacionada à pavimentação.

À minha coorientadora, futura Dr<sup>a</sup> Jeovanesa Régis, que esteve comigo neste ano de pesquisa e elaboração do trabalho, sempre solícita, auxiliando-me em todas as etapas, agradeço de coração e torço imensamente por suas conquistas.

Ao meu G6, Samuel, Rafaelle, Nicole, Gabriel e Lucas, por serem auxílio, amor e cuidado, por estarem sempre ao meu lado, sendo amigos fiéis, irmãos da vida, amo vocês!

À Layanne Veríssimo, minha irmã mais velha de coração, agradeço por ser colo, por ser suporte e por ser auxílio em todos os planos de minha vida, sempre transbordando amor!

À Ana Letícia, Rossana e Luan, amigos fiéis que estiveram comigo nesses 5 anos de graduação, sendo fortaleza e enfrentando juntos todas as dificuldades, por toda parceria, amizade e amor que atravessará as portas da universidade.

Aos meus amigos João Pedro e Plácido, que percorreram as disciplinas do curso, levando sempre leveza e a certeza de que juntos somos capazes de enfrentar as maiores dificuldades, irei lembrar sempre dos passeios, das conversas, risadas e momentos marcantes. Ressalto todas

as madrugadas de projeto, junto ao meu amigo Plácido Santana.

À Katyanne, Luan, Camila, Danúbio, Rayssa, Wagner, Carol, Thayse, Layrvisson, Douglas, Bárbara, Amanda, Ellen, Ramon, Layra, Daniel, Hada, Ana Laura, Lucas e todos os demais amigos presentes e tão importantes em minha vida.

*“Á Ele, tudo o que sou, e o que poderia ser...”*

## RESUMO

O meio ambiente se encontra cada vez mais desgastado pelas atividades humanas em todos os setores, não sendo diferente no setor da pavimentação que não apenas faz a retirada de materiais do meio para produção das misturas, como também, produz gases nocivos à saúde humana com as altas temperaturas de usinagem e compactação. Nesta perspectiva, observa-se que o ramo da construção civil, mais especificamente no setor da pavimentação, vem buscando meios de minimizar os desperdícios e danos causados a natureza, produzindo misturas asfálticas que se tornem mais sustentáveis e menos agressíveis, reaproveitando detritos provenientes de antigos revestimentos e misturas menos nocivas, à exemplo das MAMs (Misturas Asfálticas Mornas), objetos de estudo deste trabalho. Assim, objetiva-se reduzir a retirada de material virgem da natureza, sendo a intenção desta pesquisa utilizar o material reciclado de pavimentos antigos, denominado de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), como fração da composição da nova mistura, de forma que altere propriedades reológicas, e, por consequência diminuir a temperatura de mistura e compactação do revestimento asfáltico, reduzindo a emissão de gases-estufa, mantendo as propriedades reológicas e físicas necessárias para a camada superior do pavimento. Buscando melhorar a trabalhabilidade do ligante asfáltico, CAP 50/70, adicionou-se a mistura um aditivo redutor de viscosidade que modifique a mistura sem alterar características mecânicas. Com esta finalidade, optou-se pelo óleo de girassol, que é proveniente de uma oleaginosa bastante produzida e comercializada não só em território nacional, mas em todo o mundo. Este, foi adicionado ao ligante asfáltico em um teor de 2%, de acordo com estudos preliminares. No primeiro momento, efetuaram-se os ensaios de penetração, viscosidade rotacional e ponto de amolecimento, antes e depois do procedimento de RTFO (*Rolling Thin-Film Oven*) para caracterizar o ligante asfáltico com e sem aditivo. Adotou-se a metodologia SUPERPAVE (*Super Performing Asphalt Pavements*), na qual os ensaios mecânicos utilizados foram Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Lottman Modificado. Sendo assim, obtiveram-se resultados satisfatórios do uso do óleo de girassol como modificador de viscosidade, apresentando redução de temperatura, o que resulta no aumento da lubrificidade do material que melhora a trabalhabilidade da mistura, contudo o valor obtido não configura uma MAM. No âmbito da incorporação do material reciclado, obteve-se resultados promissores de resistência a tração e módulo de resiliência, em que as misturas ensaiadas apresentam maior resistência as solicitações de tração e de deformação permanente, devido a maior rigidez ocasionada pelo material envelhecido do RAP, enquanto na análise do dano por umidade induzida, a presença dos teores de 50% e 70% de RAP dificultaram a aglutinação da

mistura, não alcançando o valor regido por norma, porém a incorporação de valores menores alcançou o esperado.

**Palavras Chave:** mistura asfáltica morna; aditivo redutor de viscosidade; comportamento mecânico; material fresado.

## ABSTRACT

The environment is increasingly eroded by human activities in all sectors, being no different in the paving sector, which not only removes materials from the production environment for mixtures, but also produces gases harmful to human health with the high machining and compaction temperatures. In this perspective, it is observed that the civil construction industry, more specifically in the paving sector, has been seeking ways to minimize waste and damage to nature, producing asphalt mixtures that become more sustainable and less aggressive, reusing debris from old coatings and less harmful mixtures, such as MAMs (Warm Asphaltic Mixtures), objects of study in this work. Thus, the objective is to reduce the removal of virgin material from nature, and the intention of this research is to use recycled material from old pavements, called RAP, as a fraction of the composition of the new mixture, in order to change rheological properties, and, consequently, decrease the mixing temperature and compaction of the asphalt coating. the emission of greenhouse gases, maintaining as rheological properties and necessary for the upper layer of the pavement. Seeking to improve the workability of the asphalt binder, CAP 50/70, a viscosity reducing additive that modifies the mixture without altering mechanical characteristics was added to the mixture. For this purpose, we opted for sunflower oil, which comes from an oilseed that is widely produced and marketed not only in the national territory, but throughout the world. This was added to the asphalt binder at a content of 2%, according to preliminary studies. At first, penetration, rotational viscosity and softening point tests were performed, before and after the RTFO (Rolling Thin-Film Oven) procedure to characterize the asphalt binder with and without additive. The SUPERPAVE (Super Performing Asphalt Pavements) methodology was adopted, in which the mechanical tests used were Tensile Strength, Resilience Module and Modified Lottman. Therefore, satisfactory results were obtained from the use of sunflower oil as a viscosity modifier, with a reduction in temperature, which results in an increase in the lubricity of the material, which improves the workability of the mixture, however, the value obtained does not constitute a MAM. Within the scope of the incorporation of recycled material, promising results were obtained in terms of tensile strength and resilience modulus, in which the tested mixtures present greater resistance to traction and permanent deformation demands, due to the greater rigidity caused by the aged material of RAP, while in the analysis of damage caused by induced moisture, the presence of 50% and 70% RAP contents hindered the agglutination of the mixture, not reaching the value ruled by the norm, but the incorporation of lower values reached the expected value.

**Keywords:** warm asphalt mixture; viscosity reducing additive; mechanical behavior; Reclaimed Asphalt Pavement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte transversal apresentando as camadas de um pavimento .....	25
Figura 2 - Camadas dos Pavimentos Flexíveis, Rígido e Semi-Rígidos .....	28
Figura 3 - Camadas pavimento de peças pré-moldadas de concreto.....	28
Figura 4- Disposição do sistema de retirada do CAP advindo do Petróleo.....	30
Figura 5- Tipos de mistura de acordo com a temperatura e quantidade de combustível utilizado na produção.....	32
Figura 6 - Gráfico relativo a condição da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico mediante a mudança de temperatura .....	34
Figura 7 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais utilizados na pesquisa.....	41
Figura 8 - CAP 50/70 .....	42
Figura 9 - Óleo de Girassol .....	44
Figura 10 - RAP proveniente da fresagem na BR 230 .....	44
Figura 11 - Fluxograma dos ensaios de caracterização do ligante .....	45
Figura 12 - Fluxograma dos ensaios de caracterização mecânica.....	46
Figura 13 - Curva Granulométrica dos agregados graúdos e miúdos .....	49
Figura 14 - Penetrômetro.....	53
Figura 15 - Materiais utilizados no ensaio de ponto de amolecimento .....	54
Figura 16 - Viscosímetro Rotacional (modelo DVI I) .....	55
Figura 17 - Máquina de RTFO.....	56
Figura 18 - Curva Granulométrica do RAP com e sem ligante.....	59
Figura 19 - Fluxograma da dosagem SUPERPAVE.....	60
Figura 20 - Compactador Giratório SUPERPAVE .....	60
Figura 21 - Curvas de Fuller (Superior, Intermediária e Inferior).....	61
Figura 22 - Aparelho de realização do Rice Test .....	62
Figura 23 - Balança Digital utilizada no procedimento de dosagem.....	64
Figura 24 - Estufas utilizadas no procedimento de dosagem .....	64
Figura 25 - Curvas de Fuller das misturas recicladas.....	66
Figura 26- Prensa Hidráulica UTM – 25.....	68
Figura 27 - Prensa Mecânica (Ensaio de RT).....	69
Figura 28- Corpos de prova submersos em temperatura ambiente para o ensaio de Lottman .....	70
Figura 29 - Resultado do Ensaio de Ponto de Amolecimento: Antes e Depois do RTFO .....	74
Figura 30 - Resultado do Ensaio de Penetração: Antes e Depois do RTFO .....	75
Figura 31 - Resultado do Ensaio de Viscosidade: Antes do RTFO .....	77
Figura 32 - Resultado do Ensaio de Viscosidade: Depois do RTFO .....	77
Figura 33 - Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura para o CAP Puro .....	78

Figura 34 - Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura para o CAP Modificado com 2% de óleo de girassol.....	79
Figura 35 - Resultado Comparativo da Resistência à Tração para o CAP puro e modificado.....	81
Figura 36 - Resultado Comparativo do Módulo de Resiliência para o CAP puro e modificado .....	83
Figura 37- Resultado Comparativo da Resistência Retida à Tração com CAP Puro e Modificado.....	84

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Comparativo entre os benefícios e os malefícios das MAMs .....	32
---	----

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Características do CAP .....	42
<b>Tabela 2</b> - Características dos Agregados .....	43
<b>Tabela 3</b> - Ensaio de caracterização de ligantes e normas reguladoras .....	46
<b>Tabela 4</b> - Ensaio de caracterização mecânica.....	47
<b>Tabela 5</b> - Ensaio e normas reguladoras para caracterização dos agregados.....	47
<b>Tabela 6</b> - Granulometria dos agregados graúdos e miúdos.....	48
<b>Tabela 7</b> – Massa Específica real e aparente, e absorção dos agregados graúdos e miúdos .....	50
<b>Tabela 8</b> – Dados para realização do ensaio de Abrasão Los Angeles.....	51
<b>Tabela 9</b> – Resultado obtido no ensaio de Abrasão Los Angeles.....	51
<b>Tabela 10</b> - Granulometria do RAP com ligante .....	57
<b>Tabela 11</b> - Caracterização do Ligante extraído do RAP .....	58
<b>Tabela 12</b> - Granulometria do RAP sem ligante .....	58
<b>Tabela 13</b> - Proporção dos agregados nas composições granulométricas .....	61
<b>Tabela 14</b> - Parâmetros volumétricos resultados dos Teores de ligantes calculados inicialmente.....	65
<b>Tabela 15</b> - Parâmetros volumétricos obtidos com os teores testados para obter o teor de projeto .....	65
<b>Tabela 16</b> - Proporção de agregados nas granulometria das misturas recicladas .....	66
<b>Tabela 17</b> - Teor de projeto correspondente às misturas utilizadas na pesquisa .....	67
<b>Tabela 18</b> - Corpos de prova condicionado e não condicionados de acordo com a condição da mistura .....	71
<b>Tabela 19</b> - Resultado da massa da amostra de CAP Puro antes e depois de RTFO.....	72
<b>Tabela 20</b> - Resultado da massa da amostra de CAP modificado antes e depois de RTFO.....	73
<b>Tabela 21</b> - Aumento de temperatura após ensaio de RTFO.....	75
<b>Tabela 22</b> - Penetração retida após o ensaio de RTFO.....	76
<b>Tabela 23</b> - Temperaturas de usinagem e compactação .....	79
<b>Tabela 24</b> - Granulometria agregado graúdo (Brita 19) .....	93
<b>Tabela 25</b> - Granulometria agregado graúdo (Brita 12,5) .....	93
<b>Tabela 26</b> - Granulometria agregado miúdo (Areia) .....	94
<b>Tabela 27</b> - Granulometria agregado miúdo (Pó de Pedra) .....	94
<b>Tabela 28</b> - Brita 19.....	94
<b>Tabela 29</b> - Brita 12,5.....	95
<b>Tabela 30</b> - Areia.....	95
<b>Tabela 31</b> - Pó de pedra.....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AR	Agente Rejuvenescedor
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a quente
CGS	Compactador Giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EBE	Enrobé à Basse Energie
EBT	Enrobé à Basse Temperature
ES	Especificação de Serviço
EUA	Estados Unidos
HWMA	Asfalto Misto de Meia Temperatura
LEA	Low Energy Asphalt
LVDTs	Linear Variable Differential Transformers
MAMs	Misturas Asfálticas Mornas
MR	Módulo de Resiliência
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RT	Resistência à Tração
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement
UAEC	Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1	OBJETIVOS.....	23
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	23
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	23
1.2	JUSTIFICATIVA.....	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	25
2.1	PAVIMENTOS .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Revestimento asfáltico</b> .....	26
2.2	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	27
<b>2.2.1</b>	<b>Pavimento Flexível</b> .....	27
<b>2.2.2</b>	<b>Pavimento Semirrígido</b> .....	27
<b>2.2.3</b>	<b>Pavimento Rígido</b> .....	27
<b>2.2.4</b>	<b>Pavimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto</b> .....	28
<b>2.2.5</b>	<b>Pavimento Composto</b> .....	29
2.3	MISTURAS ASFÁLTICAS .....	29
2.4	MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	32
<b>2.4.1</b>	<b>Tecnologias de fabricação de misturas mornas</b> .....	33
2.4.1.1	Aditivos Orgânicos.....	33
2.4.1.2	Agentes Químicos .....	35
2.4.1.3	Espuma de Asfalto.....	35
2.4.1.4	Outras Tecnologias.....	36
2.5	DOSAGEM .....	37
2.6	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS .....	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	41
3.1	MATERIAIS .....	41
<b>3.1.1</b>	<b>Ligante asfáltico</b> .....	42
<b>3.1.2</b>	<b>Agregados</b> .....	43
<b>3.1.3</b>	<b>Óleo de Girassol</b> .....	43
<b>3.1.4</b>	<b>Reclaimed Asphalt Pavement</b> .....	44
3.2	MÉTODOS.....	45
<b>3.2.1</b>	<b>Ensaio</b> .....	45

3.3	PROPRIEDADES FÍSICA DOS MATERIAIS.....	47
3.3.1	<b>Caracterização dos Agregados Virgens.....</b>	47
3.3.2	<b>Granulometria dos Agregados.....</b>	47
3.3.3	<b>Massa Específica e Absorção.....</b>	49
3.3.4	<b>Abrasão Los Angeles.....</b>	50
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE – CAP 50/70.....	51
3.4.1	<b>Definição do Teor de Aditivo.....</b>	51
3.4.2	<b>Adição do Óleo de Girassol ao Ligante.....</b>	52
3.4.3	<b>Ensaio de Penetração.....</b>	52
3.4.4	<b>Ponto de Amolecimento.....</b>	53
3.4.5	<b>Viscosidade Rotacional.....</b>	54
3.4.6	<b>RTFO (Rolling Thin-Film Oven).....</b>	55
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL RECICLADO.....	57
3.5.1	<b>Agregados e Ligante.....</b>	57
3.6	DOSAGEM SUPERPAVE.....	59
3.6.1	<b>Dosagem de Mistura com Agregados Virgens.....</b>	60
3.6.2	<b>Rice Test.....</b>	61
3.6.3	<b>Determinação do Teor do Ligante.....</b>	63
3.6.4	<b>Compactação dos corpos de prova sem incorporação do RAP.....</b>	63
3.6.5	<b>Dosagem de Mistura com Material Reciclado.....</b>	66
3.7	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	67
3.7.1	<b>Ensaio de Módulo de Resiliência.....</b>	67
3.7.2	<b>Ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral.....</b>	68
3.7.3	<b>Ensaio de Lottman Modificado.....</b>	69
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	72
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE.....	72
4.1.1	<b>Perda de massa do CAP causada pelo ensaio de RTFO.....</b>	72
4.1.1.1	Amostra de CAP Puro.....	72
4.1.1.2	Amostra de CAP Modificado.....	72
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE PURO E MODIFICADO.....	73
4.2.1	<b>Ensaio de Ponto de Amolecimento.....</b>	73
4.2.2	<b>Ensaio de Penetração.....</b>	75
4.2.3	<b>Ensaio de Viscosidade.....</b>	76

4.3	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	80
4.3.1	<b>Resistência à Tração Indireta Por Compressão Diametral</b> .....	80
4.3.2	<b>Módulo de Resiliência</b> .....	81
4.3.3	Lottman Modificado (Dano por Umidade Induzida) .....	83
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	86
5.1	CONCLUSÕES OBTIDAS .....	86
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	88
	<b>ANEXOS</b> .....	933

## 1 INTRODUÇÃO

O principal modo de transporte brasileiro, o modal rodoviário, é responsável pelo trânsito de pessoas de uma localidade a outra, além de ser o meio por onde se transportam mercadorias e serviços, necessários para a manutenção da vida. Assim, faz-se necessário para o conforto dos usuários de vias pavimentadas, que as mesmas sejam apropriadas para a sua utilização, garantindo a segurança, a qualidade, e a economia.

Partindo da conjectura afirmada pela CNT (Confederação Nacional do Transporte) (2019), em que 99% das rodovias pavimentadas brasileiras possuem pavimento flexível e, compreendendo o informativo disposto pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes), em que o Brasil possuía em 2019, 1.720.770 km de rodovias espalhadas ao longo de seu território continental, sendo a quarta maior malha rodoviária do mundo. Sendo que apenas 12,4% ou 213 453 km, do total, pavimentadas, 78,5% ou 1 349 938 km de rodovias não pavimentadas e 9,1% ou 157 309 km de rodovias planejadas (DNIT, 2019).

O processo de urbanização e desenvolvimento humano, traz consigo avanços e melhoramentos que visam facilitar e engrandecer as atividades e práticas do homem. Contudo, o impacto ambiental causado por estas mudanças desenfreadas carregam a necessidade de uma atenção voltada pelos governantes e investidores, de modo que, toda e qualquer alteração do meio, que prejudique o ambiente, seja cautelosamente revisada, na qual o consumo de produtos e serviços, fatores esgotantes da matéria prima disposta na Terra, sejam diminuídos, protegendo o nosso maior patrimônio, a natureza.

Por conseguinte, buscando minimizar os desperdícios e danos causados, colaborando com o não esgotamento dos bens naturais, o investimento no reaproveitamento de resíduos advindos da construção civil viabilizam estudos no ramo do reaproveitamento dos detritos. Com o intuito de um fim proveitoso dos materiais provenientes de antigos revestimentos, diminuindo a porcentagem do bota-fora, e protegendo o meio ambiente (CANCHANYA, 2017).

O RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*, origina-se da técnica denominada fresagem. Segundo Bernucci *et al.* (2010) o processo citado anteriormente opera através de um corte parcial ou total da área, com o auxílio de equipamentos especiais, na qual o revestimento asfáltico no trecho danificado, englobando ou não mais de uma camada do pavimento, é desgastado e retirado, para ser manipulado e retornar a sua função primordial, restaurando a qualidade do rolamento da superfície. Freire *et al.* (2014) condicionam ao

método a restituição da capacidade de carga ao longo das novas espessuras de camadas ou com o corte do revestimento deteriorado, utilizando uma máquina fresadora, e, posteriormente, reaplicando uma nova camada composta pelo material reciclado.

Oferecendo vantagens em sua utilização, como exemplo na manutenção do greide davia, a fresagem chegou ao Brasil na década de 1980 e adquiriu espaço no ramo da pavimentação com o passar dos anos (BALBO, 2016). Assim, entrelaçado aos ideais de ordem estética, funcional e de segurança, a reciclagem dos pavimentos ocorre por meio do reuso de misturas asfálticas danificadas, que entram em proporção definida por meio de estudo em uma nova mistura, tendo o reaproveitamento dos ligantes remanescentes e agregados antigos, advindos do RAP, além do acréscimo de um agente rejuvenescedor.

A incorporação em proporção de RAP numa nova mistura se dá em porcentagem, o NCHRP Report 452 estabelece uma faixa de baixo, intermediário e alto teor de RAP, sendo definido como 10 a 15% baixo, 25 a 30% intermediário e acima como sendo alto teor. Este alto teor possui certo limite de uso, visto que as usinas precisam se adaptar para incorporação de valores acima de 30% de RAP numa nova mistura. Além da necessidade garantir que esta nova mistura responda aos padrões de qualidade e resistência mecânica.

Freire (2017) apresenta as vantagens do uso desta técnica, listadas como diminuição do consumo energético, redução do uso de materiais asfálticos e agregados, e redução do tempo de execução e restauração das vias, o que por consequência, diminui o custo final da obra. Associado também à preservação ambiental, temos o emprego da fresagem asfáltica e reaproveitamento com a reciclagem morna, bastante difundida em outros países, e em crescimento no Brasil. Silva (2016) concretiza os benefícios econômicos, ambientais e sociais como fatores preponderantes para o desenvolvimento da pesquisa nesta área.

Suzuki (2019) infere em seu trabalho os benefícios ambientais e econômicos do uso do RAP, contemplando a redução tanto da exploração de novos recursos naturais como da emissão de gases do efeito estufa, além da disposição de resíduos no meio. Observa também, a redução de custos na aquisição de novos insumos, sendo estes ligante asfáltico virgem e agregados, transporte de materiais e royalties. Desta forma, a incorporação do RAP, acarreta na diminuição direta da proporção de agregados virgens na dosagem, além do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), como citado anteriormente parte mais cara do montante, justificando então, a importância deste material reciclado na mistura final.

O processo de usinagem das misturas asfálticas garante a durabilidade e a estabilidade do pavimento, e, para ocorrência da queima de combustíveis impõe-se uma escala de temperatura. Nesta perspectiva, observa-se a existência de quatro grupos distintos

na escala de temperatura, podendo ser: mistura a quente, mistura morna, mistura semimorna, e mistura a frio.

A mistura morna pode, em alguns casos, manter as qualidades de uma mistura a quente, auxiliando no melhoramento da trabalhabilidade, na diminuição de gastos, redução de desperdício, e durabilidade da mistura. Desta feita, observou-se o comportamento do óleo de girassol, aditivo redutor de viscosidade estudado neste trabalho, na fabricação de misturas asfálticas mornas. Segundo Carvalho (2018) o óleo de girassol é oriundo de fonte renovável e de baixocusto, com potencial na fabricação das MAMs, apresenta também, considerável aumento na produção devido a vasta demanda e empregabilidade do mesmo.

Por conseguinte, objetiva-se aprimorar a incorporação em elevadas proporções do RAP nas misturas asfálticas mornas, através da utilização em paralelo do aditivo redutor de viscosidade, o óleo de girassol. Assim como expor o caráter preservativo do meio ambiente, dirigindo-se ao resultado mais eficaz no comportamento destas misturas recicladas, em uma balança correlacionada ao seu comportamento mecânico, levando assim a maximização de seu aproveitamento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar o uso do óleo de girassol como aditivo redutor de viscosidade, buscando favorecer a trabalhabilidade da mistura asfáltica com o aumento da proporção de RAP.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a influência do óleo de girassol, quando acrescido ao ligante asfáltico, nas temperaturas de usinagem e compactação;
- b) Verificar o comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas com a adição do óleo de girassol; e
- c) Analisar a proporção de material fresado mais satisfatória a ser incorporado nas misturas asfálticas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A CNT (2017), dispõe que 48,6% das rodovias pavimentadas no território nacional apresentam alguma deficiência, qualificando-se em regular, ruim e péssimo estado, com 35,4%, 10,1% e 3,1% respectivamente. Este fato, consolida a necessidade de um plano e execução do mesmo, visando a recuperação da extensa quilometragem desregular. Concomitantemente, aferem-se os estudos na área da pavimentação a exemplo dos supracitados neste trabalho de Canchanya (2017), Régis e Suzuki (2019), que associam a restauração destas vias com a reciclagem dos materiais presentes na constituição do pavimento asfáltico objetivando a diminuição dos resíduos provenientes do desgaste do pavimento asfáltico.

Conforme a norma DNIT 031/2004 - ES, a composição do concreto asfáltico é feita por agregado graduado, material de enchimento (*filer*) quando necessário e cimento asfáltico. Este último representa a parcela com maior custo do composto, encarecendo a implantação ou revitalização de um pavimento. Sendo assim, com o intuito de aumentar a trabalhabilidade da mistura reduzindo a proporção de materiais virgens e o reaproveitamento do CAP presente no asfalto fresado, desenvolve-se esta pesquisa, fundamentada em estudos como Carvalho (2018), Freire *et al.* (2014), e Silva (2016), que

discorrem sobre a utilização de um aditivo redutor de viscosidade na mistura asfáltica, tencionando o aumento da proporção do RAP.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa é composta por seis capítulos e anexos. A seguir tem-se uma breve descrição da disposição do conteúdo ao longo do trabalho:

- a) Capítulo 1: Apresenta a introdução com uma breve exposição do assunto, seguido dos objetivos que serão buscados nesta pesquisa, a justificativa de realização deste trabalho e por fim o presente tópico que apresenta a disposição do todo;
- b) Capítulo 2: Neste capítulo dispõe-se o referencial teórico, que fundamenta todos os assuntos aqui abordados, expondo com maior relevância aqueles que caracterizam-se como peças chaves no desenvolver do trabalho. Inicialmente apresentou-se sobre pavimentos, seguido dos tipos de pavimento existentes. Logo depois, apresentam-se as misturas asfálticas com suas diferenciações, evidenciando as MAMs. Em seguida, relata-se a importância dos aditivos, caracterizando o óleo de girassol. Após, uma discussão relativa às dosagens. E, por fim, apresenta-se sobre o RAP.
- c) Capítulo 3: No capítulo relativo aos materiais e métodos, apresentam-se todos os materiais utilizados para a realização desta pesquisa, e os ensaios realizados como procedimentos experimentais;
- d) Capítulo 4: Apresentam os resultados e discussões obtidos através do programa experimental realizado em laboratório;
- e) Capítulo 5: O capítulo em questão apresenta as conclusões obtidas por meio desta pesquisa;
- f) Capítulo 6: Apresenta as referências bibliográficas utilizadas para a produção deste trabalho;
- g) Anexos: Encontra-se disposto todo material extra que auxiliou na produção da pesquisa.

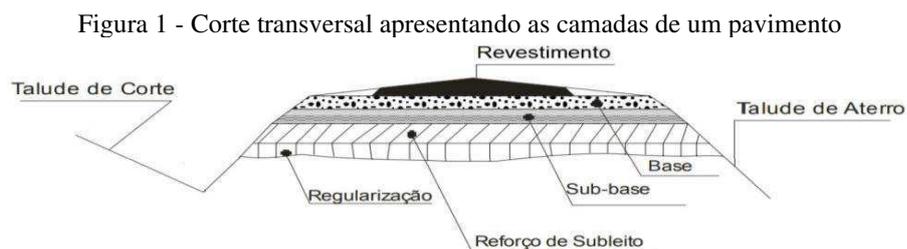
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Dispõe-se neste capítulo a fundamentação teórica necessária para a elaboração da pesquisa. Assim sendo, expõem-se os assuntos mais relevantes que auxiliam no desenvolvimento do trabalho, através de publicações correntes relacionadas à temática em questão. Desta forma, apresenta-se um breve histórico da criação da pavimentação, seguido de abordagens relacionadas a pavimentação e suas características, especificações sobre misturas, dosagens e aditivos. Concluindo com um expositório relativo ao RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*).

### 2.1 PAVIMENTOS

Com o desenvolvimento dos sistemas de gerência de pavimentos, nos anos 80, começaram a surgir metodologias de reforços de pavimentos que se fundamentam em modelos de previsão de desempenho e que procuram analisar diversas estratégias de intervenção com vistas a minimizar o custo de ciclo de vida do pavimento (SENÇO, 1997). Ocasionalmente, então, o avanço nas práticas relacionadas a pavimentação, na qual o homem em um primeiro cenário buscou as condições de espaço, para o seu transporte, mais viáveis e fáceis. Assim, a evolução das técnicas e tecnologias utilizadas na sociedade, veio a desenvolver os revestimentos depositados em locações de transporte e trânsito, visando a qualidade e o conforto.

Trata-se de uma estrutura constituída por diversas camadas superpostas de espessuras finitas e com diferentes materiais, construídas sobre o subleito, destinada a resistir e distribuir ao subleito simultaneamente esforços horizontais e verticais, bem como melhorar as condições de segurança e conforto ao usuário (DER/SP, 2006). Na Figura 1 é apresentado o corte transversal nas camadas de um pavimento.



Fonte: Viana (2019)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-asfaltico/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

As análises dos pavimentos envolvem muitas variáveis, como: tráfego, solicitações ambientais, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais. Representam expressiva parcela da infraestrutura de transportes, como, melhoramentos marginais nos seus componentes que podem resultar em grandes economias a curto e médio prazo (YOSHIZANE, 2006).

Assim sendo, o gerenciamento de um pavimento asfáltico é complexo, na qual deve haver um controle de qualidade e planejamento nas fases de projeto, manutenção e reabilitação. Atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos devem ser realizadas de forma contínua e planejada, devido ao surgimento de danos e defeitos, causados pelas solicitações pelo tráfego e pelo meio ambiente, que se resume em vida útil do pavimento.

As técnicas de reparo não são a única maneira correta de se executar os serviços de manutenção e reabilitação, mas, comprovadamente, resultam em uma melhora significativa e duradoura dos pavimentos. Varia do simples preenchimento das trincas com emulsões asfálticas ou com asfaltos diluídos até a remoção completa da área afetada, instalação de drenagem e execução de um remendo profundo. O método de reparo depende da causa da deterioração, que deve ser totalmente eliminada para que o defeito não torne a ocorrer. Depende também, da extensão e severidade das formas de deterioração que ocorrem na seção de pavimento. As causas da deterioração dos pavimentos podem ser agrupadas em: Solicitações do tráfego associadas, principalmente, à carga por eixo, ao tipo de rodagem, à pressão de enchimento dos pneus e ao tipo de suspensão; Solicitações climáticas principalmente variações de temperatura e de teor de umidade (YOSHIZANE, 2006).

### **2.1.1 Revestimento asfáltico**

Trata-se da camada superior que tem como função resistir diretamente às ações do tráfego e transmitir-las de forma atenuada às camadas inferiores. Deve também impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de conforto e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Penz (2010) afirma que, a camada de revestimento com os maiores carregamentos deve resistir aos esforços atuantes além de ser durável, flexível e impermeável. Esse conjunto de fatores garante boas condições de rolamento, em outras palavras, os usuários das vias poderão usufruir de um caminho seguro e confortável à sua circulação.

De acordo com Nakamura (2012), sabendo que o revestimento asfáltico é uma das soluções mais tradicionais e utilizadas na construção e recuperação de vias de tráfego de automóveis, afere-se a necessidade do conhecimento dos componentes presente nesta mistura.

Segundo Zagonel (2013), este revestimento é constituído pela associação de agregados e materiais asfálticos. Assim sendo, trata-se de uma rica mistura de cimento Portland, areia, agregado graúdo e miúdo e *filler*.

## 2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

### 2.2.1 Pavimento Flexível

Pavimento flexível (Figura 2) é constituído por revestimento asfáltico sobre camada de base granular ou sobre camada de base de solo estabilizado granulometricamente. Os esforços provenientes do tráfego são absorvidos pelas diversas camadas constituintes da estrutura do pavimento flexível (DER/SP, 2006).

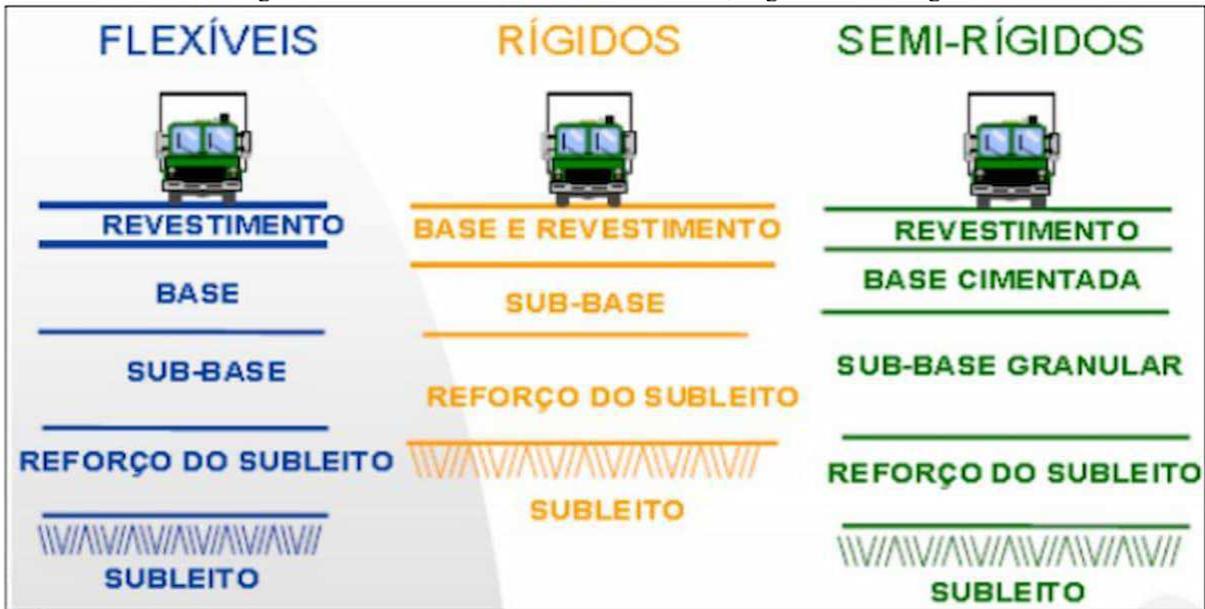
### 2.2.2 Pavimento Semirrígido

Pavimento semirrígido (Figura 2) é constituído por revestimento asfáltico e camadas de base e sub-base em material estabilizado com adição de cimento. O pavimento semirrígido é conhecido como pavimento do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltica é executada sobre camada de base cimentada e do tipo indireto ou invertido quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada (DER/SP, 2006).

### 2.2.3 Pavimento Rígido

Pavimento rígido (Figura 2) é constituído por placas de concreto de cimento Portland assentes sobre camadas de sub-base granular ou cimentada. Quando a sub-base for cimentada pode, adicionalmente, haver uma camada inferior de material granular. Os esforços provenientes do tráfego são absorvidos principalmente pelas placas de concreto de cimento Portland, resultando em pressões verticais bem distribuídas e aliviadas sobre a camada de sub-base ou sobre a camada de fundação (DER/SP: IP-DE-P00/002 - 2006).

Figura 2 - Camadas dos Pavimentos Flexíveis, Rígido e Semi-Rígidos

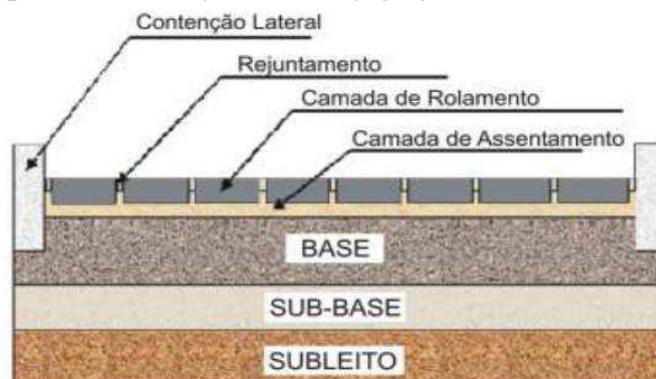


Fonte: Masterplate (2021)<sup>2</sup>.

#### 2.2.4 Pavimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto

Pavimento de peças pré-moldadas de concreto é constituído por revestimento em blocos pré-moldados de concreto de cimento Portland assentes sobre camadas de base granular ou cimentada. Pode ou não apresentar camada de sub-base granular quando a base for cimentada (DER/SP: IP-DE-P00/002 - 2006). Na Figura 3 é verificado os elementos das camadas do pavimento.

Figura 3 - Camadas pavimento de peças pré-moldadas de concreto



Fonte: Eduardo (2021)<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Disponível em: <https://masterplate.com.br/o-que-e-pavimento-semi-rigido/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

<sup>3</sup> Disponível em: <https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/pavimentos-blocos-concreto-pre-moldados-intertravados.htm>. Acesso em: 27 ago. 2021.

### 2.2.5 Pavimento Composto

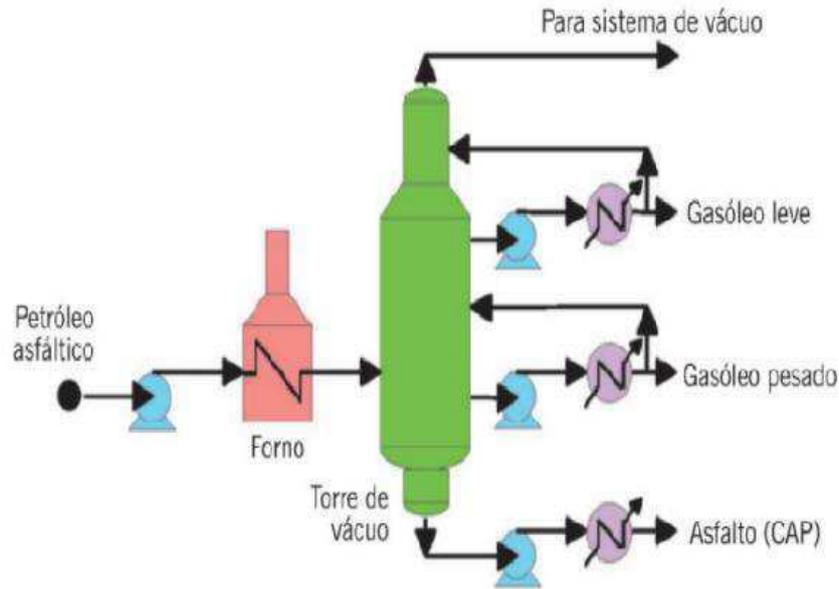
Pavimento composto é constituído por revestimento asfáltico esbelto sobre placas de concreto de cimento Portland sobre camada asfáltica (DER/SP: IP-DE-P00/002- 2006).

## 2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS

O CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), comumente conhecido no Brasil como asfalto, é um derivado do petróleo cuja composição destaca-se a elevada presença de betume. A ANP (Agência Nacional do Petróleo), afere que este material de coloração escura, composto por asfaltenos, hidrocarbonetos pesados e resinas, além do betume, pode apresentar três diferentes condições de estado, estas por sua vez, são baseadas na condição de temperatura ao qual o material se encontra. Bernucci *et al.* (2010) explicam que, quando em situação de baixas temperaturas, o CAP encontra-se em estado semi-sólido, à temperatura ambiente encontra-se em estado viscoelástico, e por fim em altas temperaturas apresenta-se em estado líquido.

De acordo com Carvalho (2018), sendo um produto que expande o seu ramo de funcionalidade, como impermeabilizante e revestimento por exemplo, pode ser extraído na natureza ou por meio de técnicas de processamento de petróleo. O processo de retirada do asfalto da matéria prima do petróleo, pode ocorrer por meio de destilação, na qual frações leves são retiradas do composto primário, até que se adquira as propriedades necessárias para a condição de CAP, salientando que estas por sua vez são estipuladas pela ANP. A Figura 4 mostra como é o sistema de retirada do CAP pelo petróleo.

Figura 4- Disposição do sistema de retirada do CAP advindo do Petróleo



Fonte: Santos (2017).

O uso do CAP em pavimentação é considerado:

O uso do Cap em pavimentação é um dos mais importantes entre todas as suas aplicações, e isso se deve ao fato de ser um material aglomerante, com grande adesividade, proporcionando forte união dos agregados e permitindo flexibilidade controlável. Este é impermeável, durável e resiste à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, podendo ainda ser utilizado com ou sem aditivos. Por consequência, na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de ligantes asfálticos com agregados minerais, de vários tamanhos (CARVALHO, 2018).

Tendo o conhecimento de que o asfalto, material aglomerante, impermeabiliza e reveste aonde lhe for aplicado, entende-se que quando unido a outros materiais, os agregados, haverá a formação de uma mistura asfáltica, e esta deve ser dosada de acordo com as frações proporcionais impostas por norma, à exemplo da NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) – *Report 452*. Esta mistura, será parte da camada de revestimento do pavimento, ou seja, a camada superior, assim, deve comportar-se garantindo propriedades como impermeabilidade, estabilidade, resistência à derrapagem e à fadiga, flexibilidade e trincamento térmico.

Bernucci *et al.* (2010) explana que, “a mistura de agregados e ligantes é realizada em usina estacionária e transportada posteriormente para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado, denominado vibroacabadora”. Assim, trata-se de um processo realizado em usina e posteriormente direcionado à função de aplicação ao qual será utilizada, este processo completa-se após a realização da compactação da mistura, que comprime o material tornando-o um arranjo que corresponda as propriedades de resistência e estabilidade ao qual são dimensionadas.

Dentre as misturas asfálticas, o CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a quente) é uma das mais utilizadas nas estradas brasileiras. O CBUQ, trata-se de uma mistura asfáltica, com porções devidamente fracionadas de agregados graúdos, miúdos, *filler* e o cimento asfáltico. Estes, são aquecidos em altas temperaturas, buscando atingir a propriedade visco-elástica do item betuminoso, buscando então a união destes. Sabe-se que o revestimento por mistura apresenta o pré-envolvimento do material asfáltico antes da compressão, este pode ocorrer na usina na qual é denominado de pré-misturado propriamente dito, e pré-misturado na pista, quando não ocorre na usina e sim no local de destino, no caso a pista (BERNUCCI *et al.*, 2010).

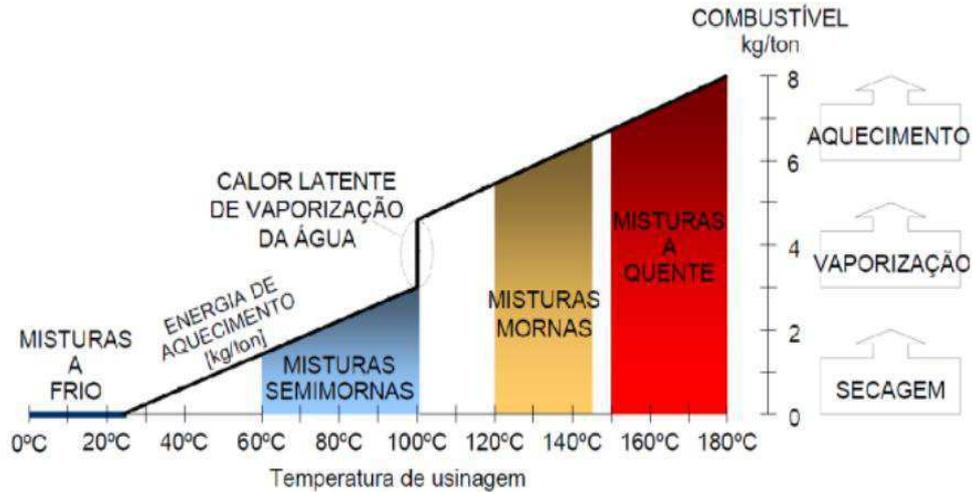
Seguindo o raciocínio relativo as misturas asfálticas quentes, afere-se que sua execução ocorre numa escala entre 150° e 180°C, tendo o aquecimento dos agregados e ligante para a realização da mistura. Possui bom desempenho e resistência às solicitações impostas no pavimento, além de menor suscetibilidade à deleteria da água durante a fabricação deste tipo de mistura. Contudo, o elevado grau de temperatura apresenta algumas desvantagens em sua prática, como exemplo do maior envelhecimento do ligante causado pelo calor que aumenta a rigidez do material reciclado, a maior produção de gases que afetam o meio ambiente, impulsionando fenômenos de poluição, dentre outros.

Existem ainda outros tipos de mistura, sendo elas mornas, semimornas e à frio, caracterizadas também pela graduação térmica. Esta última, varia com temperaturas entre 20° e 50° C, sendo consideradas temperaturas altas ao toque humano, contudo quando comparadas às temperaturas de usinagem, recebem a nomenclatura de mistura à frio. Nesta modalidade de mistura os agregados graúdos, miúdos e *filler* são misturados com ligante caracterizado como emulsão asfáltica de petróleo, em outras palavras, o asfalto se encontra diluído para facilitar a sua união com os materiais. Para localidades com baixo tráfego, manutenção e ou fabricação de pavimentos recomenda-se este tipo de mistura, visto a condição do agregado não necessitar de pré aquecimento, além da facilidade de transporte de operadores da mistura até o local de aplicação.

E, ainda, temos as misturas semimornas e mornas, que caracterizam temperaturas intermediárias das misturas à frio e à quente, ou seja, suas temperaturas variam no intervalo entre 50° e 150°C. Claramente, as misturas semimornas são temperaturas um pouco mais elevadas que as misturas a frio, caracterizadas com valores até 100°C, sendo realizada uma mistura usinada. Enquanto de acordo com Bonaquist (2018), a mistura morna deve ser produzida com cerca de 28°C menos que as misturas quentes. E, ainda, afere-se que a temperatura do ligante deve estar de 10 a 15° C abaixo da temperatura dos agregados quando aquecidos, que por sua vez não podem passar de 177° C (BERNUCCI *et al.*, 2010). Na Figura

5 é verificado a relação entre os tipos de mistura com os indicadores de temperatura e quantidade de combustível.

Figura 5- Tipos de mistura de acordo com a temperatura e quantidade de combustível utilizado na produção



Fonte: D'Angelo *et al.* (2008).

## 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Dentre a condição de produção das misturas asfálticas, destacam-se os pontos positivos e negativos que rodeiam esta área, na qual estudos buscam apresentar a linha de benefícios no uso das MAMs quando comparadas as misturas à quente e à frio, visando aumentar o uso da mesma na execução de revestimentos asfálticos. Assim, pontuam-se os prós e contras relacionados a esta mistura, salientando a condição de existência de malefícios que diminuam a possibilidade de escolha. O Quadro 1, apresenta esta comparação.

Quadro 1 - Comparativo entre os benefícios e os malefícios das MAMs

Pontos Positivos	Pontos Negativos
Redução do envelhecimento do ligante asfáltico, devido o menor aquecimento;	Poucos dados para realização de testes;
Redução do consumo de combustíveis, com o menor gasto de energia necessária para o aquecimento;	Análise financeira de economia ainda imprecisa, devido a dúvida no custo da redução de energia;
Redução da emissão de gases que danificam o meio ambiente, devido a menor temperatura.	Aditivos com cera podem cristalizar em temperaturas atmosféricas quando acrescido cera como aditivo, aumentando a viscosidade do ligante.
Devido a menor temperatura, diminuindo a quantidade de fumaça, observa-se melhores condições de trabalho;	Presença de umidade na mistura ligante-agregado, que não se desfaz por completo devido a temperatura menor;
Devido o menor envelhecimento, incorpora-	

se mais material reciclado – fresado – diminuindo a rigidez do ligante;	
--	--

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O Quadro 1, impõe condições de favorecimento ou não ao uso das misturas asfálticas mornas, na qual observa-se a maior presença de vantagens do que quando comparado as desvantagens, sendo então motivos que fazem crescer o uso dessa tecnologia no ramo da pavimentação em todo o mundo. Harrigan (2012) aponta que nos Estados Unidos a tecnologia de misturas asfálticas mornas é uso essencial, pois apresenta parâmetros volumétricos básicos e propriedades que se comparam as misturas quentes.

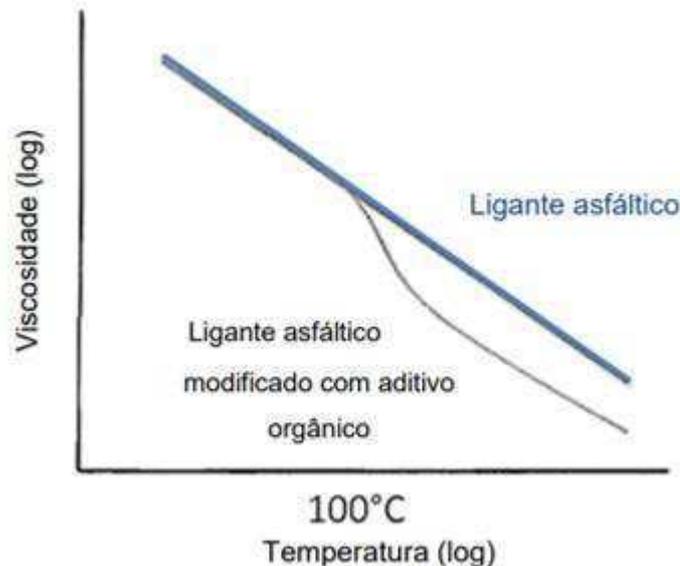
#### **2.4.1 Tecnologias de fabricação de misturas mornas**

Visando aprimorar a produção das MAMs, favorecendo a trabalhabilidade das misturas em temperaturas inferiores para a realização da usinagem e compactação, existem, atualmente, diversas tecnologias que visam diminuir a temperatura de processamento de misturas asfálticas quentes, à exemplo das descritas a seguir.

##### **2.4.1.1 Aditivos Orgânicos**

Estes aditivos quando misturados com o CAP modificam as propriedades do ligante, alterando sua reologia, através de uma redução de viscosidade em altas temperaturas. Quando se encontram submetidos a temperaturas maiores que o ponto de amolecimento, ocorre uma interferência direta nas propriedades do ligante que reduzem diretamente a sua viscosidade (Figura 6) (CARVALHO, 2018). Desta forma, observa-se que a trabalhabilidade no ponto de fusão do ligante melhora mediante a diminuição da viscosidade ocorrida pela modificação nas propriedades reológicas (OLIVEIRA, 2014). Afere-se ainda que o resfriamento da mistura ocasiona na solidificação, em partículas microscópicas, deste aditivo, enrijecendo o ligante (RUBIO *et al.*, 2012).

Figura 6 - Gráfico relativo a condição da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico mediante a mudança de temperatura



Fonte: Anderson *et al.* (2008).

Alguns exemplos de óleos e ceras estão dispostos à seguir:

- a) Óleo de Girassol: Utilizado neste estudo, o Óleo de Girassol é cultivado por meio da agricultura, e pode ser tratado através de processos tecnológicos que destinam a sua finalidade. A ANVISA (Agência Nacional de Vigilância sanitária) aponta na resolução nº 482, datada em setembro de 1999, que este óleo possui caracterização comestível, na qual pode ser refinado, semi-refinado, bruto e/ou virgem. Trata-se de um material de fácil acesso devido a grande produção no Brasil, ocasionada pela análise econômica do baixo custo de produção. Este óleo possui excelentes características físico-químicas e nutricionais, com alta relação de ácido graxos poliinsaturados/saturados (CARVALHO, 2018; CASTRO *et al.*, 2016). A adição deste óleo a misturas mornas, é visto em estudos que buscam aumentar a trabalhabilidade e diminuir a temperatura utilizada. Este estudo fará uma análise da incorporação deste óleo quando acrescido quantidades de fresado na mistura;
- b) Sasobit: Trata-se de uma cera sintética, produzida pela gaseificação do carvão, com pouca modificação na usina. Este reduz a viscosidade, permitindo uma trabalhabilidade entre 18° e 54°C quando adicionado em frações de 1% à 2,5%, contudo possui adição ótima à 3%. Possui ponto de amolecimento por volta de 100°C, e cerca de 30°C a menos na mistura morna;
- c) CCBit 113 AD: Aditivo amarelo esbranquiçado em forma de pó, grãos ou flóculos, é insolúvel à água em 20°C, e viscosidade dinâmica com cerca de 150°C. Permite

- reduzir a temperatura em até 40°C, mantendo características mecânicas;
- d) Asphaltan-B: Aditivo com ponto de fusão em cerca de 100°C, aprimora a qualidade do ligante, como a compactabilidade e resistência à fadiga. Afere-se a adição de 2 a 4% na mistura;
  - e) Cera de Carnaúba: Obtida através de uma palmeira, a carnaúba, diminuindo a proporção de adição de cera e aumento da temperatura, reduz a resistência à deformação do ligante. Afere-se a inserção de cerca de 2% na mistura;
  - f) Óleo de Mamona: Nomeado como aditivo verde, por tratar-se de uma fonte renovável e biodegradável, possui estabilidade em diferentes condições de temperatura. Proporciona redução da viscosidade aumentando a trabalhabilidade.

#### 2.4.1.2 Agentes Químicos

Também conhecido como agente surfactante, são produzidos pela reação entre aminas e ácidos graxos (AGNUSDEI, 2011) podem ser incorporados às misturas previamente ou no ato da mistura, são viáveis no âmbito econômico. Carvalho (2018), aponta em seu estudo que estes produtos não dependem da redução das temperaturas de mistura e de compactação e da formação de espuma. Rubio *et al.* (2012) dispõe que a combinação dos emulsificantes, surfactantes, polímeros e aditivos melhoram a trabalhabilidade e compactação da mistura, devido a melhor adesividade do material.

Alguns exemplos de aditivos pertencentes à classe surfactante são:

- a) Evotherm (R);
- b) Gemul XT14;
- c) Residet<sup>TM</sup> WMX;
- d) Revix<sup>TM</sup>;
- e) Cecabase RT (R);

#### 2.4.1.3 Espuma de Asfalto

A espuma de asfalto é produzida mediante a adição de uma certa quantidade de água no ligante quente, material hidrófilo, ou seja, material não compatível com a presença de água, ou então agregado úmido. Este encontro ocasionará uma reação de expansão no ligante, devido a presença da água fria gerando então a espuma asfáltica, que diminui a viscosidade e aumenta a trabalhabilidade do material (CARVALHO, 2018; PROWELL;

HURLEY, 2007).

Alguns exemplos de materiais relativos a esta tecnologia são:

- a) LEA (Low Energy Asphalt);
- b) Aquablack WMA;
- c) WAM-Foam;
- d) Bouble Berrel Green;
- e) Zeólitas;

#### 2.4.1.4 Outras Tecnologias

Os produtos descritos acima podem ou não alterar o comportamento reológico do asfalto, ou seja, sua viscosidade. Eles atuam alterando a tensão interfacial entre o agregado e o aglutinante asfáltico, melhorando assim a adesão entre os materiais, a processabilidade e compactabilidade da mistura. Dessa forma, podem reduzir a temperatura de processamento e compactação.

Olard (2010) relatou que abaixo de 100° C, a umidade residual no agregado fará com que o asfalto cresça em volume. Além disso as misturas mornas são chamadas de HWMA (Asfalto Misto de Meia Temperatura) ou misturas de baixa energia, porque são produzidas com temperaturas de 120°C a 150°C. Esta tecnologia foi desenvolvida originalmente na França com o nome de EBE (*Enrobés Basse Énergie*).

Outros métodos semelhantes foram desenvolvidos, chamados LEA (*Low Energy Asphalt*) e EBT (*Enrôbe á Basse Température*), e areia verde (cerca de 3% de umidade) foi usada na mistura para criar um efeito de espuma no adesivo. O processo de espuma de betume produzido pela mistura de betume com água e ar em uma câmara de expansão adequada: Quando a água entra em contato com o betume aquecido, sua temperatura aumenta rapidamente até atingir 100 °C. Este processo aumenta significativamente o volume do ligante e resulta na formação de espuma asfáltica. A espuma atua reduzindo a viscosidade para lubrificar os agregados do asfalto, melhorando a processabilidade do produto e promovendo a mistura e construção em temperaturas mais baixas.

O denominado WAM FOAM patenteado pela *Shell International Oil Company* é um derivado desta tecnologia. WAM Foam é um sistema composto por adesivos "leves" e adesivos "pesados". O ligante leve é misturado ao agregado para fazer um pré-revestimento e, em seguida, o betume mais duro é introduzido na mistura na forma de uma espuma. Portanto, a viscosidade da mistura é reduzida por um período de tempo, reduzindo assim a temperatura de

usinagem e compactação (SHELL BITUMEN, 2011).

## 2.5 DOSAGEM

Para a produção de uma mistura asfáltica, faz-se necessário a dosagem deste composto, ou seja, tendo o conhecimento de que a mistura é a união entre os agregados e o ligante, faz-se necessário uma distribuição proporcional relativa a quantidade de cada material. Bernucci *et al.* (2010) expõe que a dosagem de uma mistura consiste na busca, com o auxílio de procedimentos experimentais, de um teor ótimo de ligante, com uma faixa granulométrica predefinida. Contudo, sabendo que o termo é retirado de estudos em solo, nomeou-se como sendo teor de projeto, a dosagem relativa ao teor de ligante necessário. Alguns parâmetros adotados para a realização da dosagem são a temperatura envolvida no processo, o tipo de mistura que será executado e a energia de compactação envolvida.

Dentre os diversos tipos de dosagens existentes, destacam-se:

- a) Dosagem Marshall: Desenvolvido nos EUA (Estados Unidos), por volta de 1930, utiliza-se da compactação por impacto, na qual observa-se a distribuição granulométrica dos agregados e sua influência nas misturas, para que desta forma tenha a possibilidade de definir os padrões volumétricos, em que a proporção disposta dos materiais e do ligante deve resistir as cargas solicitantes. Quando comparado a outros métodos, este ainda é o mais utilizado não apenas nos EUA mas como também no Brasil, que apesar de iniciar atividades com outros tipos de dosagens ainda possui maior porcentagem de dosagens Marshall (NASCIMENTO, 2008);
- b) Dosagem SUPERPAVE: Observando que a compactação por impacto, para produção de corpos de prova, não apresentava densidades que condiziam com a realidade (BERNUCCI *et al.*, 2010). Assim, no SHRP (*Strategic Highway Research Program*) desenvolveu-se uma nova forma de dosagem denominada SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*). Kennedy *et al.* (1994), apresenta em seu estudo que o procedimento SUPERPAVE atende e minimiza as deformações permanentes, trincas por fadiga e variações de temperatura, analisando o efeito do envelhecimento do ligante, e os danos que podem ser causados pela umidade. Este tipo de dosagem estima o teor de projeto do CAP por meio da fixação do volume de vazios, tendo o conhecimento da granulometria dos agregados presentes (CARVALHO, 2018).

Destacam-se as diferenças entre os dois tipos de dosagens dipostos anteriormente, na qual a tecnologia SUPERPAVE realiza a compactação por amassamento, enquanto a tecnologia Marshall compacta por impacto. Assim como, na dosagem SUPERPAVE, quando observada a granulometria dos materiais observam-se os pontos de controle existentes e também as zonas de restrição, o que difere da análise granulométrica da dosagem Marshall (BERNUCCI *et al*, 2010; CARVALHO, 2018).

## 2.6 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2006) do DNIT afirma a importância da reciclagem dos pavimentos existentes, como sendo uma solução para muitos problemas e oferece inúmeras vantagens em relação a utilização convencional de materiais virgens. Nesta perspectiva, sabendo que uma mistura asfáltica é composta por agregados, ligantes e aditivos, quando reciclada ela oferece benefícios de conservação de energia gasta na usinagem e compactação, reutilização dos agregados e ligante e preservação do meio ambiente que se desgasta com a constante retirada de materiais para novas produções de pavimentos.

A reutilização do material reciclado em uma nova mistura, proporciona não só o reaproveitamento dos agregados presentes, mas também do ligante. Assim, quando dosada a nova mistura deve-se considerar o quantitativo existente que será incorporado no novo material a ser compactado. Assim como, faz-se necessário observar a necessidade de um agente rejuvenescedor que reestabeleça as propriedades do asfalto que se encontra oxidado e volatizado.

Todo pavimento seja ele flexível ou rígido necessita de manutenção após um determinado intervalo de tempo, respeitando esta manutenção garante-se que ele corresponda às funções de suportar as cargas dispostas, garantia do conforto ao usuário, impede o desgaste demasiado que pode ocasionar maiores problemas, dentre outros. Desta forma, a técnica denominada fresagem consiste em retirar a camada superior do pavimento para realização de uma nova mistura e nova compactação.

A ação do tráfego e clima em uma estrutura de um pavimento, ocasiona ao longo do tempo, perda de capacidade estrutural e/ou funcional, necessitando de uma reabilitação da camada de revestimento (SUZUKI, 2019). Assim, a reciclagem dos pavimentos consiste em uma técnica denominada fresagem que retira a camada superior do pavimento (revestimento) para que possa ser reciclada em uma nova mistura e em seguida, compactar essa nova mistura no local que foi desgastado.

O surgimento da reciclagem do revestimento asfáltico fresado, RAP, se deu pela busca por um descarte correto do revestimento, de forma que se reaproveite os materiais provenientes dos antigos revestimentos, impedindo seu amontoamento no bota-fora, além de ideais de proteção ao meio ambiente, com a economia de recursos naturais e redução de gases pelo menor consumo de energia (CANCHANYA, 2017).

Góis (2014), afere em seu estudo a importância da adaptação e investimento por parte dos órgãos públicos e empresas do setor privado, para receberem o material fresado com plataformas de estocagem do reciclado, circuitos de coleta e retirada do local de restauração do asfalto, e, estudos do controle de qualidade do material. Observa-se ainda a necessidade da adaptação do maquinário das usinas, visto que, quando o teor de incorporação do RAP é superior a 25%, pode ocorrer superaquecimento dos agregados virgens e transfere o calor para o fresado, assim recomenda-se o uso de tambor secador que aqueça apenas o material fresado, com uma usina com capacidade de armazenar e aquecer o RAP para ser incorporado na nova mistura.

Segundo a Norma 167/2013 – ES, disposta pelo DNIT, a reciclagem profunda de um pavimento adicionando o cimento Portland é um processo de reconstrução parcial da estrutura do pavimento. Assim, a retirada do material fresado, desgastando a camada total de revestimento, e incorporando-o em uma determinada quantidade a uma nova mistura, reduzindo assim a quantidade de materiais virgens, permite também uma correção de análise da dosagem inicial, analisando os teores de aditivos que podem ser incorporados.

Reciclagem quente é apontado como:

O Asphalt Institute (1986) define a reciclagem a quente de uma mistura asfáltica como sendo o processo em que o material recuperado de pavimento asfáltico, RAP, é combinado com um novo ligante, e/ou AR (agente rejuvenescedor) e/ou agregados virgens, conforme necessários, para a produção de misturas asfálticas que satisfaçam as especificações e normas do tipo de mistura produzida (SUZUKI, 2019).

O RAP é um material proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos quando da restauração de pavimento flexíveis (SACHET, 2012). Assim, ao incorporar o RAP em uma nova mistura, observam-se vantagens no quadro econômico e ambiental, e para a incorporação do teor de fresado resultar em condições viáveis, deve-se avaliar o comportamento e desempenho da mistura reciclada final. A dosagem deve ser respeitada de acordo com o método, realizando a combinação com o ligante em proporções adequadas que reflitam em conforto, trabalhabilidade e resistência do revestimento.

Donaldson e McGhee (2007) e Canchanya (2017) discorrem sobre a importância da qualidade e controle eficaz do pavimento de misturas com RAP incorporado, de modo que

apresente uma boa homogeneidade. Assim como, é necessário que esta mesma mistura responda às deformações mecânicas e propriedades volumétricas de forma satisfatória e dentro dos padrões impostos por norma para uma mistura nova apenas com materiais virgens.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a realização do trabalho, na fase das pesquisas experimentais, dispondo os materiais utilizados na pesquisa e o método de obtenção dos resultados por meio dos ensaios e estudos.

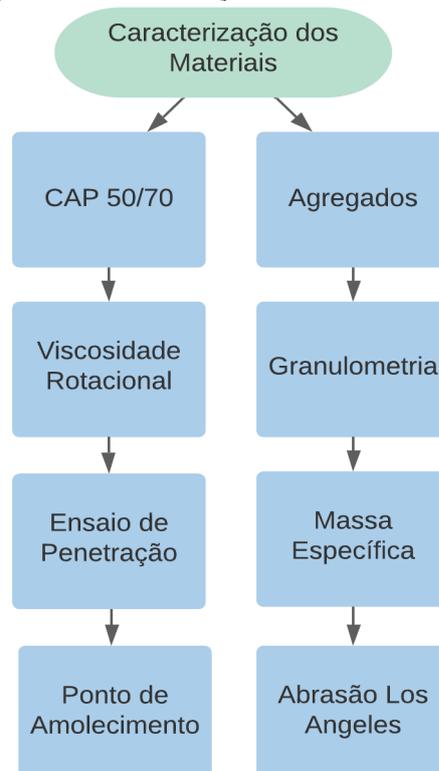
Todos os ensaios respeitaram as normas vigentes que regulam às suas execuções, estas foram retiradas das seguintes fontes:

- a) ABNT: Associação Brasileira de Normas e Técnicas;
- b) ASTM: American Society for Testing Materials;
- c) DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes;
- d) AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

#### 3.1 MATERIAIS

Para a realização dos procedimentos experimentais, faz-se necessário caracterizar os materiais utilizados na pesquisa. A Figura 7 apresenta um fluxograma com as especificações dos materiais.

Figura 7 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais utilizados na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 3.1.1 Ligante asfáltico

Para a realização do estudo, dispôs-se da utilização do ligante betuminoso, advindo da destilação do petróleo com propriedade impermeabilizante e pouco reativo à água, além de ser adesivo termo viscoelástico. Assim, as amostras do CAP 50/70, que possui maior utilização na região da Paraíba, foram fornecidas pela empresa Rocha Cavalcante, localizada em Campina Grande – PB, que atua na área da pavimentação. O material em questão é apresentado na Figura 8. Afere-se ainda as características do CAP, dispostas na Tabela 1.

Figura 8 - CAP 50/70



Fonte: Mfrural (2021)<sup>4</sup>.

A Tabela 1 foi obtida de acordo com o estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol.

**Tabela 1 - Características do CAP**

<b>Característica</b>	<b>CAP Puro</b>	<b>Limites</b>	<b>Norma</b>
Penetração (0,1mm)	70	50-70	NBR-6576/2007
Ponto de Amolecimento (°C)	48	46 (mín.)	NBR-6560/2016
Viscosidade Rotacional 135°C (cp)	375	274 (mín.)	NBR-15184/2004
Viscosidade Rotacional 150°C (cp)	187,5	112 (mín.)	NBR-15184/2004
Viscosidade Rotacional 177°C (cp)	69,25	57-285	NBR-15184/2004

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Os valores obtidos dos parâmetros do CAP 50/70 utilizado nesta pesquisa apresentam-

<sup>4</sup> Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/344517/cap-cimento-asfaltico-de-petroleo>. Acesso em: 27 ago. 2021.

se satisfatórios e correspondem aos limites regidos pelas normas de caracterização do ligante.

### 3.1.2 Agregados

Segundo Bernucci *et al.* (2010), com o intuito de suportar tensões impostas na superfície do pavimento e em seu interior, utilizaram-se agregados graúdos e miúdos na pesquisa. As informações sobre as dimensões destes, estão dispostas na Tabela 2. Buscando aumentar a trabalhabilidade da mistura asfáltica utilizou-se como fíler a cal hidratada, da marca MegaO. Estes materiais foram fornecidos da Pedreira Rocha Cavalcante, localizada na Paraíba e pela Pedreira Serrinha, localizada no Rio Grande do Norte.

**Tabela 2 - Características dos Agregados**

	<b>Material</b>	<b>Dimensão</b>
<b>Agregado Graúdo</b>	Brita	12.5 mm
	Brita	19 mm
<b>Agregado Miúdo</b>	Pó de Pedra	0,075 mm
	Areia	64 $\mu$ m

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

### 3.1.3 Óleo de Girassol

O modificador de viscosidade escolhido para a realização da pesquisa foi o óleo de girassol (Figura 9), optou-se por este, por tratar-se de uma fonte renovável e de baixo custo, com potencial na fabricação das MAMs, apresenta também, potencial aumento na produção devido a vasta demanda e empregabilidade do mesmo. O aditivo oleaginoso da marca Liza foi obtido no mercado local.

Figura 9 - Óleo de Girassol



Fonte: Casaambar (2021)<sup>5</sup>.

### 3.1.4 Reclaimed Asphalt Pavement

O RAP foi fornecido pelo DNIT de Santa Rita-PB, no dia 04 de abril de 2019 (um dia sem chuva) em um estoque de material fresado localizado no trecho do km 35,7 ao km 42,0 da pista crescente e decrescente da BR 230, entre Campina Grande e João Pessoa, na Paraíba.

Figura 10 - RAP proveniente da fresagem na BR 230



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

---

<sup>5</sup> Disponível em: <https://casaambar.com.br/materia-prima/oleos-vegetais/oleo-vegetal-de-girassol.html>. Acesso em: 28 ago. 2021.

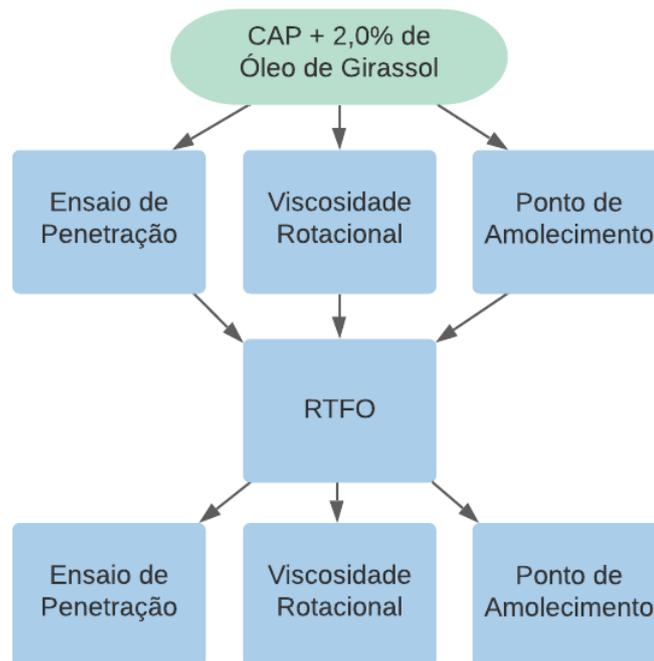
### 3.2 MÉTODOS

Desenvolveu-se esta pesquisa com o auxílio de ensaios realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos, da UAEC (Unidade Acadêmica de Engenharia Civil) - no Bloco CT, na UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) – Campus I. A disposição dos testes e suas condições de realização estão apresentadas a seguir.

#### 3.2.1 Ensaios

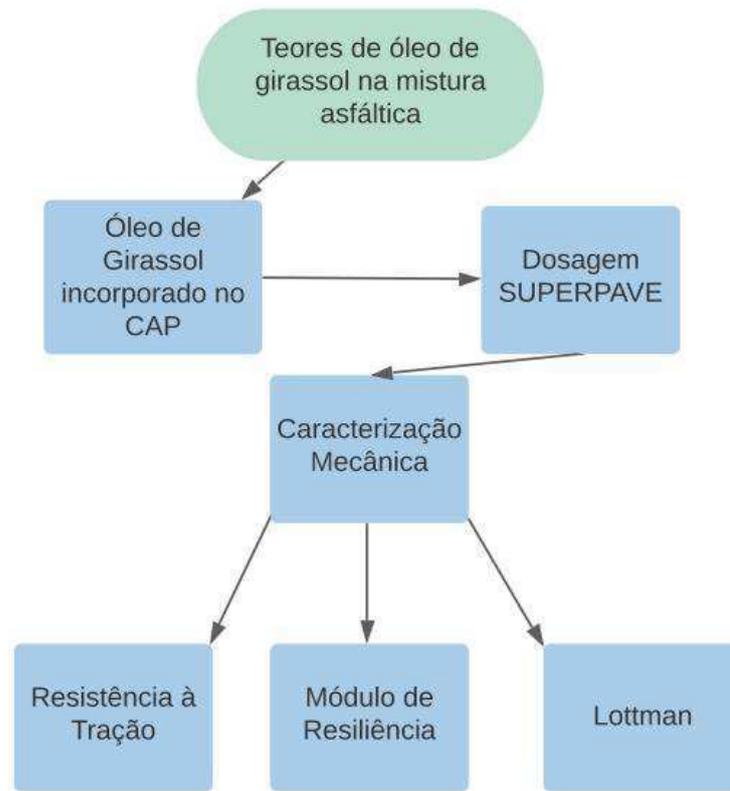
Nesta seção dispõe-se os fluxogramas (Figuras 11 e 12) dos ensaios de caracterização do ligante e caracterização mecânica.

Figura 11 - Fluxograma dos ensaios de caracterização do ligante



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Figura 12 - Fluxograma dos ensaios de caracterização mecânica



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Afere-se a importância de que os valores obtidos devem respeitar o que é regido por norma. Desta feita, faz-se uso das normas vigentes que regem o método que deve ser utilizado na pesquisa e seus componentes. As Tabelas 3 e 4 apresentam os ensaios e suas respectivas normas.

**Tabela 3** - Ensaios de caracterização de ligantes e normas reguladoras

<b>Caracterização do Ligante</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma Reguladora</b>
Penetração	DNIT ME 155/2010
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
RTFO	ASTM 2872-2019
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2004

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

**Tabela 4** - Ensaio de caracterização mecânica

<b>Caracterização Mecânica</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma Reguladora</b>
Lottman	DNIT ME 180/2018
Módulo de Resiliência	NBR 16018/2011
Resistência à Tração	DNIT ME 138/2010

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

### 3.3 PROPRIEDADES FÍSICA DOS MATERIAIS

Para realizar o processo de dosagem de uma mistura asfáltica que atenda aos requisitos de desempenho previstos, faz-se necessário conhecer as características físicas dos agregados dispostos na mistura. Desta forma, dispõe-se a seguir os ensaios realizados nesta fase.

#### 3.3.1 Caracterização dos Agregados Virgens

Realizou-se a caracterização dos agregados utilizados, auxiliando no conhecimento do material a ser utilizado. Os ensaios: Granulometria, absorção, abrasão Los Angeles e massa específica dos agregados graúdos e miúdos, serão utilizados nesta etapa (Tabela 5).

**Tabela 5** - Ensaio e normas reguladoras para caracterização dos agregados

<b>Caracterização dos Agregados</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma Reguladora</b>
Análise Granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT – ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos	DNIT – ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT – ME 084/95
Abrasão Los Angeles	DNIT – ME 035/98
Absorção	DNIT – ME 081/98

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

#### 3.3.2 Granulometria dos Agregados

Utilizando como base a norma reguladora DNIT – ME 083/98, realizou-se o ensaio de análise granulométrica dos agregados por peneiramento, salientando que utilizou-se nesta pesquisa agregados graúdos e miúdos. Desta forma, as peneiras de malhas utilizadas possuíam as seguintes aberturas: 0,075m, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm.

Com a estufa aquecida a 110°C colocou-se o material por 4 horas com o intuito de remover toda a umidade existente, em seguida realizou-se o peneiramento manualmente. Para

realizar o peneiramento, dividiu-se a massa total em faixas de tamanhos de grãos, e assim, pôde exprimir a massa de cada faixa em porcentagem da massa total.

Realizado o peneiramento, tendo a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos (Tabela 6).

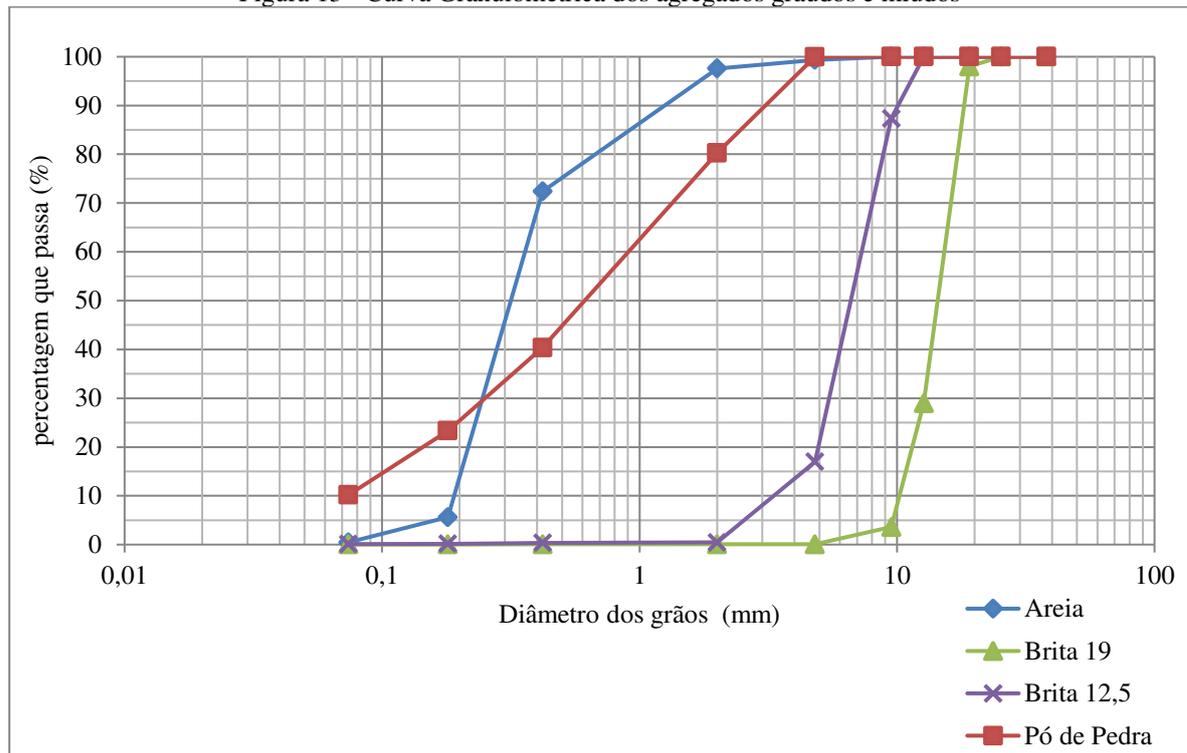
**Tabela 6 - Granulometria dos agregados graúdos e miúdos**

<b>Quantidade acumulada de material passante (%)</b>					
<b>Peneira</b>	<b>Peneira (mm)</b>	<b>Brita 19</b>	<b>Brita 12,5</b>	<b>Areia</b>	<b>Pó de pedra</b>
<b>1 ½"</b>	38,1	100,00	100,00	100	100,00
<b>1"</b>	25,4	100,00	100,00	100	100,00
<b>¾"</b>	19,1	98,02	100,00	100	100,00
<b>½"</b>	12,7	28,98	100,00	100	100,00
<b>3/8"</b>	9,5	3,59	87,34	100	100,00
<b>N° 4</b>	4,8	0,08	16,98	99,36	99,98
<b>N° 10</b>	2	0,06	0,46	97,58	80,28
<b>N° 40</b>	0,42	0,05	0,34	72,38	40,37
<b>N° 80</b>	0,18	0,04	0,16	5,61	23,33
<b>N° 200</b>	0,074	0,02	0,10	0,46	10,16

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

A Tabela 6, apresenta o resumo dos dados relativos a granulometria dos materiais. Assim, tornou-se possível elaborar a curva granulométrica (Figura 13).

Figura 13 - Curva Granulométrica dos agregados graúdos e miúdos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

### 3.3.3 Massa Específica e Absorção

Seguindo a norma do DNIT – ME 081/98 efetuaram-se os ensaios relativos a massa específica e absorção dos agregados graúdos – britas 19 e 12,5mm – onde foram separadas amostras com 3000g e 2000g, respectivamente. Após separadas, lavou-se os material com o intuito de retirar impurezas e demais detritos presentes na amostra. Em seguida, deixou a amostra secar num intervalo de 4 horas em estufa a 110°C. Concluindo o tempo, retirou-se a amostra e esperou o resfriamento em condições de temperatura ambiente, logo depois submergiu-se cada amostra em água a temperatura ambiente num intervalo de 24 horas. Passado o tempo de 1 dia, retirou-se ambas as amostras, para secar superficialmente e verificar a massa saturada com superfície seca, logo após verificou-se a massa submersa das amostras. Dado todo o procedimento para obtenção das massas, levaram-se as duas amostras a estufa, no intervalo de 4 horas, e temperatura igual ao dia anterior, para retirada total da umidade, esperou resfriar e por fim verificar a massa seca dos agregados. Desta forma, obteve-se a massa específica aparente e a absorção dos agregados.

Para os agregados miúdos, utilizou-se a norma NM 52/2009 que regula a determinação da massa específica de agregados miúdos, e, a norma NM 30/2001 que regula a absorção deste material. Assim, separaram-se duas amostras de 500g de pó de pedra, retido na peneira

0,074mm, estas foram submersos em água em temperatura ambiente, e descasaram num intervalo de 24 horas. Após o tempo determinado, retirou-se o material, dispôs-se em local plano e iniciou a secagem com auxílio de corrente de ar mecanizada, aferindo que estes estejam completamente soltos ao final.

Em seguida, utilizando um molde tronco-cônico colocou o agregado e de forma suave, auxiliando na compactação, efetuaram-se 25 golpes com auxílio de uma haste, verificando a saturação com superfície seca. Ao retirar o molde, o material conservou o formato do molde, necessitando então de uma nova secagem até atingir a situação de saturado superfície seca, com o desmorrimento do material quando desformado.

Quando seco, pesou-se 500g do material e com auxílio do picnômetro obteve-se a massa do conjunto, acrescentando água destilada, cobrindo a superfície da amostra, respeitou-se o intervalo de 1 hora, com temperatura de 21°C, até completar o picnômetro com água e obter a massa do picnômetro com a amostra e a água. Retirou-se então a amostra e levou a estufa a 105°C com possíveis oscilações de 5° para mais ou menos, alcançando a constância da massa, e obtendo o resultado da massa específica aparente do agregado miúdo.

O resumo dos resultados de caracterização física se encontram na Tabela 7 e de forma discriminada encontram-se os dados desta etapa em anexo no fim do trabalho.

**Tabela 7 – Massa Específica real e aparente, e absorção dos agregados graúdos e miúdos**

<b>Agregado</b>	<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>
<b>Brita 19mm</b>	2,77	2,74	0,39
<b>Brita 12,5mm</b>	2,78	2,73	0,6
<b>Pó de pedra</b>	2,70	2,56	0,36
<b>Areia</b>	2,50	2,38	0,26

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

Os valores obtidos nesta etapa da pesquisa tornam-se satisfatórios quando analisados perante as referências existentes destes materiais (CARVALHO, 2018; GAMA, 2013; GUERRA, 2019; SALES, 2015).

### **3.3.4 Abrasão Los Angeles**

Regido pela norma do DNIT – ME 035/98, o ensaio de abrasão Los Angeles consiste em definir a quantidade de material que será deteriorado quando submetido a ação de choque e desgastes. Desta forma, separou-se um amostra de brita 19mm, como referência entre todos os

materiais, e dispôs no tambor metálico até alcançar 500 ou 1000 rotações por minuto de acordo com a faixa granulométrica. Assim, peneirou-se o material na peneira 1,7mm, analisando a quantidade de material passante em relação ao total separado na amostra.

Sabendo que a norma do DNIT – 031/2006 ES recomenda que o valor de abrasão deve ser de até no máximo 50%, observou-se um valor satisfatório para sequência da pesquisa. Este valor e os dados relativos à execução do ensaio, encontram-se disposto à seguir (Tabelas 8 e 9).

**Tabela 8** – Dados para realização do ensaio de Abrasão Los Angeles

<b>Dados do Ensaio de Abrasão</b>	
Diâmetro do Tambor Metálico	80 cm
Velocidade	30 a 33 rpm
Materiais acrescidos: Bolas de Aço	12 unid

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

**Tabela 9** – Resultado obtido no ensaio de Abrasão Los Angeles

<b>Abrasão Los Angeles</b>	
Massa total da amostra seca, g (Antes do ensaio)	5000
Massa total da amostra lavada e seca, g (Após ensaio)	3949,5
Abrasão	21,01%

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2021).

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE – CAP 50/70

Para realizar o processo de dosagem SUPERPAVE de uma mistura asfáltica que atenda aos requisitos de desempenho previstos, faz-se necessário conhecer as características físicas do ligante dispostos na mistura. Desta forma, dispõe-se a seguir os ensaios realizados nesta fase.

#### 3.4.1 Definição do Teor de Aditivo

A adição do aditivo no ligante asfáltico busca conseguir melhores resultados de adesividade e trabalhabilidade do material. Nesta perspectiva, deve-se analisar o tipo de aditivo a ser incorporado na mistura e o teor que será utilizado na mesma. Assim, para a realização desta pesquisa utilizou-se como base de referência bibliográfias que analisaram teores de 1, 2 e 3% de incorporação do aditivo. Carvalho (2018) concluiu em sua pesquisa que o teor de 2% de óleo de girassol apresentou o melhor resultado nos parâmetros volumétricos e mecânicos quando comparados a referências de critérios dispostos pelas normas reguladoras.

Ribeiro (2011) apontou em sua análise com líquido obtido da castanha de caju um teor eficiente de 2%, dentre os valores de 0,5 à 2,0%. Assim como Silva (2016) que estudou a incorporação de teores de 1,0 a 2,5%, obtendo resultados satisfatórios nos valores anteriormente apresentados. Para tal, analisando estes resultados optou-se pelo uso do óleo de girassol em teor de 2%. Visando, então, reduzir a viscosidade do ligante e diminuir a temperatura da mistura e da compactação.

### **3.4.2 Adição do Óleo de Girassol ao Ligante**

Para realizar a análise da adição do óleo de girassol no ligante asfáltico, observou-se os resultados de caracterização do CAP 50/70 modificado com o aditivo antes e depois do ensaio de RTFO, responsável pelo envelhecimento, como apresentado no fluxograma na figura 11, exposto anteriormente.

Assim, separou-se em um recipiente a quantidade necessária para a mistura e, acresceu-se manualmente o teor de 2% do óleo de girassol ao ligante, gerando uma mistura modificada.

### **3.4.3 Ensaio de Penetração**

Regido pela norma do DNIT 155/2010 - ME, o ensaio de penetração consiste em definir o tipo de material asfáltico sólido ou semi-sólido através da profundidade obtida em décimos de milímetro pela penetração de uma agulha. Assim, dispõe-se uma amostra do ligante utilizado no trabalho, CAP 50/70, imediatamente abaixo da agulha com carga fixa de 100g, e analisa num intervalo de 5 segundos a distância que ela irá ocupar quando penetrar o material numa temperatura ambiente em cerca de 25° C. Utilizando o penetrômetro (Figura 14), o ensaio foi realizado outras vezes, em outras partes do ligante, para garantir que o resultado obtido seja fiel à condição da amostra.

Figura 14 - Penetrômetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O ensaio foi realizado nas condições do ligante puro e depois repetiu-se com o ligante modificado com a adição do óleo de girassol.

#### **3.4.4 Ponto de Amolecimento**

Regido pela norma do DNIT 131/2010 - ME, o ensaio de ponto de amolecimento consiste em definir a temperatura exata no momento em que o ligante encosta a placa inferior, determinando então o ponto de amolecimento do CAP 50/70 na faixa de temperatura entre 30°C e 175°C. Desta forma, dispõe-se uma amostra do material em anéis de latão com bolas de metal acima, esse conjunto é colocado dentro de um béquer que se encontra preenchido com água destilada, e na aparelhagem responsável por esquentar o conjunto, assim, com auxílio de um termômetro observa-se o ponto de amolecimento do ligante asfáltico. A disposição dos materiais é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Materiais utilizados no ensaio de ponto de amolecimento



Fonte: Contenco (2021)<sup>6</sup>.

O ensaio foi realizado nas condições do ligante puro e depois repetiu-se com o ligante modificado com a adição do óleo de girassol.

### 3.4.5 Viscosidade Rotacional

Regido pela norma da NBR 15184/2007, o ensaio de viscosidade rotacional consiste em definir as propriedades reológicas do ligante, medindo a resistência do material ao fluxo ocasionado pela força de atrito no momento da rotação. Assim, utilizando o viscosímetro *Brookfield* (Figura 16), dispõe-se uma amostra de ligante com cerca de 8 gramas no equipamento, e gera uma rotação com o spindle imerso na amostra com velocidades de 20, 50 e 100 rotações por minuto, nas temperaturas de 135°C, 155°C e 170° C, esta temperatura é controlada através do THERMOSEL.

---

<sup>6</sup> Disponível em: <https://contenco.com.br/produto/ponto-de-amolecimento-de-material-betuminoso-anel-e-bola-e2-17/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

Figura 16 - Viscosímetro Rotacional (modelo DVI I)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O ensaio foi realizado nas condições do ligante puro e depois repetiu-se com o ligante modificado com a adição do óleo de girassol.

### 3.4.6 RTFO (Rolling Thin-Film Oven)

Regido pela norma ASTM D2872/2019, o ensaio de Estufa de Filme Fino Rotativo consiste em determinar o efeito do calor e do ar quando aplicados em uma película delgada rotacional de um ligante asfáltico no estado semi-sólido. Desta forma, o calor e o ar realizam a oxidação e a evaporação do material asfáltico ocasionando o seu envelhecimento, sendo uma forma de analisar o que acontece nas rodovias através do ensaio.

Para executá-lo, dispõe-se 35 gramas do CAP 50/70 em um recipiente de vidro, especialmente moldado para este ensaio, introduz um bastão metálico para então levar as amostras até o aparelho que realiza o envelhecimento, assim, num intervalo de 85 minutos com temperatura na faixa de 163° C realiza-se o ensaio com injeções de ar que controlam o efeito do envelhecimento. A Figura 17 mostra um modelo de equipamento de RTFO.

Figura 17 - Máquina de RTFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tendo a massa inicial das amostras de CAP 50/70, ligante utilizado na pesquisa, faz-se a pesagem após o tempo determinado no ensaio de todas as amostras utilizadas com o intuito de obter a variação de massa mediante o processo de envelhecimento em laboratório, determinando assim a volatilidade do material asfáltico.

Para isso utilizou-se a seguinte equação (Equação 1), que apresenta o resultado de massa após a realização do teste.

$$\Delta M = \left( \frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Na qual:

- a)  $\Delta M$  = variação de massa (%);
- b)  $M_i$  = massa inicial da amostra (g);
- c)  $M_f$  = massa final da amostra (g).

Afere-se ainda que, com o processo de envelhecimento do ligante puro e modificado, repetiu-se os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, dispostos anteriormente, de forma a observar a influência da oxidação e evaporação no ligante asfáltico. Com a repetição do ensaio de penetração, deve-se calcular a sensibilidade do material através da penetração retida (Equação 2).

$$P_{ret} = \frac{P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Na qual:

- a)  $P_{ret}$  = Penetração retida (%);
- b)  $P_i$  = Penetração inicial (mm);
- c)  $P_f$  = Penetração final (mm).

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL RECICLADO

Compreendendo que, a produção de um revestimento asfáltico é realizada mediante uma mistura, o material reciclado, quando fresado, permanece com os componentes utilizados na mistura. Para tal, faz-se necessário a caracterização física do RAP.

#### 3.5.1 Agregados e Ligante

Seguindo o mesmo procedimento de caracterização dos agregados virgens, utilizou-se como base a norma reguladora DNIT – ME 083/98, realizou-se o ensaio de análise granulométrica do material fresado por peneiramento, as peneiras de malhas utilizadas possuíam as seguintes aberturas: 0,075m, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm.

Num intervalo de 4 horas, colocou-se o material na estufa aquecida a 110°C, para remover toda a umidade existente, em seguida realizou-se o peneiramento de forma manual. Para realizar o peneiramento, dividiu-se a massa total em faixas de tamanhos de grãos, e assim, pôde exprimir a massa de cada faixa em porcentagem da massa total.

Realizado o peneiramento, temos a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos (Tabela 10).

**Tabela 10 - Granulometria do RAP com ligante**

<b>RAP com ligante</b>					
Peneira	Material Retido			% passante	peneira (mm)
	Peso (g)	% retida	% retida acumulada		
1 ½"		0	0	100,00	38,1
1"	1107,95	11,08	11,08	88,92	25,4
¾"	1001,20	10,01	21,09	78,91	19,1
½"	1460,51	14,61	35,70	64,30	12,7
3/8"	986,90	9,87	45,57	54,43	9,5
Nº 4	2129,68	21,30	66,86	33,14	4,8
Nº 10	1479,23	14,79	81,65	18,35	2,0
Nº 40	1186,30	11,86	93,52	6,48	0,42
Nº 80	364,06	3,64	97,16	2,84	0,18
Nº 200	159,72	1,60	98,76	1,24	0,074
Fíler	84,36	0,84	99,60	0,40	

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

Com o intuito de analisar a quantidade de ligante presente no material reciclado realizou-se a extração do mesmo com o auxílio do Rotarex. Em seguida, realizou-se a caracterização do CAP, para analisar os seus parâmetros físicos, repetindo os ensaios de penetração, amolecimento e viscosidade já explicados anteriormente. Os valores obtidos nesta caracterização estão dispostos na Tabela 11.

**Tabela 11 - Caracterização do Ligante extraído do RAP**

Ensaio		Resultados	Unidade
Penetração		5	* 0,1mm
Ponto de Amolecimento		81,5	°C
Viscosidade	100°C	7625	Pa.s
	140°C	2680	Pa.s
	170°C	615	Pa.s
	190°C	450	Pa.s

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

Desta forma, realizou-se a separação granulométrica do RAP sem o ligante para compor a curva fuller, sabendo o valor percentual de fresado e a sua granulometria obtém-se o teor de ligante na mistura, ajustando então o valor para cada percentual. Sabendo que a incorporação acima de 25% de RAP é considerada de alto teor, faz-se o estudo mecânico destas maiores incorporações buscando analisar sua viabilidade. Ao realizar a dosagem da nova mistura visando incorporar os valores de 30, 50 e 70% de RAP, observa-se o valor de ligante já existente no RAP, diminuindo o valor necessário para a nova mistura. Desta forma, tem-se os valores dispostos na Tabela 12.

**Tabela 12 - Granulometria do RAP sem ligante**

Peneira	Material Retido			% passante	peneira (mm)
	Peso (g)	% retida	% retida acumulda		
1 1/2"		0,00	0	100,00	38,1
1"		0,00	0	100,00	25,4
3/4"		0,00	0,00	100,00	19,1
1/2"	51,61	5,48	5,48	94,52	12,7
3/8"	67,33	7,14	12,62	87,38	9,5
Nº 4	187,16	19,86	32,48	67,52	4,8
Nº 10	181,57	19,26	51,74	48,26	2,0
Nº 40	202,25	21,46	73,20	26,80	0,42
Nº 80	115,19	12,22	85,42	14,58	0,18
Nº 200	75,85	8,05	93,47	6,53	0,074

Fíler	59,16	6,28	99,75	0,25	
-------	-------	------	-------	------	--

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tendo os resultados da análise granulométrica do RAP com ligante e após a extração de 5,6% deste da mistura reciclada, obtemos as curvas de fuller (Figura 18).

Figura 18 - Curva Granulométrica do RAP com e sem ligante



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

É possível observar semelhança no formato das curvas antes e após extração do ligante, que indica uniformidade na película de ligante sobre os agregados. Também é possível observar que não houve aumento significativo na quantidade de finos do material, mostrando que o processo utilizado para fresagem do pavimento não compromete a integridade do material de forma significativa.

Os resultados também mostram que, após a extração do ligante asfáltico, o material volta a se qualificar nos parâmetros de faixas granulométricas especificadas pela DNIT 031/2006 – ES, mais especificamente estando adequada para uso em camadas de rolamento.

### 3.6 DOSAGEM SUPERPAVE

Sobre os requisitos técnicos e de qualidade é apresentado que:

Os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico serão atendidos com um projeto adequado da estrutura do pavimento e com o projeto de dosagem da mistura asfáltica compatível com as outras camadas escolhidas. Essa dosagem passa pela escolha adequada de materiais dentro dos requisitos...? “...proporcionados de forma a resistirem às solicitações previstas do tráfego e do clima (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Seguindo ainda nos estudos de Bernucci *et al.* (2010), na Figura 19 é verificado o

fluxograma sobre os processos que devem ser seguidos para execução da dosagem SUPERPAVE.

Figura 19 - Fluxograma da dosagem SUPERPAVE

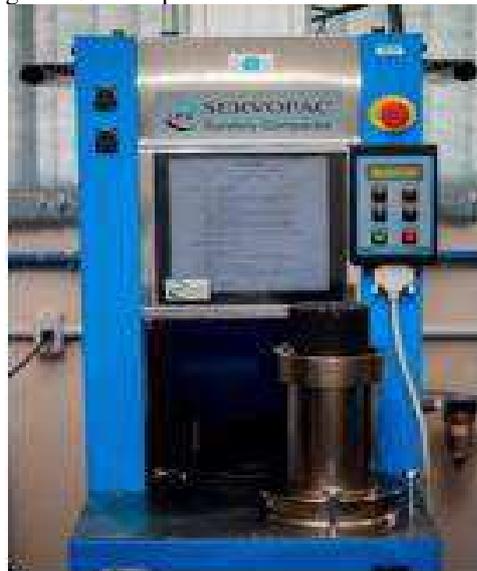


Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

### 3.6.1 Dosagem de Mistura com Agregados Virgens

Assim, seguindo as especificações da norma reguladora ASTM D 6925-09 – *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor* – compactaram-se os corpos de prova utilizando o CGS (Figura 20) que configura-se com diâmetro de 10 cm.

Figura 20 - Compactador Giratório SUPERPAVE



Fonte: Lepufcg (2021)<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Disponível em: <https://lepufcg.com.br/>. Acesso em: 14 abr. 2021.

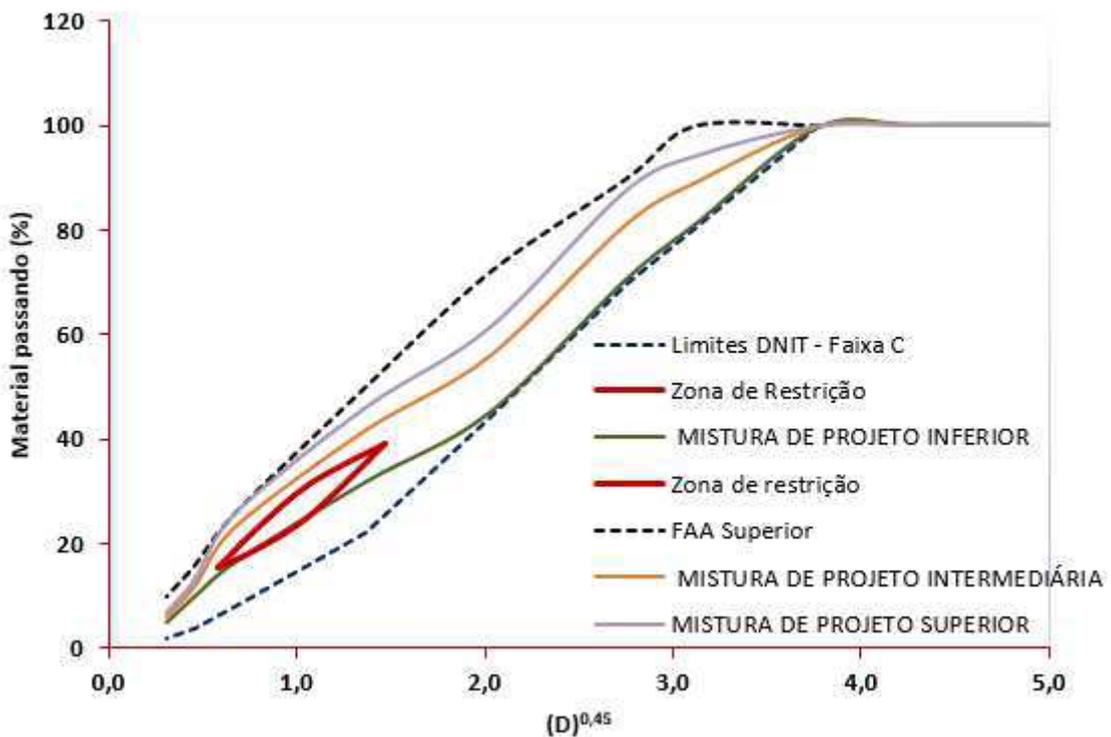
Desta forma, escolheram-se três composições granulométricas com agregados de diferentes dimensões. Dentro dos materiais caracterizados previamente, temos brita 19mm, brita 12,5, areia, pó de pedra e fíler. Na qual, respeitando a Faixa C de granulometria do DNIT dispuseram-se uma composição superior, uma intermediária e uma inferior (Tabela 13 e a Figura 21), salienta-se que a curva de Fuller inclui os conceitos de Ponto de Controle e a Zona de Restrição.

**Tabela 13** - Proporção dos agregados nas composições granulométricas

Curva	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Fíler
Inferior	26%	35%	0%	38%	1%
Intermediária	15%	35%	6%	42%	2%
Superior	8%	37%	7%	46%	2%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Figura 21 - Curvas de Fuller (Superior, Intermediária e Inferior)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

### 3.6.2 Rice Test

Regido pela norma da ASTM D2041, o Rice Test, também conhecido como Gmm determina a densidade máxima obtida na mistura asfáltica. O ensaio foi realizado de acordo

com a seguinte metodologia:

- 1) Após realizar a mistura, dispôs-se o material em uma bandeja para secagem em 24hrs;
- 2) Pesou-se 2500g do material e separou;
- 3) Utilizando um recipiente metálico com formato cônico e peso conhecido, despejou-se o material e preencheu até cobrir a amostra com água em temperatura ambiente (25°C);
- 4) Colocou-se no aparelho que realiza Rice Test (Figura 22), que gera no vácuo uma pressão de 30 mmHg;
- 5) A mistura deve permanecer no vácuo num intervalo de 15 minutos, com o intuito de retirar todos os vazios pertencentes;
- 6) Após o tempo estipulado, retira-se o recipiente cônico preenche o restante com água até o limite e cobre-se com uma placa de vidro de forma que não fique nenhum bolhar de ar, contabilizando vazios na amostra;
- 7) Com recipiente completamente preenchido, pesa-se o conjunto e separa-se o valor;

Dados os resultados de pesagem do procedimento disposto anteriormente, calcula-se o valor de Gmm através da Equação 3.

$$Gmm = \frac{M_s}{M_s - (M_r - M_c)} \quad \text{Equação 3}$$

Na qual:

- a)  $M_s$  = Massa da amostra seca (g);
- b)  $M_r$  = Massa do recipiente metálico imerso em água (g);
- c)  $M_c$  = Massa do recipiente preenchido com a amostra e água (g).

A Figura 22 mostra o aparelho de realizado do Rice Test.

Figura 22 - Aparelho de realização do Rice Test



Fonte: Elaboração do autor (2021).

### 3.6.3 Determinação do Teor do Ligante

Tendo os resultados da Massa Específica Real e Aparente dos agregados e do ligante e a Gmm, Massa Específica Máxima, da mistura, obtém-se o teor de ligante inicial para realização das dosagens dos corpos de prova. Para isso, observa-se a curva granulométrica inferior, superior e intermediária (Figura 21), utiliza-se a Equação 4, que relaciona a proporção dos agregados pelas características físicas, temos:

$$Pli = \left( \frac{Gl \times (Vla + Vle)}{Gl \times (Vla + Vle) + Mag} \right) \quad \text{Equação 4}$$

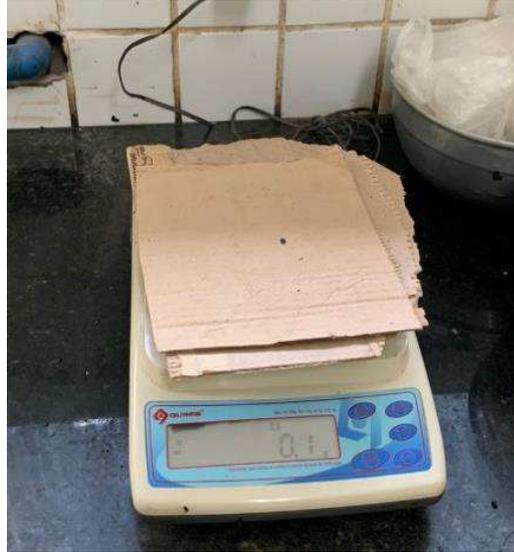
Na qual:

- a) Pli = Teor de ligante inicial (%);
- b) Gl = Massa específica do ligante (g/cm<sup>3</sup>);
- c) Vla = Volume de ligante absorvido (%);
- d) Vle = Volume de ligante efetivo (%);
- e) Mag = Massa do agregado (g).

### 3.6.4 Compactação dos corpos de prova sem incorporação do RAP

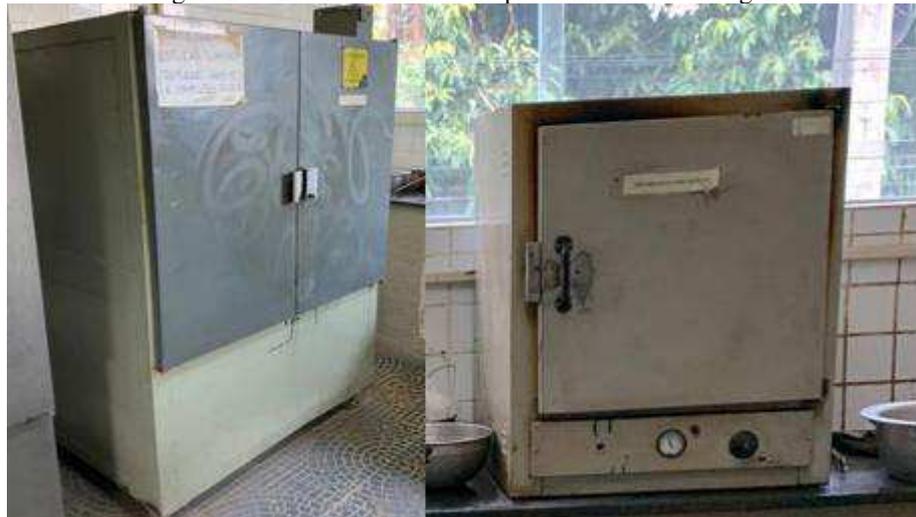
Para realização dos ensaios mecânicos, compactaram-se corpos de prova sem incorporar o material fresado de acordo com a metodologia SUPERPAVE. Assim, para realização da mistura asfáltica, primeiro pesou-se todos os agregados e ligante com o auxílio da balança analítica (Figura 23), estando o ligante dentro da estufa (Figura 24) destinada ao aquecimento deste com cerca de 153°C, ao realizar a mistura manual dos componentes, dispôs-se a mesma na estufa destinada ao aquecimento de misturas asfálticas (Figura 24) num intervalo de 2 horas com o intuito de envelhecê-la a curto prazo como definido por Bernucci *et al.* (2008).

Figura 23 - Balança Digital utilizada no procedimento de dosagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 24 - Estufas utilizadas no procedimento de dosagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em seguida, respeitando a norma da ASTM D 6925-09, colocou-se a mistura no CGS (Figura 20) e considerou o tráfego como sendo de médio a alto, o que caracterizou o valor de  $N_{inicial}$  de 8 giros,  $N_{projeto}$  de 100 giros e  $N_{máximo}$  = 160 giros, contudo, afere-se que o compactador giratório realizou o procedimento nos corpos de prova com 100 giros. Este último valor afere a condição do volume de vazios respeitando o valor de 4%, que auxilia na escolha do teor do ligante, enquanto os valores de 8 e 160 giros, sendo o inicial e o máximo respectivamente, garantem a análise da compactabilidade da mistura asfáltica. Dentre as condições de compactação no CGS, destacam-se além do valor de  $N_{projeto}$ , o ângulo de rotação de  $1,25^\circ$  e a pressão com cerca de 600 kPa.

Seguindo o fluxograma da Figura 11 apresentado por Bernucci *et al.* (2010), foram moldados 2 corpos de prova por mistura, com 5% de teor inicial do ligante. Tendo as 3 curvas e cada curva tendo Ni, Np e Nm, totalizaram-se 18 corpos de prova moldados para análise do volume de vazios e definição do teor inicial de ligante puto. Desta forma, apresenta-se de forma sucinta os resultados na Tabela 14.

**Tabela 14** - Parâmetros volumétricos resultados dos Teores de ligantes calculados inicialmente

Mistura	Ligante %	% Gmm N <sub>INICIAL</sub>	% Gmm N <sub>PROJETO</sub>	% Gmm N <sub>MÁXIMO</sub>	VAM (%)	Vv(%)
Inferior	5,0	87,38	94,53	96,06	14,31	5,70
Intermediária	5,0	85,91	94,30	95,44	13,11	5,47
Superior	5,0	86,48	92,96	93,77	13,70	7,04
Crítérios da dosagem	-	<89%	96%	<98%	13 mín	4%

Fonte: Elabora pelo autor (2021).

Observando os critérios de dosagem da metodologia SUPERPAVE, definiu-se a curva intermediária como sendo a curva de projeto, por possuir os parâmetros volumétricos mais próximos ao desejado. Em seguida, compactaram-se Corpos de Prova nos valores de 5,2; 5,7; 6,2; e 6,7% para a curva intermediária. Na Tabela 15 são observados os parâmetros volumétricos desta nova fase, que define o valor do teor de projeto utilizado para a incorporação do RAP e realização dos ensaios mecânicos.

**Tabela 15** - Parâmetros volumétricos obtidos com os teores testados para obter o teor de projeto

Teor de ligante %	%GMM N <sub>PROJETO</sub>	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)	Massa específica(G/CM <sup>3</sup> )
5,2	95,75	14,18	4,00	71,69	2,515
5,7	97,91	13,18	2,09	70,49	2,498
6,2	98,92	13,40	1,08	73,09	2,479
6,7	100,23	13,44	0,23	71,40	2,459
Crítérios da dosagem	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se então que o teor de 5,2% satisfaz o valor do volume de vazios de 4%, sendo o teor definido de projeto para incorporação do RAP e do modificador de viscosidade, o óleo de Girassol.

### 3.6.5 Dosagem de Mistura com Material Reciclado

Após a compactação dos corpos de prova apenas com materiais virgens para obtenção da curva de projeto, realizou-se a compactação incorporando o material reciclado. Essa incorporação foi feita em valores de 30, 50 e 70% de RAP na mistura asfáltica. Assim, seguiu-se a metodologia SUPERPAVE para a compactação como já explicada anteriormente, de modo que a dosagem agora conta com a presença do fresado o que diminui a quantidade de agregados virgens e ligante utilizado na mistura.

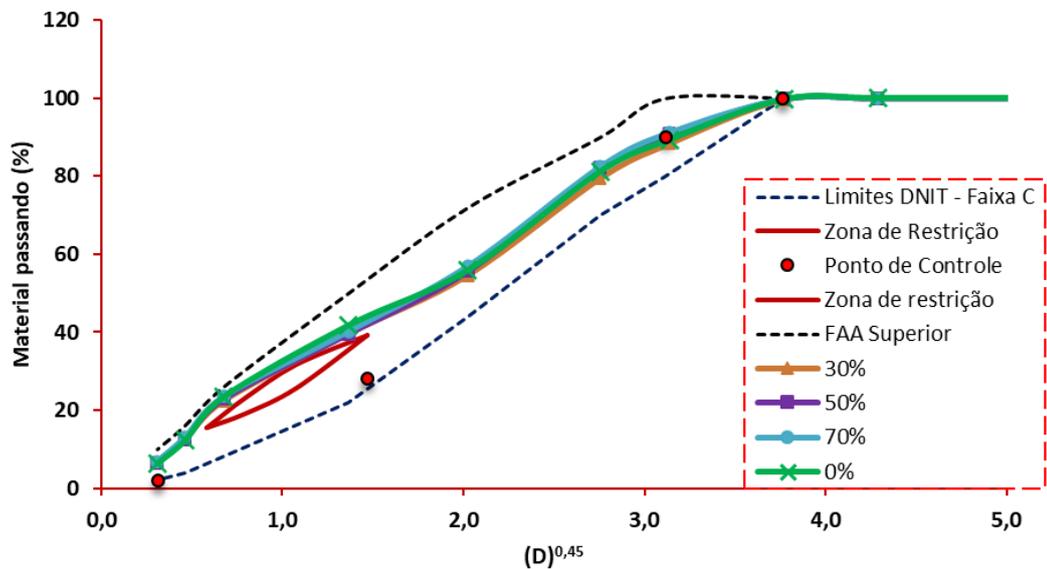
Assim, com a caracterização do RAP, calculou-se as quantidades de agregados utilizados na nova mistura, de acordo com a quantidade de fresado a ser acrescido (Tabela 16), analisando a curva granulométrica (Figura 25).

**Tabela 16** - Proporção de agregados nas granulometria das misturas recicladas

RAP	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Fíler
30%	14%	26%	3%	25%	2%
50%	9%	23%	3%	13%	2%
70%	7%	16%	2%	3%	2%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 25 - Curvas de Fuller das misturas recicladas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Dadas as proporções de cada material na mistura incorporado com o reciclado, tendo como referência o valor de teor de projeto de 5,2%, compactaram-se mais 6 corpos de prova, pontuando que cada teor é moldado em duplicada como recomendado pelo método SUPERPAVE, para obtenção dos volumes de vazios. Observando que para os ensaios de MR

e RT eles devem se encontrar próximos ao valor de 4% (Tabela 17).

**Tabela 17 - Teor de projeto correspondente às misturas utilizadas na pesquisa**

<b>Mistura</b>	<b>Teor de projeto de CAP virgem (%)</b>	<b>%GMM</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>VV (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</b>
0% RAP(ref)	5,2	95,75	14,18	4,0%	71,69	2,515
30% RAP	3,62	95,72	14,43	4,1%	72,14	2,513
50% RAP	2,50	95,07	16,72	4,1%	75,00	2,457
70%RAP	1,38	95,12	16,68	4,2%	75,00	2,455
<b>Crítérios da dosagem</b>	-	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

Assim, com os volumes de vazios satisfazendo a condição do critério de dosagem, compactaram-se os corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos de acordo com o valor do teor de projeto com a incorporação do rap nas porcentagens de 30, 50 e 70.

### 3.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Realizada a dosagem com ligante puro e a mistura asfáltica com o ligante modificado com a adição do óleo de girassol, realizaram-se ensaios mecânicos com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas após a mistura. Os ensaios desta etapa são: MR (Módulo de Resiliência), RT (Resistência à Tração) e Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado).

#### 3.7.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

Regido pela norma 16018/2011, o ensaio de Módulo de Resiliência consiste em caracterizar a deformação das misturas asfálticas quando na presença de solicitações. Bezerra Neto (2003) apud Costa (2017) apresenta em seu estudo que a deformação considerada recuperável ou elástica, na qual quando submetido a uma carga repetida não há deformação permanente é considerada como sendo a deformação resiliente. Desta forma realiza-se este ensaio buscando conhecer o valor do módulo de resiliência da mistura asfáltica. Para isso, tendo os corpos de prova compactados, utiliza-se a Prensa Hidráulica UTM – 25 (Figura 26) para obter o módulo de resiliência instantâneo.

Com o auxílio do aparelho de MR<sub>1</sub>, dispõe-se o CP no plano diametral vertical, para

receber pulsos de carga com duração de 1 segundo e intervalo de 9 segundos com frequência de 1 Hz, gerando no plano transversal da carga uma tensão de tração. Dada a condição da carga faz-se a medição do deslocamento diametral recuperável através do LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), seguindo a direção da tensão.

Para a execução do ensaio e obtenção do resultado que satisfaça a realidade da mistura, realizou-se o teste com 3 corpos de prova, obtendo o valor de resistência à tração em MPa.

Figura 26- Prensa Hidráulica UTM – 25



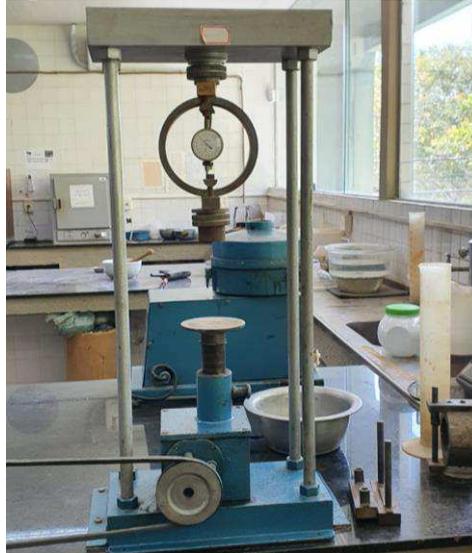
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 3.7.2 Ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

Regido pela norma do DNIT 138/1994 – ME, o ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral consiste em determinar o valor de resistência de corpos de prova, de misturas betuminosas, em formato cilíndrico quando exposto a carregamentos de compressão diametral.

Assim, com os CPs compactados do CGS (Figura 20), de misturas asfálticas modificada com 2% óleo de girassol e incorporada com teores de 30, 50 e 70% de RAP, realizou-se o ensaio na Prensa Mecânica (Figura 27).

Figura 27 - Prensa Mecânica (Ensaio de RT)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Moldados os corpos de prova, as dimensões devem respeitar a altura de 3,5 à 6,5 cm e diâmetro de  $10\text{cm} \pm 0,2\text{cm}$ , assim coloca-se o CP no prato da prensa em posição horizontal, de forma que a carga distribuída nas geratrizes do corpo sejam aplicadas pelos frisos metálicos com comprimento igual ao CP. Com o ajuste completo, libera-se a carga de forma progressiva com velocidade na faixa de  $0,8 \pm 0,1\text{mm/s}$ , até o momento da ruptura em duas partes no plano diametral vertical.

Com o valor da carga de ruptura  $F$ , calcula-se a resistência à tração pela Equação 5.

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad \text{Equação 5}$$

Na qual:

- a)  $\sigma_R$  = Resistência à tração (Kgf/cm<sup>2</sup>);
- b)  $F$  = Carga de ruptura (Kgf);
- c)  $D$  = Diâmetro do corpo de prova (cm);
- d)  $H$  = Altura do corpo de prova (cm).

### 3.7.3 Ensaio de Lottman Modificado

Regido pela norma do DNIT 180/2018 - ME, o ensaio de Lottman modificado consiste em avaliar a influência da água que age com efeito deletério em misturas asfálticas compactadas quando submetidas a carga na prensa mecânica. Respeitando a metodologia imposta pela norma do ensaio de umidade induzida, em que o volume de vazios deve ser de  $7 \pm 1\%$ , compactam-se CPs para testar o volume de vazios, e então seguir com o experimento laboratorial.

Para realização do ensaio, compactaram-se os corpos de prova em duplicata para a condição de CPs não condicionados a umidade e CPs condicionados a umidade. Assim, para os corpos condicionados foram colocados em um recipiente com água destilada, para aplicação do vácuo, num intervalo de 10 minutos com pressão variando entre 250 e 650mmHg. Concluída essa etapa, deixaram-se os corpos de prova ainda submersos por mais 10 minutos, porém em condição de pressão atmosférica, sem o vácuo. Em seguida, levaram-se os corpos até a geladeira, estando em sacos plásticos com acréscimo de 10ml de água, sendo vedados e congelados a  $-18^{\circ}\text{C}$  por 16 horas. Dado o congelamento dos corpos, após as 16 horas, estes foram imersos em um recipiente com água a  $60^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas, até então ser retirado e deixado resfriar em água com temperatura ambiente (Figura 28).

Figura 28- Corpos de prova submersos em temperatura ambiente para o ensaio de Lottman



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Finalizada a fase de condicionamento por umidade aos corpos de prova, buscando alcançar o efeito destrutivo dos danos causados pela água, realizou-se o ensaio de resistência à tração na prensa mecânica (Figura 27) para os corpos condicionados e não condicionados. O esquema dos corpos e suas condições está disposto na Tabela 18.

**Tabela 18** - Corpos de prova condicionado e não condicionados de acordo com a condição da mistura

	Condicionados		Não Condicionados	
	0% I	0% II	0% I	0% II
<b>CAP Puro</b>	30% I	30% II	30% I	30% II
	50% I	50% II	50% I	50% II
	70% I	70% II	70% I	70% II
	0% I	0% II	0% I	0% II
<b>CAP Modificado com Óleo de Girassol</b>	30% I	30% II	30% I	30% II
	50% I	50% II	50% I	50% II
	70% I	70% II	70% I	70% II
	0% I	0% II	0% I	0% II

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Relembrando que este trabalho analisa a incorporação de 30, 50 e 70% de RAP, realizou-se o ensaio para as condições da mistura virgem e a mistura com material reciclado na condição de CAP puro e CAP modificado como exposto acima. Desta forma, com os resultados obtidos no ensaio, obtem-se a Resistência à Tração Retida por umidade induzida, dada pela Equação 6.

Equação 6

$$RRT = \frac{RTu}{RT} \times 100$$

Na qual:

- a) RRT = Resistência à tração por umidade induzida (MPa);
- b) RTu = Resistência à tração das amostras condicionadas (MPa);
- c) RT = Resistência à tração das amostras não condicionadas (MPa).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo expõe e discute os resultados obtidos mediante a realização dos experimentos laboratoriais. Com a caracterização do ligante CAP 50/70 puro e modificado com o teor de 2% de óleo de girassol, e, a incorporação do RAP nos teores de 30, 50 e 70% para realização de novas misturas com material reciclado e sua caracterização mecânica.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

#### 4.1.1 Perda de massa do CAP causada pelo ensaio de RTFO

##### 4.1.1.1 Amostra de CAP Puro

A caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70, definido para o projeto, contou com a realização dos ensaios antes e depois de RTFO, para analisar o processo de envelhecimento do material quando submetido a evaporação e oxidação. Este envelhecimento, foi avaliado em 4 amostras do ligante puro e estão dispostos na Tabela 19.

**Tabela 19** - Resultado da massa da amostra de CAP Puro antes e depois de RTFO

CAP PURO				
RTFO				
CAP Puro	Antes do RTFO	Após RTFO	Perda de massa	
	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	(%)
Amostra 1	213,77	2013,62	0,15	0,07 %
Amostra 2	2018,46	2018,3	0,16	0,07 %
Amostra 3	2019,09	2018,92	0,16	0,07 %
Amostra 4	2019,03	2018,95	0,08	0,03 %

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

##### 4.1.1.2 Amostra de CAP Modificado

Após caracterizar o ligante puro, adicionou o teor de 2% de óleo de girassol, e contou com a realização dos ensaios antes e depois de RTFO, para analisar o processo de envelhecimento do material modificado quando submetido a evaporação e oxidação. Este envelhecimento, foi avaliado em 4 amostras do ligante puro e estão dispostos na Tabela 20.

**Tabela 20** - Resultado da massa da amostra de CAP modificado antes e depois de RTFO

<b>CAP + 2% DE ÓLEO DE GIRASSOL</b>				
<b>RTFO</b>				
CAP PURO	ANTES DO RTFO	APÓS RTFO	PERDA DE MASSA	
	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	(%)
Amostra 1	219,67	219,4	0,27	0,12%
Amostra 2	218,34	218,13	0,21	0,09%
Amostra 3	214,77	214,57	0,20	0,09%
Amostra 4	217,42	217,21	0,21	0,09%

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

De acordo com a norma do DNIT 095/2006 - EM, no quadro de especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo, para o CAP 50/70, classificação por penetração do ligante, o valor máximo de variação da massa antes e depois do envelhecimento deve ser de 5%. Assim, observa-se que as 8 amostras apresentadas acima, 4 puras e 4 modificadas, estão dentro dos padrões normativos com variação máxima encontrada de 0,12%.

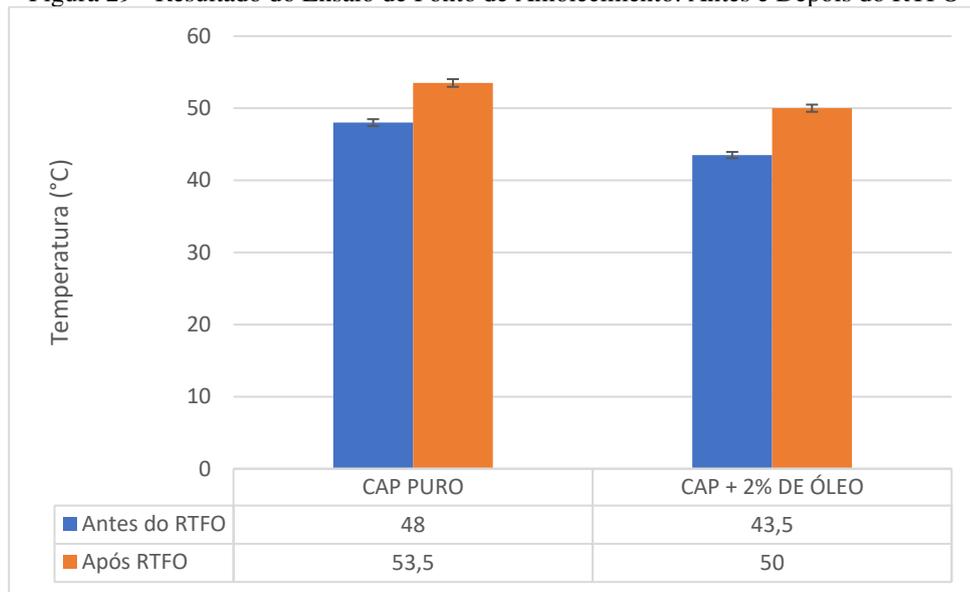
## 4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE PURO E MODIFICADO

### 4.2.1 Ensaio de Ponto de Amolecimento

A tabela de especificações do CAP apresentada pela norma do DNIT 095/2006 - ME, expõe que para o CAP de classificação 50/70, a temperatura do ligante deve ser de 46°C mínimos. Esta temperatura influencia na resistência à deformação permanente, visto que quanto maior o ponto de amolecimento maior será a resistência a deformação (FEITOSA, 2015).

Os resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento (Figura 29) nos mostram que a adição do óleo de girassol a mistura permite uma redução na temperatura de amolecimento do ligante em relação ao ligante convencional (CAP 50/70). Também é possível notar redução de aproximadamente 10% na temperatura quando há incorporação do óleo de girassol ao ligante, antes da amostra ser submetida ao RTFO, e redução de 6,5% na temperatura após RTFO. Esta diferença ocorre, pois, o RTFO é utilizado para simular o envelhecimento do ligante após a usinagem.

Figura 29 - Resultado do Ensaio de Ponto de Amolecimento: Antes e Depois do RTFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A redução na temperatura ocasionada pela adição do teor de 2% de óleo de girassol implica que a rigidez do ligante diminui, contudo, visando a trabalhabilidade e necessidade de diminuição da viscosidade do CAP 50/70, pontua-se o acréscimo do aditivo como sendo positivo, quando se busca produzir uma Mistura Asfáltica Morna.

No trabalho publicado por Lucena *et al.* (2015) a avaliação do CAP 50/70 modificado com óleo de moringa, apresenta uma diminuição de 4°C, em que o CAP puro atingiu a temperatura máxima em 50,7°C e quando adicionado 2% de óleo de moringa, a temperatura caiu para 46,7° C.

Moraes (2018) analisou o ponto de amolecimento antes e depois do ensaio de RTFO, com a adição de cera de carnaúba no ligante asfáltico, seus resultados apontaram que a medida que se aumenta os teores do aditivo orgânico o ponto de amolecimento da mistura decresce, tornando-se satisfeito para a pesquisa.

Guerra (2019) obteve redução na temperatura do ponto de amolecimento quando incorporou óleo de canola no ligante asfáltico, na qual, observou maior redução no teor de 3% de óleo de canola, sendo ela de 2,7°C antes do RTFO e 5°C depois do RTFO.

A resolução da ANP n°19 de 2005 determina que o aumento na temperatura de ponto de amolecimento para CAP 50/70 deve ser de, no máximo, 8°C. Desta forma, vê-se que a incorporação do óleo de girassol ao ligante se adequa aos valores estabelecidos. Conclui-se que a oxidação e volatilização ocasionadas pelo RTFO aumentam a temperatura de amolecimento devido o aumento da rigidez do ligante, porém os valores encontrados para o CAP puro e modificado encontram-se dentro do valor determinado (Tabela 21).

**Tabela 21** - Aumento de temperatura após ensaio de RTFO

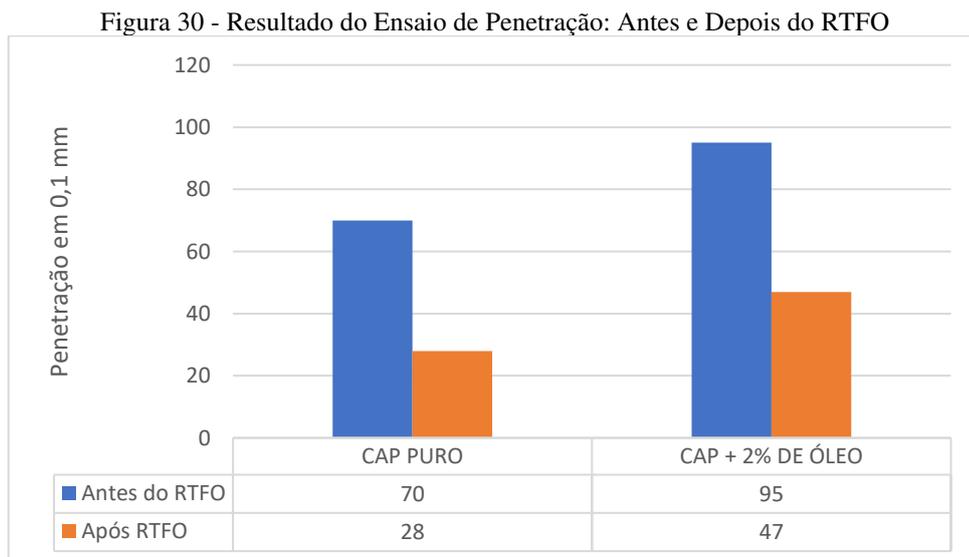
Amostras (Após RTFO)	Aumento de Temperatura
CAP Puro	5,5°C
CAP + 2% de Óleo de Girassol	6,5°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 4.2.2 Ensaio de Penetração

O CAP 50/70 utilizado na pesquisa possui essa nomenclatura devido a caracterização de penetração em décimos de milímetro no ligante. Desta forma, observando o resultado obtido no ensaio ele condiz com a sua classificação. Observa-se ainda que, quando acrescido o teor de 2% de óleo de girassol, o valor da penetração aumenta para 95 décimos de milímetro, esse aumento se dá pela modificação da viscosidade do ligante, que diminui e torna-o menos consistente.

Os resultados obtidos mostram que o processo de envelhecimento simulado pelo ensaio de RTFO torna o ligante mais rígido. Os valores apresentados na Figura 30 mostram que a penetração diminui 40% quando o CAP puro é submetido ao ensaio de RTFO, e 50% quando o CAP com óleo de girassol incorporado é submetido ao mesmo processo. Estes 10% de diferença mostram que a modificação do ligante asfáltico com óleo de girassol provoca uma redução na rigidez observada após usinagem de misturas asfálticas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ainda observando o estudo de Lucena *et al.* (2015), a penetração do CAP puro resultou em 56,6 décimos de milímetro, enquanto quando modificado com teores de 0,5% a 3% de óleo

de moringa os valores de penetração aumentaram gradativamente até 99,4 décimos de milímetro para o maior teor.

Souza (2012) estudou a incorporação de teores de óleo de mamona, em sua pesquisa, e observou que o CAP puro não apresenta significativa variação de penetração de acordo com a classificação, 50/70, porém com o acréscimo dos teores do aditivo houve aumento significativo na penetração da agulha.

Guerra (2019) incorporou óleo de canola no CAP 50/70 e obteve um aumento da penetração ocasionada por essa adição antes e depois do envelhecimento. Assemelhando-se ao resultado desta pesquisa, visto que a utilização do óleo de canola, aditivo orgânico assim como o óleo de girassol, altera a viscosidade do ligante tornando-o menos consistente.

Os aumentos nos valores de penetração apresentados nesta pesquisa apresentam validade nos resultados quando fundamentados nos estudos dispostos anteriormente, estando de acordo com a classificação do ligante asfáltico e apresentando resultados de determinação da consistência. Contudo, sabendo que a norma do DNIT 095/2006 – ME especifica que a penetração retida deve ser mínima de 55%, a tabela 22 apresenta que os valores obtidos não respeitam a condição da norma, em que o envelhecimento RTFO é avaliado através do parâmetro de porcentagem de penetração retida – PPR – que avalia a sensibilidade aos fatores que causam envelhecimento, ainda assim, sabendo que quanto maior o parâmetro maior a resistência do ligante à oxidação, observa-se o melhoramento desta propriedade causada pela adição do óleo de girassol.

**Tabela 22** - Penetração retida após o ensaio de RTFO

<b>Amostra</b>	<b>Penetração Retida (%)</b>
Cap Puro	40,00
Cap + 2% de Óleo de Girassol	49,47

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

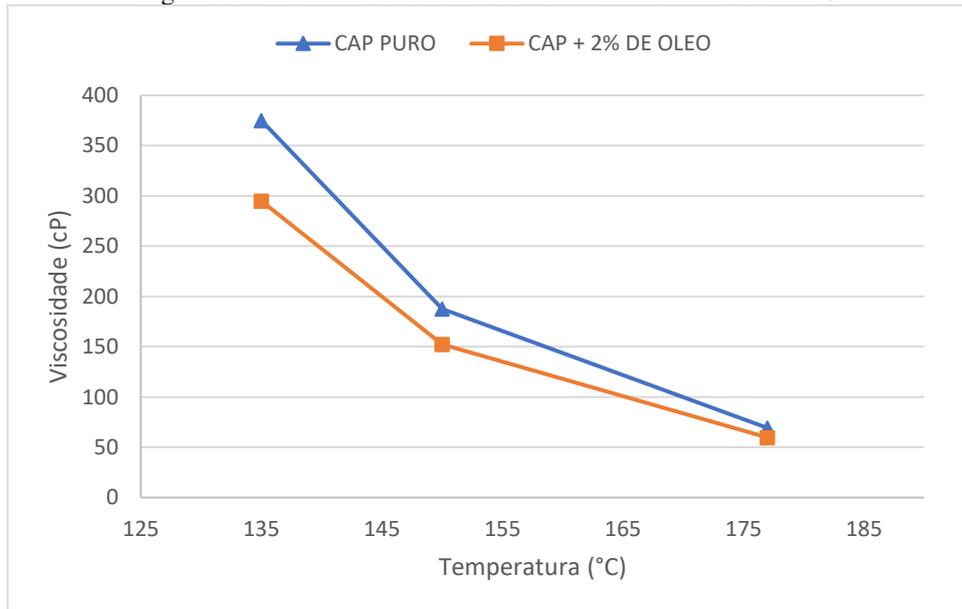
### 4.2.3 Ensaio de Viscosidade

Os valores a seguir apresentados na Figura 31 e Figura 32, representam as curvas de viscosidade rotacional para as amostras de CAP 50/70 puro e com adição de 2% de óleo de girassol, antes e após serem submetidas ao ensaio RTFO. As especificações da norma do DNIT 095/2006 – ME para o ligante asfáltico com classificação 50/70, expõe os valores mínimos que devem ser obtidos no ensaio de viscosidade rotacional para as 3 temperaturas. Assim, temos que os valores obtidos no pesquisa laboratorial se encontram acima da faixa limite.

A partir dos resultados apresentados nas curvas, é possível observar que a incorporação

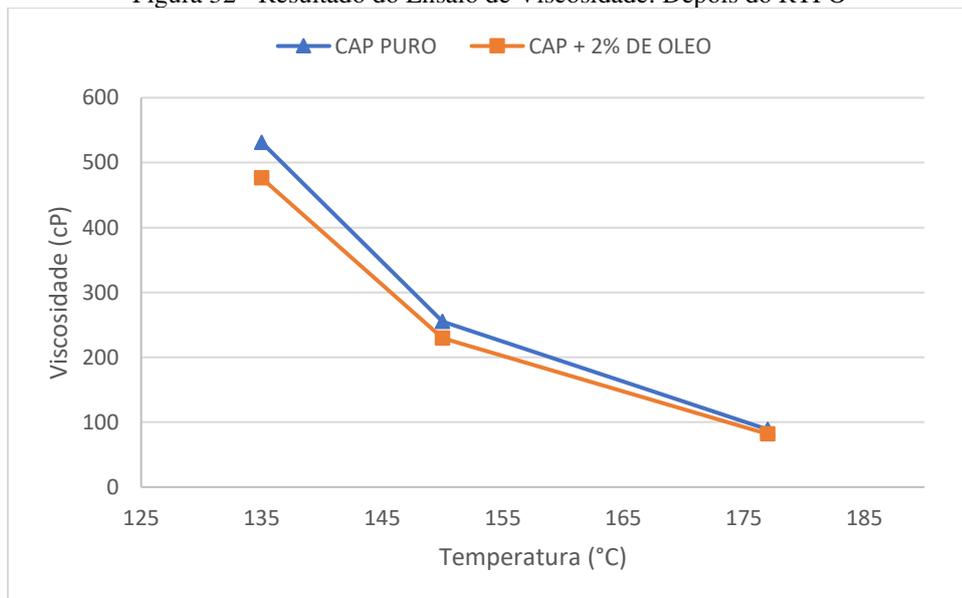
do óleo de girassol ao ligante tem potencial em reduzir os danos por envelhecimento quanto à viscosidade. Antes do ensaio de RTFO, observa-se uma redução de 21,3% para 135°C, 18,7% para 150°C e 13,7% para 170°C. Enquanto após o ensaio de RTFO, a redução é de 10,4% para 135°C, 10% para 150°C e 7,9% para 170°C. Resultando que a incorporação do aditivo orgânico reduz a viscosidade e aumenta a trabalhabilidade do ligante asfáltico.

Figura 31 - Resultado do Ensaio de Viscosidade: Antes do RTFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 32 - Resultado do Ensaio de Viscosidade: Depois do RTFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

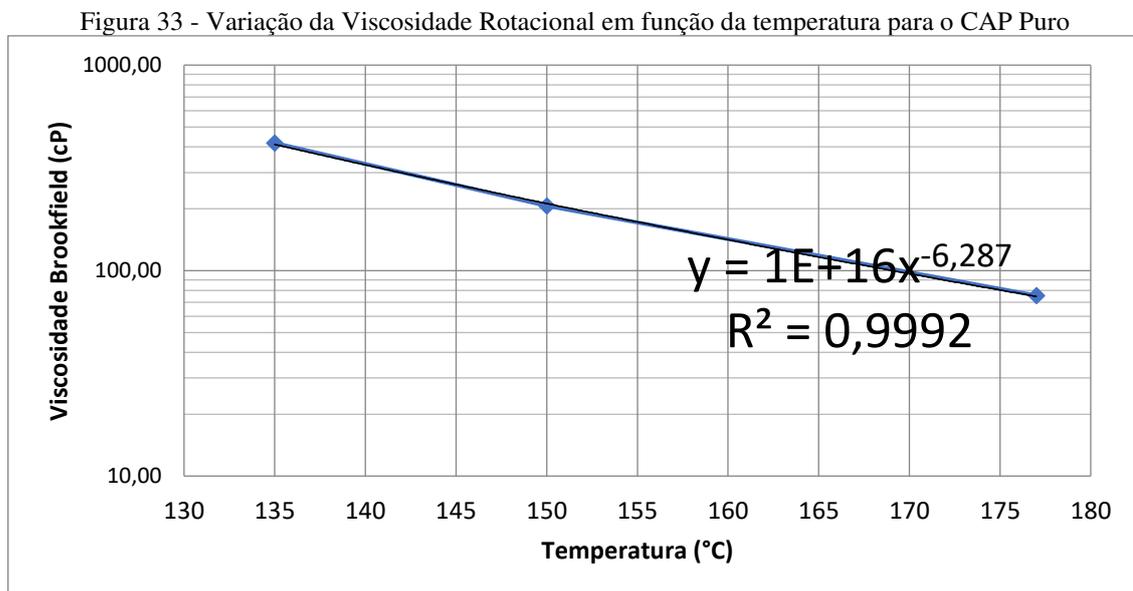
Ainda analisando os gráficos da Viscosidade Rotacional, observa-se que o ligante modificado com teor de 2% óleo de girassol reduz a viscosidade nas 3 temperaturas testadas

tanto antes como após RTFO, o que configura que esta incorporação reduz as temperaturas de mistura e compactação, sendo ponto positivo quando se busca fabricar MAMs.

Souza (2012) obteve uma diminuição da viscosidade do ligante asfáltico quando acrescido o óleo de mamona, mostrando que o aditivo influencia diretamente na diminuição das temperaturas de compactação e usinagem das misturas asfálticas.

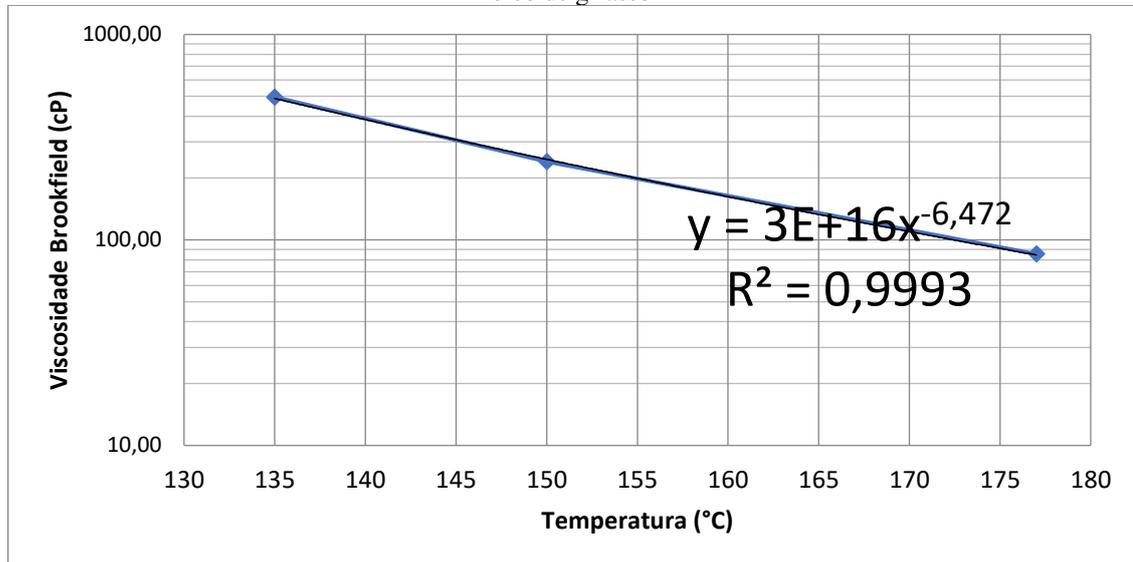
Resultados semelhantes também podem ser vistos no trabalho de Moraes (2018), que ao incorporar cera de carnaúba no CAP 50/70, obteve redução na viscosidade do ligante nas 3 temperaturas de ensaio, antes e depois de RTFO, afere-se ainda que a maior redução foi obtida com o teor de 3% do aditivo.

O Viscosímetro Brookfield auxilia na análise da incorporação do óleo de girassol no ligante na perspectiva do comportamento mecânico do CAP, visto que a viscosidade influencia na trabalhabilidade do ligante. Quando mais rígido, a adesividade do material nos agregados diminui, diminuindo a aglutinação da mistura. Desta forma, observa-se nas Figuras 33 e 34 à seguir as variações de temperatura de mistura e compactação das misturas asfálticas com ligante puro e ligante modificado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 34 - Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura para o CAP Modificado com 2% de óleo de girassol



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Guerra (2019) adicionou teores de 1%, 2% e 3% de óleo de canola no ligante asfáltico, e, obteve redução na viscosidade do CAP 50/70, apresentando maior redução para o teor de 3%. Indicando que a diminuição da consistência, diminui por consequência temperatura de usinagem e compactação.

Observando as curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP puro e modificado, temos uma redução de temperatura nas temperaturas de usinagem e compactação. Apesar de auxiliar na redução do gasto energético, ainda assim este valor não consolida uma Mistura Asfáltica Morna. Em suma, o aditivo redutor de viscosidade reduziu a temperatura de mistura e modelagem, mesmo que em pequeno valor, auxiliando na economia de energia do aquecimento do ligante, não sendo considerada então uma MAM. Na Tabela 23 observa-se as temperaturas de usinagem e compactação.

**Tabela 23** - Temperaturas de usinagem e compactação

<b>Temperatura</b>	<b>CAP Puro</b>	<b>CAP + 2% de Óleo de Girassol</b>
Usinagem (°C)	153	147,5
Compactação (°C)	141,5	137,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Desta forma, observa-se que os aditivos oriundos de oleaginosas, como o óleo de

girassol, objeto de estudo deste trabalho, quando incorporados ao ligante asfáltico, apresentam viabilidade na redução de temperaturas de usinagem e compactação, como apresentado pelos resultados dispostos anteriormente. Sendo então um grande auxiliador no processo de fabricação de Misturas Asfálticas Mornas.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

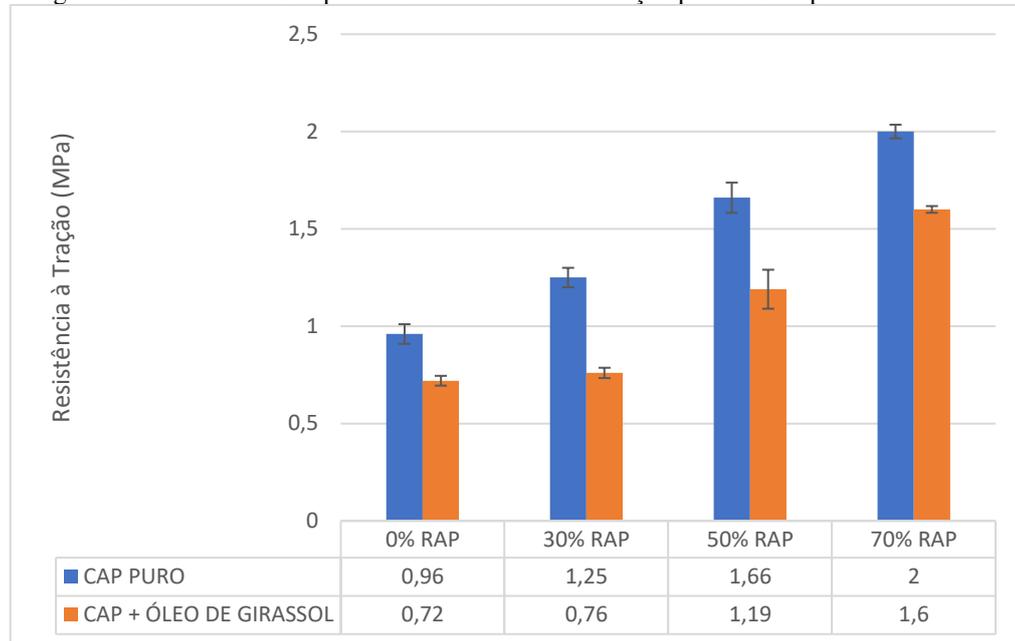
Para realização dos ensaios mecânicos foram moldados corpos de prova nos teores de 0%, 30%, 50% e 70% de RAP com o CAP puro, e os mesmos teores foram repetidos com o CAP modificado com 2% de óleo de girassol.

#### 4.3.1 Resistência à Tração Indireta Por Compressão Diametral

A Figura 35 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração para as misturas avaliadas. De acordo com a especificação de serviço DNIT 136/2010 - ES, o valor mínimo estabelecido para misturas asfálticas é de 0,65MPa, sendo assim, percebe-se que todas as amostras apresentam valores superiores ao requerido. É possível observar uma tendência de aumento nos valores de resistência à tração a medida que a percentagem de RAP incorporada na mistura também cresce, semelhante ao que foi observado por Lima (2003) em sua pesquisa.

No tocante a incorporação do óleo de girassol nas misturas asfálticas, os resultados apontam que o óleo tem a capacidade de reduzir os valores de resistência à tração nas misturas, porém, semelhante ao que é visto nos resultados pra CAP puro, a RT também aumenta em conjunto com o aumento de RAP na mistura. Observa-se que, quando há incorporação de 30% de RAP na mistura asfáltica com adição do óleo de girassol, não há uma divergência tão grande no valor de RT, em que a presença do teor de 30% do material reciclado e do modificador não interferiram em um valor maior de RT, como nas outras duas incorporações.

Figura 35 - Resultado Comparativo da Resistência à Tração para o CAP puro e modificado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Guerra (2019) incorporou o óleo de canola na mistura asfáltica e obteve diminuição na resistência à tração, resultado da alteração da consistência do ligante, assim como visto nesta pesquisa, os valores de resistência diminuíram, contudo tornaram-se satisfatórios por estarem de acordo com a norma.

Siqueira (2021) estudou a incorporação do material reciclado em altas proporções para uma nova mistura e obteve resultados semelhantes, com média de 1,61 Mpa nos corpos de prova ensaiados, atendendo também o valor mínimo da norma supracitada.

Bohn (2017) e Suzuki (2019) discorrem em seus estudos que ao incorporar misturas recicladas em uma nova mistura o valor obtido pela resistência à tração aumentará, visto a presença de ligante envelhecido na mistura, o que aumenta a rigidez do material. Nesta perspectiva, observa-se que a trabalhabilidade do material melhora com o aumento do teor de aditivo, porém a presença do RAP aumenta a rigidez da mistura, e conseqüentemente aumenta à resistência do material a tração.

#### 4.3.2 Módulo de Resiliência

A Figura 36 mostra os resultados do ensaio de módulo de resiliência, para misturas com ligante puro e modificado, nos teores de 0%, 30%, 50% e 70%. A leitura do gráfico nos mostra

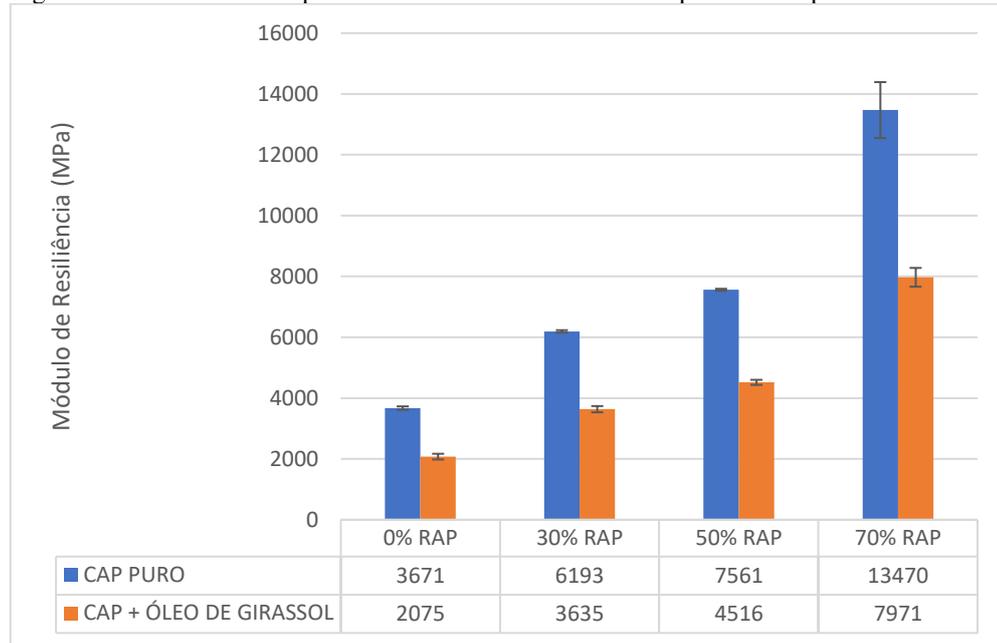
que quando acrescido o óleo de girassol o módulo de resiliência diminui em todos os teores de incorporação de RAP. E, o aumento gradual da presença do RAP na mistura, conseqüentemente aumenta o módulo de resiliência desta mesma mistura.

Os valores obtidos apontam que, semelhante ao que foi observado por Oliveira (2013), o módulo de resiliência é afetado pela quantidade de RAP incorporado à mistura, quanto mais RAP utilizado na dosagem, maior o MR do corpo de prova, isto acontece pois, com o aumento do material fresado na mistura asfáltica, há também um aumento de CAP envelhecido, favorecendo o aumento de rigidez. Destaca-se o valor obtido para misturas com 70% de RAP, que, além de muito alto, foge do padrão que vinha sendo observado para os demais percentuais, uma justificativa para o valor destoante de MR desta mistura, é o alto teor de ligante envelhecido que se encontra presente no material reciclado, em que a falta de aquecimento do componente envelhecido ocasiona maior rigidez do material, elevando o valor MR (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os resultados apresentados para as amostras com adição do óleo de girassol mostram que a incorporação do óleo torna as amostras menos suscetíveis à aumento de rigidez que as amostras produzidas com ligante puro. Nesta perspectiva, Guerra (2019) e Moares (2018) apresentaram em seus estudos de incorporação de óleo de canola e cera de carnaúba, respectivamente, que a adição do aditivo orgânico reduz MR, significando que esta incorporação reduz a rigidez do ligante presente na mistura, o que justifica a diminuição dos valores obtidos nos testes.

Assim como a incorporação do RAP na mistura altera o valor do Módulo de Resiliência, em que o aumento de material fresado, aumenta conseqüentemente a rigidez do material, devido a presença do ligante envelhecido. Suzuki (2019) estudou a incorporação de altos teores de RAP na mistura asfáltica e obteve como resultado o aumento dos valores de MR ocasionado pelo aumento da rigidez, semelhante ao ocorrido nesta pesquisa. E, Bohn (2017) encontrou também resultados semelhantes de aumento do MR ocasionados pela maior consistência do ligante asfáltico envelhecido quando incorporado em uma nova mistura.

Figura 36 - Resultado Comparativo do Módulo de Resiliência para o CAP puro e modificado



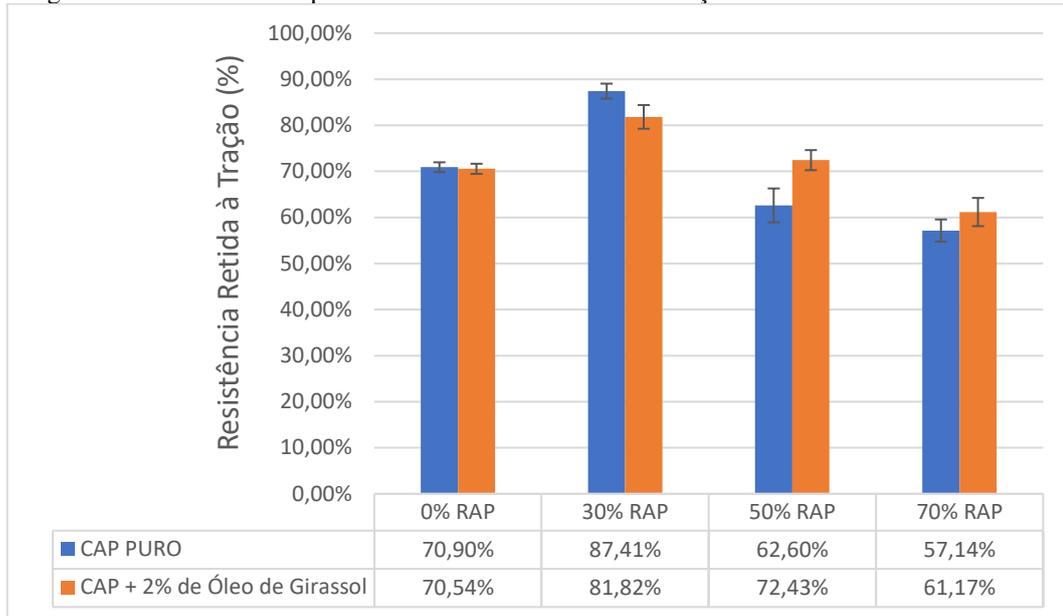
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Bernucci *et al.* (2008) afere que os valores de Módulo de Resiliência para uma mistura à 25° C deve estar no intervalo entre 2.000 e 8.000 Mpa. Para o presente trabalho os valores de incorporação de 30% e 50% de RAP apresentaram-se satisfatórios, tanto na condição de CAP Puro como modificado. Contudo, afere-se ainda que a mistura com 70% RAP apresenta maior resistência a deformação não permanente como visto pelo valor do MR obtido, porém, não se torna viável uma camada de revestimento muito rígida quando as camadas granulares não possuem rigidez semelhante. Por conseguinte, observa-se ainda, que o acréscimo do óleo de girassol diminui a temperatura de compactação e por consequência diminui o valor de MR obtido, como visto no gráfico anteriormente, à medida que se aumenta o teor de aditivo, diminui a temperatura de compactação e diminui o valor de MR.

#### 4.3.3 Lottman Modificado (Dano por Umidade Induzida)

Seguindo a norma do DNIT 180/2018 – ME, o dano por umidade induzida é a razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova condicionados e não condicionados, resultante da RRT, Resistência à Tração Retida, os valores obtidos neste ensaio estão dispostos na Figura 37.

Figura 37- Resultado Comparativo da Resistência Retida à Tração com CAP Puro e Modificado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando os resultados dispostos anteriormente os valores obtidos de RRT com o CAP puro e quando adicionado o teor de 2% óleo de girassol, observam-se valores satisfatórios e valores que não correspondem ao mínimo. Sabendo que a norma do DNIT 031/2006, preconiza que o valor mínimo de RRT deve ser de 70%, a mistura asfáltica de referência e a mistura incorporada com 30% de RAP encontram-se acima do valor requerido, assim como na mistura incorporada com 50% de RAP e adição do aditivo. Compreende-se então que o teor ótimo de aditivo e RAP na mistura foi obtido para a amostra com 30% de RAP, tendo a maior resistência à tração, com 87,41% para o CAP puro e 81,82% para o CAP modificado, estando também dentro da normativa regida por AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) T283/2002.

Luz *et al.* (2019) discorrem em seu estudo que o ensaio de Lottman modificado verifica a susceptibilidade de misturas asfálticas à umidade. Desta forma, quando condiciona-se o material compactado a ação deletéria da água, o ligante asfáltico possui fator determinante no desempenho da mistura. Isto, pois, estando o ligante com baixa viscosidade haverá maior adesividade dos materiais, tornando a mistura mais firme e unida. Neste trabalho, observou-se que o acréscimo do óleo de girassol diminui a viscosidade do material e aumenta a trabalhabilidade da mistura, para os casos com incorporação de RAP nos teores de 50% e 70%, o óleo de girassol respondeu satisfatoriamente quando aumentou a RRT devido a melhor aglutinação do material, contudo, afere-se que o ligante envelhecido em maior escala prejudicou a resistência mecânica e apresentou valores abaixo dos normatizados.

As amostras com teores de 0% e 30% de RAP demonstraram valores RRT satisfatórios, porém quando acrescido o óleo observa-se a redução do valor, podendo ser justificado pela condição de alcance máximo do teor, que limita a resposta à sollicitação mecânica. O mesmo ocorreu na pesquisa de Sales (2015) que teve uma redução de cerca de 34% quando incorporado CCBit ao ligante.

Os valores de RRT que se encontram abaixo do estipulado por norma, 70%, resistem menos a umidade induzida, ou seja, quando em condições de ações danosas da água, haverá maior deteriorização da mistura. Moraes (2018) obteve-se resultados similares, em que a adição de cera de carnaúba nos teores de 1%, 2% e 3% aumentaram a RRT devido a melhor aglutinação dos materiais, porém a mistura de referência se manteve abaixo do valor estipulado, tendo uma mistura que danificou-se mais facilmente.

## 5 CONCLUSÕES

Discorrem-se neste capítulo as conclusões obtidas por meio do estudo efetuado.

### 5.1 CONCLUSÕES OBTIDAS

Tendo como objetivo principal incorporar elevadas quantidades de material fresado em misturas asfálticas mornas, utilizando o óleo de girassol como aditivo redutor de viscosidade. Os resultados obtidos a partir dos ensaios permitem tomar as seguintes considerações:

A avaliação da incorporação do óleo de girassol ao CAP 50/70 utilizado nas misturas asfálticas apresentou grande potencial no que diz respeito ao desempenho do ligante quando simulado o envelhecimento. Os ensaios de caracterização reológica do ligante: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade apresentaram resultados satisfatórios, na qual ao adicionar o teor de 2% de óleo de girassol ao ligante asfáltico houve a diminuição da viscosidade, tanto antes como depois do RTFO, auxiliando na trabalhabilidade do material que se encontrou menos consistente e mais adesivo aos agregados.

A temperatura do ponto de amolecimento aumentou, significando que o material quando exposto ao calor permanecerá em sua consistência numa maior faixa de calor. No ensaio de penetração, o acréscimo do óleo resultou no aumento do valor de penetração da agulha em décimos de milímetro, ou seja, o ligante tornou-se menos consistente e mais maleável para uma nova mistura. E, por fim, o ensaio de viscosidade apresentou redução na temperatura de mistura e compactação quando adicionado o óleo, auxiliando na economia de energia do processo, retardando a perda da viscosidade ao envelhecer;

No que diz respeito as Misturas Asfálticas Mornas observa-se que apesar da redução de temperatura, ainda que tenha a economia de energia o valor não é considerável para uma MAM, visto que a temperatura de compactação e usinagem observada com o ensaio de viscosidade rotacional não obteve diminuição significativa;

Quando incorporados altos teores de RAP, os resultados obtidos a partir dos ensaios mecânicos de RT e MR, houve maior influência da quantidade de RAP introduzido na mistura, que aumenta juntamente à resistência a tração e ao módulo de resiliência das misturas. Isto ocorre, pois, quanto maior a quantidade de material fresado utilizado na mistura, maior a quantidade do ligante envelhecido proveniente do RAP na mistura final. Como já citado, o envelhecimento dos ligantes provoca aumento de rigidez na mistura a qual ele é inserido. Logo,

as características do material e a quantidade que ele é inserido na mistura refletem diretamente nas propriedades da mistura final. Enquanto o ensaio de dano por umidade induzida, apresentou resultados satisfatórios para a menor incorporação de RAP quando comparado à maiores teores, visto que a quantidade de material envelhecido também é menor, o novo ligante incorporado a mistura em maiores quantidades possui menor viscosidade e por consequência aglutina melhor a mistura na compactação, impedindo que o dano por umidade comprometa a resistência do material.

Com base nas pesquisas referenciadas neste trabalho, observa-se que a incorporação do RAP aumenta diretamente a rigidez do material, tornando-o mais resistente à deformação como exposto nos resultados. Assim, comparando a mistura com CAP Puro, os corpos de prova que contém altos teores de RAP tornam-se mais duros e com menor trabalhabilidade, necessitando então da incorporação de um aditivo que melhore a viscosidade do material. Para esta pesquisa, com a incorporação de 2% de óleo de girassol e altos teores de material fresado, conclui-se que a viscosidade do material diminui, melhorando a sua consistência para a mistura, e diminui conseqüentemente as temperaturas de usinagem e compactação do material, enquanto a presença do RAP aumenta a rigidez e influencia na capacidade de absorver as cargas, estando dentro dos padrões exigidos por norma.

Em suma, avaliando conjuntamente os três teores incorporados de acordo com os parâmetros mecânicos, conclui-se que o teor de 50% tornou-se o mais satisfatório, tendo em vista que este atende a todos os valores regidos por norma.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNUSDEI, J. O. Misturas Mornas. Novas alternativas para fabricação. **Asfalto em Revista, Jan/Fev**, v. 11, p. 22-25, 2011.

ANDERSON, R. Michael *et al.* **Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies**. 2008. Disponível em: Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies. Acesso em: 28 ago. 2021.

BALBO, José Tadeu. Pavimentos de concreto. Oficina de Textos, 2016. *In*: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1447- 1480, 2010.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, v. 504, p. 27, 2010.

BOHN, Kátia Aline. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. 254 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2 ed., Rio de Janeiro, p. 310, 2005. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/720\\_manual\\_restauracao\\_pavimentos\\_afalticos.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/720_manual_restauracao_pavimentos_afalticos.pdf). Acesso em: 14 abr. 2021.

CANCHANYA, Job Pérez. **Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CARVALHO, Jeovanesa Régis. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

CASTRO, Heizir F. Processos químicos industriais II. **Castro, HF Papel e celulose**, v. 4, p. 1-30, 2016.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2019: release e principais dados**. 2019. Disponível em: [https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/resumo\\_de\\_imprensa.pdf](https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/resumo_de_imprensa.pdf). Acesso em: 24 abr. 2021.

COSTA, Laiana Ferreira da. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA**. 2017. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/1270/LAIANA%20FERREIRA%20DA%20COSTA%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20%28PPGECA%29%202017.pdf?sequence=1&isAllo>

wed=y. Acesso em: 28 ago. 2021.

D'ANGELO, John *et al.* **Warm-mix asphalt:** European practice. United States. Federal Highway Administration. Office of International Programs, 2008.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR:** ES-P 31/05. Fresagem a Frio, Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP:** IP-DE-P00/002-2006. Projeto de Restauração de Pavimentos, São Paulo, p. 50, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP:** IP-DE-P00/004-2006. Avaliação de pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos por meio de Levantamento Visual Contínuo de Defeitos da Superfície, São Paulo, p. 28, 2006.

DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. ET-P0/022 – **Fresagem de Pavimento Asfáltico.** São Paulo, 1997.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (org.). **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia.** 2003. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit\\_005\\_2003\\_ter-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf). Acesso em: 12 mar. 2021.

FEITOSA, Johnny Peter Macedo. **Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos para misturas mornas.** 2015. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: [http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16942/3/2015\\_tese\\_jpmfeitosa.pdf](http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16942/3/2015_tese_jpmfeitosa.pdf). Acesso em: 28 ago. 2021.

FREIRE, J.; GÓIS, T. S.; KLIPPEL, W. D. **O estado da arte sobre uso de reciclado de Pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo.** XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte – Curitiba, 2014.

GUERRA, Thamires Dantas. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** 2019. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

HARRIGAN, E. T. **Research Results Digest 374:** A proposed technology evaluation program for warm mix asphalt. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C., 2012.

KENNEDY, Thomas William *et al.* **Superior performing asphalt pavements (Superpave):** The product of the SHRP asphalt research program. 1994. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-410.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

LIMA, A. T. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente.** 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de

Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LUCENA, Lêda Christiane de F. Lopes; DA SILVEIRA, Iarly Vanderlei; DA COSTA, Daniel Beserra. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 72-82, 2015. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/viewFile/3558/2712>. Acesso em: 29 ago. 2021.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais. **Transportes**, v. 27, n. 1, p. 141-155, 2019. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1594/742>. Acesso e: 28 ago. 2021.

MERIGHI, Cecília Fortes. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu**. 2015. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-04012016-171903/publico/Diss\\_Cecilia.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-04012016-171903/publico/Diss_Cecilia.pdf). Acesso em: 28 ago. 2021.

MORAES, Thalita Maria Ramos Pôrto de. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/402/THALITA%20MARIA%20RAMOS%20P%20c3%94RTO%20DE%20MORAES%20%e2%80%93%20DISSERTA%20c3%87%20c3%83O%20%28PPGECA%29%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 ago. 2021.

NAKAMURA, Juliana. Pavimentação asfáltica: Os tipos de revestimento, o maquinário necessário e os cuidados na contratação, projeto e execução. **Infraestrutura urbana: projetos, custos e construção**, São Paulo, v. 2, 2012.

NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann do. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/LuisAlbertoHerrmannDoNascimento.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/LuisAlbertoHerrmannDoNascimento.pdf). Acesso em: 15 maio 2021.

NETO, Silvrano Adonias Dantas *et al.* **Avaliação das propriedades físicas dos ligantes modificados com borracha granuladas de pneus usados**. 12º Reunião de pavimentação, Aracajú, Sergipe, 2004.

OLIVEIRA, Jardel Andrade de. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, Robson Barbosa. **Estudo sobre o efeito do CCBIt-113AD no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.

PENZ, Gustavo. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas**. 2010. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/28575>. Acesso em: 15 maio 2021.

PROWELL, Brian D.; HURLEY, Graham C. **Warm-mix asphalt: Best practices**. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2007.

RIBEIRO, Edeildo de Almeida. **o efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de Caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas**. 2011. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: [http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3681/1/2011\\_dis\\_eاربةiro.pdf](http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3681/1/2011_dis_eاربةiro.pdf). Acesso em: 29 ago. 2021.

RUBIO, M. Carmen *et al.* Warm mix asphalt: an overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, p. 76-84, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652611004926>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SALES, P. de M. **Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBIT**. 2015. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

SANTANA, Emerson Pereira de. **Estudos das prioridades físicas e mecânicas de misturas asfálticas recicladas com materiais fresados: estudo de caso-BR-230**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/10034>. Acesso em: 29 ago. 2021.

SANTOS, Nathan Garcia dos. A logística envolvida no ciclo do revestimento asfáltico. **MBA Gestão de Obras e Projetos-Florianópolis**, 2017. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/8773/1/Logistica%20envolvida%20no%20ciclo%20do%20revestimento%20asfaltico.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2021.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997.

SHELL BITUMEN. **Shell Wam Foam Process: for reducing energy consumption and emissions**. 2011. Disponível em: <https://www.yumpu.com/en/document/read/53557631/shell-wam-foam-process>. Acesso em: 10 nov. de 2020.

SILVA, Gutemberg Gonçalves da. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, Paulo Fernando A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. São Paulo: Pini, 2008.

SIQUEIRA, Mateus Valdevino de. **Avaliação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com elevado teor de material fresado**. 2021. Disponível em:

[https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/279/Avalia%  
c3%a7%  
c3%a3o%20de%20propriedades%20mec%  
c3%a2nicas%20de%20misturas%20asf%  
c3%a1lticas%20incorporadas%20com%20elevado%20teor%20de%20material%20fresado.pdf?sequence=1](https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/279/Avalia%c3%a7%c3%a3o%20de%20propriedades%20mec%c3%a2nicas%20de%20misturas%20asf%c3%a1lticas%20incorporadas%20com%20elevado%20teor%20de%20material%20fresado.pdf?sequence=1&isAllowed=y)  
&isAllowed=y. Acesso em: 25 ago. 2021.

SOUZA, Leonardo José Silva de. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona.** 2012. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SUZUKI, Karina Yuriko. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** 2019. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21082019-141957/publico/KarinaYurikoSuzukiCorr19.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2021.

YOSHIZANE, Hiroshi Paulo. **Defeitos, manutenção e reabilitação de pavimento asfáltico.** Universidade Estadual de Campinas, Centro Superior de Educação Tecnológica CESET. Limeira, p. 24, 2006.

ZAGONEL, Ana Regina. **Inovações em revestimentos asfálticos utilizados no Brasil.** 2013. 115 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

ZUBARAN, Marcelo. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** 2014. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/MarceloZubaran.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MarceloZubaran.pdf). Acesso em: 25 mai. 2021.

## ANEXOS

As Tabelas 24, 25, 26 e 27 são relativas a caracterização dos agregados graúdos e miúdos.

**Tabela 24 - Granulometria agregado graúdo (Brita 19)**

<b>Brita 19</b>					
Peneira	Material Retido			% passante	peneira (mm)
	Peso (g)	% retida	% retida acumulada		
1 1/2"		0	0	100,00	38,1
1"		0	0	100,00	25,4
3/4"	138,30	1,98	1,98	98,02	19,1
1/2"	4833,20	69,05	71,02	28,98	12,7
3/8"	1777,40	25,39	96,41	3,59	9,5
Nº 4	245,70	3,51	99,92	0,08	4,8
Nº 10	0,90	0,01	99,94	0,06	2,0
Nº 40	0,80	0,01	99,95	0,05	0,42
Nº 80	0,70	0,01	99,96	0,04	0,18
Nº 200	1,60	0,02	99,98	0,02	0,074
Fíler	2,10	0,03	100,01	-0,01	

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

**Tabela 25 - Granulometria agregado graúdo (Brita 12,5)**

<b>Brita 12,5</b>					
Peneira	Material Retido			% passante	peneira (mm)
	Peso (g)	% retida	% retida acumulada		
1 1/2"		0,00	0	100,00	38,1
1"		0,00	0	100,00	25,4
3/4"		0,00	0,00	100,00	19,1
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00	12,7
3/8"	633,10	12,66	12,66	87,34	9,5
Nº 4	3517,80	70,36	83,02	16,98	4,8
Nº 10	826,20	16,52	99,54	0,46	2,0
Nº 40	5,80	0,12	99,66	0,34	0,42
Nº 80	9,20	0,18	99,84	0,16	0,18
Nº 200	3,00	0,06	99,90	0,10	0,074
Fíler	1,50	0,03	99,93	0,07	

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

**Tabela 26 - Granulometria agregado miúdo (Areia)**

<b>Areia</b>					
Peneira	Material Retido			% passante	peneira (mm)
	Peso (g)	% retida	% retida acumulada		
1 1/2"		0	0	100	38,1
1"		0	0	100	25,4
3/4"		0	0	100	19,1
1/2"		0	0	100	12,7
3/8"	0	0	0	100,00	9,5
Nº 4	6,40	0,64	0,64	99,36	4,8
Nº 10	17,80	1,78	2,42	97,58	2,0
Nº 40	252,00	25,20	27,62	72,38	0,42
Nº 80	667,70	66,77	94,39	5,61	0,18
Nº 200	51,50	5,15	99,54	0,46	0,074
Fíler	3,70	0,37	99,91	0,09	

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

**Tabela 27 - Granulometria agregado miúdo (Pó de Pedra)**

<b>Pó de Pedra</b>					
Peneira	Material Retido			% passante	peneira (mm)
	Peso (g)	% retida	% retida acumulada		
1 1/2"		0,00	0	100,00	38,1
1"		0,00	0	100,00	25,4
3/4"		0,00	0,00	100,00	19,1
1/2"		0,00	0,00	100,00	12,7
3/8"		0,00	0,00	100,00	9,5
Nº 4	0,20	0,02	0,02	99,98	4,8
Nº 10	197,00	19,70	19,72	80,28	2,0
Nº 40	399,10	39,91	59,63	40,37	0,42
Nº 80	170,40	17,04	76,67	23,33	0,18
Nº 200	131,70	13,17	89,84	10,16	0,074
Fíler	93,20	9,32	99,16	0,84	

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

As Tabelas 28, 29, 30 e 31 são relativas a discriminação das massas específicas real e aparente, e absorção dos agregados graúdos e miúdos.

**Tabela 28 - Brita 19**

<b>Brita 19</b>	
Massa Úmida (g)	3000,30
Massa Submersa (g)	1910,00
Massa Seca (g)	2988,70
Dens Aparente	<b>2,74</b>
Dens Real	<b>2,77</b>
Absorção	<b>0,39%</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

**Tabela 29 - Brita 12,5**

<b>Brita 12,5</b>	
Massa Úmida (g)	1726,00
Massa Submersa (g)	1907,80
Massa Seca (g)	1715,70
Dens Aparente	<b>2,73</b>
Dens Real	<b>2,78</b>
Absorção	<b>0,60%</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

**Tabela 30 - Areia**

<b>Areia</b>		
Equipamento	Picnômetro III	Picnômetro IV
Va (cm <sup>3</sup> )	292,60	288,70
Massa úmida (ms)	500,00	500,00
Massa seca(m)	498,7	498,7
Peso frasco + água	641	638,5
Peso frasco seco	149,80	148,90
Peso frasco + areia (m1)	649,80	648,90
Peso frasco + areia + água (m2)	942,40	937,60
Massa específica Real	2,518	2,489
<b>Gsa</b>		<b>2,50</b>
Massa específica Aparente	2,4045	2,3602
<b>Gsb</b>		<b>2,38</b>
Absorção		<b>0,26%</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

**Tabela 31 - Pó de pedra**

<b>Pó de Pedra</b>		
Equipamento	Picnômetro III	Picnômetro IV
Va (cm <sup>3</sup> )	305,80	304,40
Massa úmida (ms)	500,00	500,00
Massa seca(m)	498,7	498,2
Peso frasco + água	641	638,5
Peso frasco seco	149,80	148,90
Peso frasco + areia (m1)	649,80	648,90
Peso frasco + areia + água (m2)	955,60	953,30
Massa específica Real	2,697	2,6998
<b>Gsa</b>		<b>2,70</b>
Massa específica Aparente	2,565	2,547
<b>Gsb</b>		<b>2,56</b>
Absorção		<b>0,36%</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).