



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UAEC

BRUNA THALITA ALEXANDRE SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA
ASFÁLTICA RECICLADA A QUENTE COM O USO DE GLICERINA
COMO AGENTE REJUVENESCEDOR**

Campina Grande– PB

2021

BRUNA THALITA ALEXANDRE SILVA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA A QUENTE COM O USO DE GLICERINA COMO AGENTE REJUVENESCEDOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a DSc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Co-orientadora: Eng^a. MSc. Sonaly Mendes Arruda

Campina Grande - PB
2021

FOLHA DE APROVAÇÃO:

AUTORA: BRUNA THALITA ALEXANDRE SILVA

TÍTULO: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA
RECICLADA A QUENTE COM O USO DE GLICERINA COMO AGENTE
REJUVENESCEDOR

TCC defendido em: ____ de _____ de 2021.

TCC aprovado em: ____ de _____ de 2021.

Prof^a. DSc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena(Orientadora)
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Msc.Sonaly Mendes Arruda(Coorientadora)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. DSc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Membro Interno - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

MSc. Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz
Membro Externo

Campina Grande – PB
2021

EPÍGRAFE

“Devemos estar dispostos a nos livrar da vida que planejamos para ter a vida que nos espera.”

(Joseph Campbell)

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao meu filho, por me dar tanta força para viver um dia de cada vez, focando nos meus objetivos.

À minha mãe e irmã, Andreia e Bianca, pelo apoio incondicional fornecido e por acreditarem no meu potencial.

Ao meu pai e minha madrasta, Edivaldo e Heloisa, por terem ajudado a dar esse pontapé inicial na minha carreira acadêmica.

À minha orientadora DSc. Lêda, pela oportunidade de aprendizado ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

À minha co-orientadora, MSc. Sonaly, sempre dedicada e disposta a colaborar com ensinamentos valiosíssimos ao longo do estudo.

Aos membros da banca, DSc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena e MSc. Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz, pelos conselhos com intenção de difundir seus conhecimentos.

À minha família, pelas palavras de apoio.

Aos professores que contribuíram para minha formação.

Às amigas que surgiram ao longo da vida acadêmica.

Muito obrigada!

RESUMO

O revestimento asfáltico sofre um processo de envelhecimento devido a oxidação do ligante. Quando este perde as condições de serventia, há possibilidade de o pavimento ser fresado, e então reaproveitado, recebendo o nome de RAP, podendo ser utilizado em novos revestimentos mediante a adição de agentes de rejuvenescimento que devolvam ao material as propriedades viscoelásticas perdidas. Agentes alternativos vêm sendo estudados, entre eles, a glicerina, que é um composto orgânico de função álcool, incolor, inodoro, viscoso, higroscópico e não corrosivo. Esta pesquisa visa avaliar o uso da glicerina como agente rejuvenescedor do RAP, constituindo-se em uma opção real e viável para atuar como precursor de produtos com alto valor agregado. Em uma primeira etapa, foi avaliada em laboratório, a mistura sem a incorporação de RAP e sem glicerina, e uma outra mistura com a incorporação de 30% de RAP e sem adição da glicerina, na segunda fase, a glicerina foi incorporada nos teores de 4% e 6% em misturas com 30% de RAP. A avaliação do comportamento mecânico foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), dano por umidade induzida (Lottman) e desgaste no ensaio cântabro. Os resultados dos ensaios de RT foram satisfatórios, e superiores ao determinado pela norma em todas as composições. Os resultados para o MR das misturas apresentaram aumento tanto com a adição de RAP (30% RAP e 0% glicerina), como pela adição da glicerina (30% RAP e 4% glicerina, 30% RAP e 6% glicerina) em relação a amostra de referência (0% RAP e 0% glicerina). Os resultados obtidos para cântabro indicam que a adição de glicerina aumenta a perda de massa e os resultados do dano por umidade induzida indicaram um aumento na resistência ao efeito deletério da água com a glicerina. Portanto, a glicerina não é um material adequado para utilização em rejuvenescimento, mas pode ser utilizada com a finalidade de agente corretivo da trabalhabilidade, agindo como agente tensoativo, reduzindo o atrito na interface dos agregados, e para promoção de aumento a resistência à tração e resistência a ação deletéria da água de uma mistura contendo RAP.

Palavras-chave: Pavimentação, reciclagem a quente, RAP, agentes rejuvenescedores alternativos.

ABSTRACT

The asphalt coating undergoes an aging process due to oxidation of the binder. When it loses its useful conditions, there is the possibility of the pavement being milled, and then reused, receiving the name of RAP, which can be used in new coatings by adding rejuvenating agents that restore the lost viscoelastic properties to the material. Alternative agents have been studied, including glycerin, which is an organic compound with an alcohol function, colorless, odorless, viscous, hygroscopic and non-corrosive. This research aims to evaluate the use of glycerin as a rejuvenating agent of RAP, constituting a real and viable option to act as a precursor of products with high added value. In a first step, the mixture without the incorporation of RAP and without glycerin was evaluated in the laboratory, and another mixture with the incorporation of 30% of RAP and without addition of glycerin, in the second phase, the glycerin was incorporated in the levels of 4% and 6% in blends with 30% RAP. The evaluation of the mechanical behavior was carried out through the tensile strength tests by diametrical compression (RT), resilience modulus (MR), induced moisture damage (Lottman) and wear in the cantabrian test. The results of the RT tests were satisfactory, and superior to that determined by the norm in all compositions. The results for the MR of the mixtures showed an increase both with the addition of RAP (30% RAP and 0% glycerin) and with the addition of glycerin (30% RAP and 4% glycerin, 30% RAP and 6% glycerin) in relation to reference sample (0% RAP and 0% glycerin). The results obtained for cantabrian indicate that the addition of glycerin increases mass loss and the results of induced moisture damage indicated an increase in resistance to the deleterious effect of water with glycerin. Therefore, glycerin is not a suitable material for use in rejuvenation, but can be used as a corrective agent for workability, acting as a surface-active agent, reducing friction at the interface of the aggregates, and to promote increased tensile strength and resistance to the harmful action of water in a mixture containing RAP.

Keywords: Pavement, hot recycling, RAP, alternative rejuvenating agents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma usina de asfalto a frio.....	21
Figura 2 – Operação de usina gravimétrica na reciclagem a quente	21
Figura 3 – Operação de usina drum mixer na reciclagem a quente.....	22
Figura 4 – Esquema do equipamento de reciclagem a quente.....	22
Figura 5 – Reciclagem a frio in situ	23
Figura 6 – Reciclagem profunda	23
Figura 7 – Transferência do calor por condução e convecção	25
Figura 8 – Valores de RT para as misturas estudadas.....	27
Figura 9 – Resultados de MR.....	28
Figura 10 – Comportamento à fadiga; Mx05 sem RAP e Mx07 com 40% de RAP; Mx 30 sem RAP e Mx32 com 40% de RAP ambos envelhecidos.....	29
Figura 11 – Módulos de resiliência (a 25°C) das misturas recicladas	30
Figura 12 – Consumo de asfalto no Brasil em bilhões de kg por ano	32
Figura 13 – Modificação do grau de PG de ligantes asfálticos com adição de agentes rejuvenescedores	35
Figura 14 – Módulo de cisalhamento dinâmico relativo em relação ao ligante virgem do CAP (a) 30/45 e (b) 50/70.	35
Figura 15 – Matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel	37
Figura 16 – Mercado e uso do glicerol (volumes e usos industriais).....	38
Figura 17 – Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa	40
Figura 18 – Material fresado utilizado na pesquisa.....	41
Figura 19 – Granulometria do RAP antes e após extração do ligante	42
Figura 20 – Recuperação do ligante em Rotavapor R-300 Buchi.....	43
Figura 21 – Ligante recuperado na rotoevaporação em estufa a vácuo	43
Figura 22 – Espectro FTIR das amostras.....	44
Figura 23 – Curvas viscosidade versus temperatura para os ligantes virgem e recuperado do RAP	46
Figura 24 – Distribuição granulométrica	47
Figura 25 – Agitador mecânico FISATOM.....	49
Figura 26 – Curvas granulométricas superior, intermediária e inferior da amostra de referência.....	50
Figura 27 – Compactador Giratório SUPERPAVE.....	50
Figura 28 – Curvas granulométricas finais das amostras de referência e com RAP e glicerina	52

Figura 29 – Penetrômetro automático	53
Figura 30 – Ensaio anel e bola.....	54
Figura 31 – Viscosímetro Brookfield.....	55
Figura 32 – Prensa mecânica	56
Figura 33 – Ensaio Módulo de resiliência.....	57
Figura 34 – Aparelho de Abrasão Los Angeles	58
Figura 35 – Resultados do ensaio de viscosidade.....	60
Figura 36 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	61
Figura 37 – Módulo de Resiliência	62
Figura 38 – Desgaste Cântabro	63
Figura 39 – Resultado do ensaio de perda de massa em função do teor de glicerina	63
Figura 40 – Corpos de prova (a) antes e (b) após o ensaio Cântabro	64
Figura 41 – Resultados do dano por umidade induzida.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre consumo de energia	24
Tabela 2 – Especificação brasileira para Agentes Rejuvenescedores	34
Tabela 3 – Composição das amostras.....	40
Tabela 4 – Massa específica máxima medida e teor do ligante	41
Tabela 5 – Caracterização dos ligantes recuperado e virgem	45
Tabela 6 – Temperaturas de usinagem e compactação das misturas de referência e com RAP	46
Tabela 7 – Caracterização física dos agregados	47
Tabela 8 – Parâmetros volumétricos das curvas superior, intermediária e inferior da amostra de referência.....	51
Tabela 9 – Percentuais finais dos materiais nas misturas.....	51
Tabela 10 – Parâmetros volumétricos finais das misturas	52
Tabela 11 – Caracterização dos ligantes.....	59
Tabela 12 – Temperaturas de usinagem e compactação das misturas.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de agentes rejuvenescedores	33
Quadro 2 – Propriedades da glicerina	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AR	Agente Rejuvenescedor
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CIR	<i>Cold In-place Recycling</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
FDR	<i>Full Depth Reclamation</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
Gmm	Massa específica máxima medida
HIR	<i>Hot In-place Recycling</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MR	Módulo de Resiliência
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NBR	Norma Brasileira Técnica
NCAT	<i>NSW Civil and Administrative Tribunal</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTFO	<i>Rolling Thin Film Oven</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
TCE	Solvente Tricloroetileno
TMM	Tamanho Nominal Máximo
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

UFPE Universidade Federal do Pernambuco
UFRN Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Breve Histórico	19
2.2	Misturas Asfálticas Recicladas	20
2.3	Reciclagem à Quente	24
2.3.1	Dosagem das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente	25
2.3.2	Comportamento Mecânico das Misturas Recicladas a Quente	26
2.4	Ligante Asfáltico	30
2.5	Agente Rejuvenescedor	33
2.5.1	Glicerina	36
2.6	Considerações Finais	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Materiais	41
3.1.1	RAP	41
3.1.2	Ligante Asfáltico	45
3.1.3	Agregados	46
3.1.4	Glicerina	47
3.2	Métodos	48
3.2.1	Mistura do Ligante com a Glicerina.....	48
3.2.2	Dosagem SUPERPAVE.....	49
3.2.3	Penetração	53
3.2.4	Ponto de Amolecimento.....	53
3.2.5	Performance Grade (PG).....	54
3.2.6	Viscosidade Rotacional.....	54

3.2.7	Ensaio Mecânico.....	55
3.2.7.1	<i>Resistência a Tração por Compressão Diametral</i>	55
3.2.7.2	<i>Módulo de Resiliência</i>	556
3.2.7.3	<i>Cântabro</i>	557
3.2.7.4	<i>Dano por Umidade Induzida</i>	558
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Caracterização do Ligante Modificado	59
4.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral	61
4.3	Módulo de Resiliência	62
4.4	Cântabro	62
4.5	Dano por Umidade Induzida (<i>Lottman</i>)	624
5	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são construídos para terem a vida útil determinada em projeto, no entanto, sem as devidas manutenções, sofrem deterioração progressiva, perdendo suas propriedades iniciais e tornando-se duro e quebradiço. Segundo Tonial (2009) o processo de envelhecimento do ligante, principal responsável pela degradação supracitada, decorre da influência de vários fatores, mas principalmente da temperatura (na usinagem, compactação e vida útil), exposição ao ar (ação do oxigênio) e da sua superfície específica.

Em comparação a outras estruturas de engenharia, o pavimento asfáltico é a que apresenta o menor tempo de vida útil, e por este motivo deve-se utilizar técnicas mais aprimoradas de manutenção. A reparação do pavimento por meio de recapeamentos não se torna mais viável após certa quantidade de camadas aplicadas e a melhor opção é a remoção da camada e a sua substituição com um novo revestimento (REIS, 2013). A fresagem é o método mais empregado na remoção desse pavimento antigo, que gera, como resíduo, o material fresado que, inadequadamente descartado, afeta negativamente o meio ambiente. Neste sentido, algumas técnicas de reciclagem visam reaproveitar este resíduo, incorporando-o à fabricação de uma nova mistura asfáltica, cujo método de reciclagem deverá ser selecionado de acordo com a destinação final da mistura (ZANETTE *et al*, 2016).

A reutilização de materiais reciclados em camadas de pavimento consiste em transformar um pavimento deteriorado em uma estrutura homogênea, dimensionada para receber os esforços do tráfego. Essa reciclagem pode ser a quente ou a frio, no local ou em usina, uma vez que é utilizado todo ou parcialmente os materiais do pavimento existente, diminuindo a quantidade de resíduos gerados (BOHN, 2017). A aplicação desse resíduo visa a redução no valor econômico, no consumo de materiais novos, e a proteção do meio ambiente.

A vantagem do uso do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) nas misturas asfálticas ocorre em função do reaproveitamento dos materiais no geral (ligante e agregados), sendo ainda um material envelhecido, mas que constitui uma matéria prima com menor custo (SEGUNDO *et al.*, 2016). Nos últimos anos, houve um aumento da reciclagem com enfoque na inclusão de uma maior quantidade de RAP na mistura. Contudo, de acordo com Genesseeux (2015) além da heterogeneidade, o aquecimento do RAP para reciclagem em taxas acima de 25% de fresado, é motivo de limitações para o seu uso, pois influencia na perda da durabilidade da mistura asfáltica final. Para taxas elevadas de RAP é necessário o aquecimento dos agregados novos para que transmita o calor ao material fresado e ao asfalto envelhecido, para que assim seja remobilizado. Quanto maior o teor de

RAP mais alta será a temperatura a ser empregada, e este fato causa danos de envelhecimento aos materiais virgens, além de provocar um elevado consumo energético para conseguir chegar a essas temperaturas e altos níveis de emissões de gases do efeito estufa (CANCHANYA, 2017).

É possível reestabelecer parte das propriedades viscoelásticas do ligante envelhecido adicionando na mistura com RAP agentes rejuvenescedores e/ou de reciclagem. Agentes alternativos (óleo de cozinha, óleo de motor, graxa vegetal, óleo de algodão) vêm sendo testados para proporcionar este efeito, figurando uma solução econômica e eficaz relacionada ao reaproveitamento de resíduos de processos industriais e comerciais (OSMARI, 2016). No entanto, materiais não-oleosos também estão sendo avaliados como agentes rejuvenescedores, a exemplo do glicerol, um composto orgânico de função álcool, coproduto da indústria do biodiesel, cujo nome comercial é glicerina (acima de 95% de pureza). Já existe uma patente publicada por Davis *et al.* (2012) demonstrando a utilização de glicerol em misturas com alto teor de materiais betuminosos reciclados.

Nesse contexto, a necessidade de aperfeiçoar técnicas relacionadas ao reaproveitamento de ligantes asfálticos é uma realidade. Apesar da evolução do potencial de rejuvenescimento dos ligantes envelhecidos pela adição de diferentes produtos, admite-se que estudos adicionais são necessários para o entendimento mais aprofundado. Uma vez que o interesse em utilizar o RAP cresce objetivando a sustentabilidade, a proposição do uso da glicerina como rejuvenescedor busca contribuir com o conhecimento sobre os seus efeitos na composição e comportamento mecânico da mistura final.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico em misturas asfálticas recicladas a quente contendo a glicerina como agente rejuvenescedor.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos buscam-se cumprir os seguintes itens com a presente pesquisa:

- analisar o efeito do ligante virgem modificado com glicerina na redução das temperaturas de usinagem e compactação;
- comparar o comportamento reológico dos ligantes modificados com a adição de glicerina nos teores de 4% e 6%;

- verificar o efeito da adição de RAP e glicerina nas misturas asfálticas a partir de ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, cântabro e dano por umidade induzida;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados tópicos relacionados com a reciclagem de misturas asfálticas e agentes rejuvenescedores, de modo a possibilitar uma compreensão mais ampla sobre esta técnica de rejuvenescimento de mistura asfáltica reciclada. Inicialmente há uma abordagem histórica e apresentação dos métodos de reciclagem. Em seguida as vantagens e desvantagens da técnica de mistura à quente, bem como sua dosagem e resultados publicados sobre o comportamento mecânico dessas misturas. O capítulo é finalizado com uma explicação sobre ligante asfáltico, agentes rejuvenescedores e a glicerina.

2.1 Breve Histórico

A utilização de técnicas de reciclagem em pavimentos ocorre desde 1915 (KANDHAL & MALLICK, 1997), e por volta de 1930 datam as primeiras máquinas fresadoras nos Estados Unidos. Ainda em 1930 consta a execução da reabilitação de pavimentos em Singapura com um desempenho de vida útil entre 25 e 30 anos. Em 1948 houve a utilização com sucesso na Índia e na Alemanha os primeiros projetos utilizando a reciclagem de pavimentos ocorreram no início dos anos 60 (LIMA, 2003). Na década de 70 houve um grande aumento das técnicas de reciclagem devido ao conflito Árabe-Israelense pelo embargo do petróleo no oriente Médio (KANDHAL & MALLICK, 1997).

De acordo com Castro (2003) as primeiras utilizações no Brasil foram em 1986, na via Anhanguera em São Paulo. Os serviços iniciais reciclagem do pavimento betuminoso no Brasil, no Rio de Janeiro em 1960. No Ceará a primeira reciclagem de pavimento realizada com sucesso foi na Ce-282, entre Icó e Iguatu, em 1999. Em Fortaleza, as primeiras fresagens de vias urbanas ocorreu em 2001. (SOARES *q*, 1999)

Atualmente, no Brasil, há poucos relatos da aplicação de reciclagem de misturas asfálticas em contraposição das práticas no exterior. Nos Estados Unidos a utilização do RAP é a mais indicada em misturas asfálticas recicladas a quente. Na Europa a reciclagem a quente em usina constitui uma das soluções mais adotadas, como é o caso da Holanda, Alemanha e Dinamarca, e de acordo com a *European Asphalt Pavement Association* – EAPA a reutilização de material fresado representa significativo potencial de economia no consumo de novos materiais e energia. No Japão, cerca de 50 milhões de toneladas de misturas asfálticas quentes são produzidas por ano, em que 41,9 milhões de toneladas são misturas com RAP, sendo 76% destinada para pavimentação (SUZUKI, 2019).

2.2 Misturas Asfálticas Recicladas

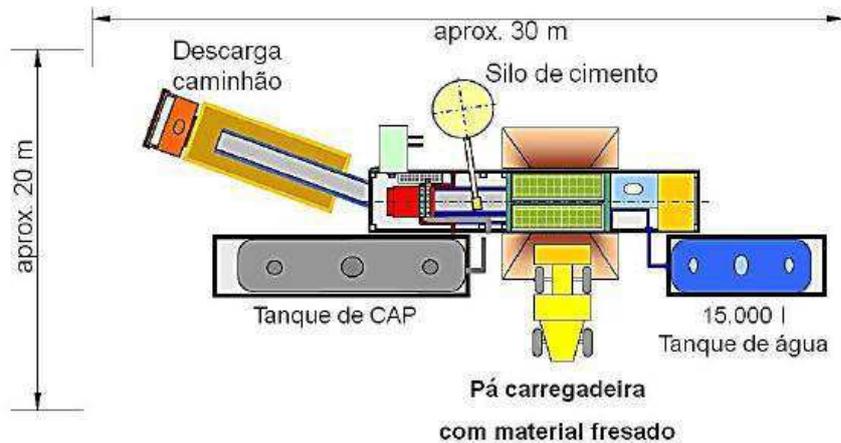
De acordo com Gennesseaux (2015) a reciclagem de pavimentos surgiu com a necessidade de preservação do meio ambiente e economia de recursos naturais. Essa técnica de reciclagem consiste em reutilizar os materiais, atenuando os gastos com construção de novos pavimentos, além de diminuição do impacto ambiental provocado pelo despejo inadequado de materiais, onde o principal resíduo gerado em serviços de pavimentação é o RAP, obtido por meio da fresagem de revestimentos asfálticos degradados (SEGUNDO *et al.*, 2016).

As ações repetidas das cargas de serviço e intempéries causam a degradação da estrutura de um pavimento. Segundo Bernucci *et al.* (2008), com o passar do tempo, o ligante asfáltico vai perdendo alguns de seus componentes e adquirindo certo enrijecimento. Uma das técnicas atuais de recuperação da flexibilidade do ligante é a reciclagem. A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA) determina alguns tipos de recuperação, sendo eles descritos em Kandhal (2006):

a) Coldplanning – Fresagem com/sem recomposição;

Este método utiliza a técnica de fresagem, na qual há a retirada do revestimento asfáltico em determinada profundidade, controlada automaticamente, com a recuperação da superfície a uma cota e inclinação pré estabelecidas. Este pode ser utilizado para a correção do greide da pista, regularização do pavimento e recuperação da resistência à derrapagem. A fresagem é realizada por máquinas autopropelidas que possuem um tambor rotativo, transferindo o RAP para caminhões que irão retirar o material da localidade, que é uma unidade móvel de mistura a frio localizada nas proximidades do local de trabalho, esquematizada na Figura 1 (LIMA, 2003). O revestimento retirado é misturado com espuma de asfalto (devido a taxa de expansão da espuma, diminuindo o consumo), formada em um processo onde quantidades de água são adicionadas a emulsão asfáltica, em que a espuma é acrescentada ao material fresado e misturado a agentes rejuvenescedores, produzindo uma nova mistura a frio, adequada para a pavimentação imediata (OLIVEIRA, 2019);

Figura 1 – Representação de uma usina de asfalto a frio

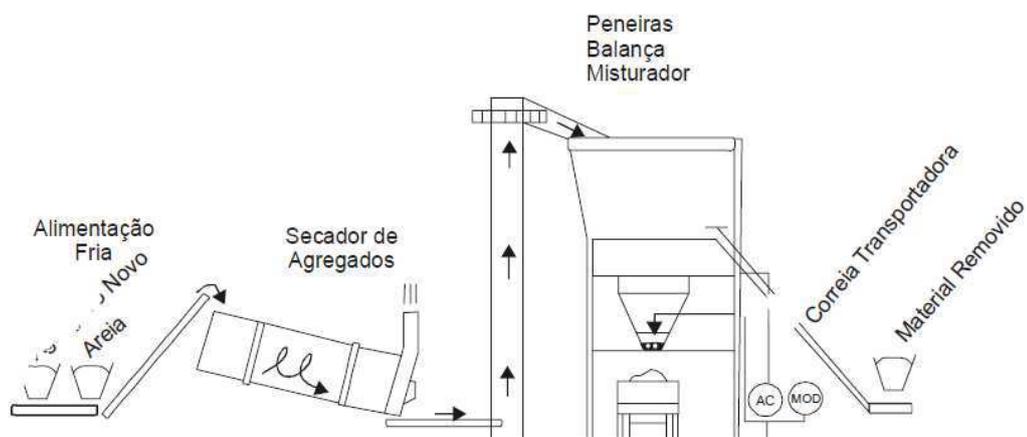


Fonte: OLIVEIRA, 2019

b) Hot recycling in asphaltplant – Reciclagem a quente em usina;

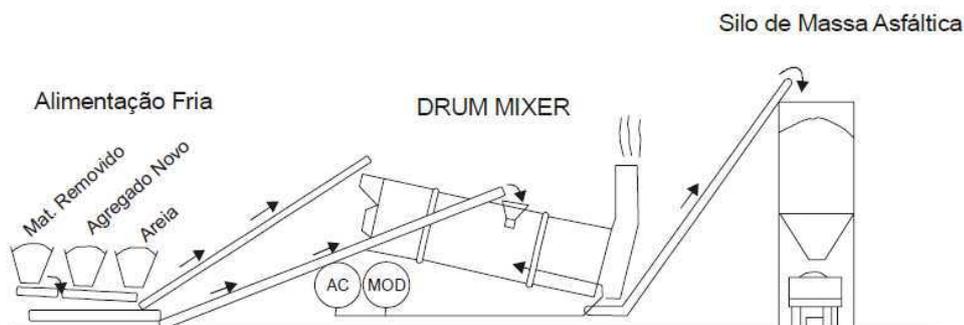
Esta reciclagem consiste na retirada do pavimento por uma máquina fresadora ou por operação de trituração removendo total ou parcialmente a camada a uma determinada profundidade, e logo após é transferida para um local de estocagem para reciclagem em usina (gravimétrica ou *drum-mixer*). Segundo Kandhal e Mallick (1997), geralmente, 10% a 35% do material removido do pavimento são utilizados para a composição da mistura reciclada nas usinas gravimétricas apresentadas na Figura 2, sendo que em algumas situações utiliza-se até 50%. As usinas *drum-mixer* (Figura 3) tem aproveitamento do material removido em torno de 30% a 50%, podendo atingir até 70%. De acordo com os defeitos existentes no pavimento, a reciclagem a quente em usina é recomendada para reparação de exsudação do pavimento, corrugação, afundamento de trilha de roda, couro de jacaré, reflexão de trincas, panelas-buraco e depressões.

Figura 2 – Operação de usina gravimétrica na reciclagem a quente



Fonte: DNIT, 2006

Figura 3 – Operação de usina drum mixer na reciclagem a quente

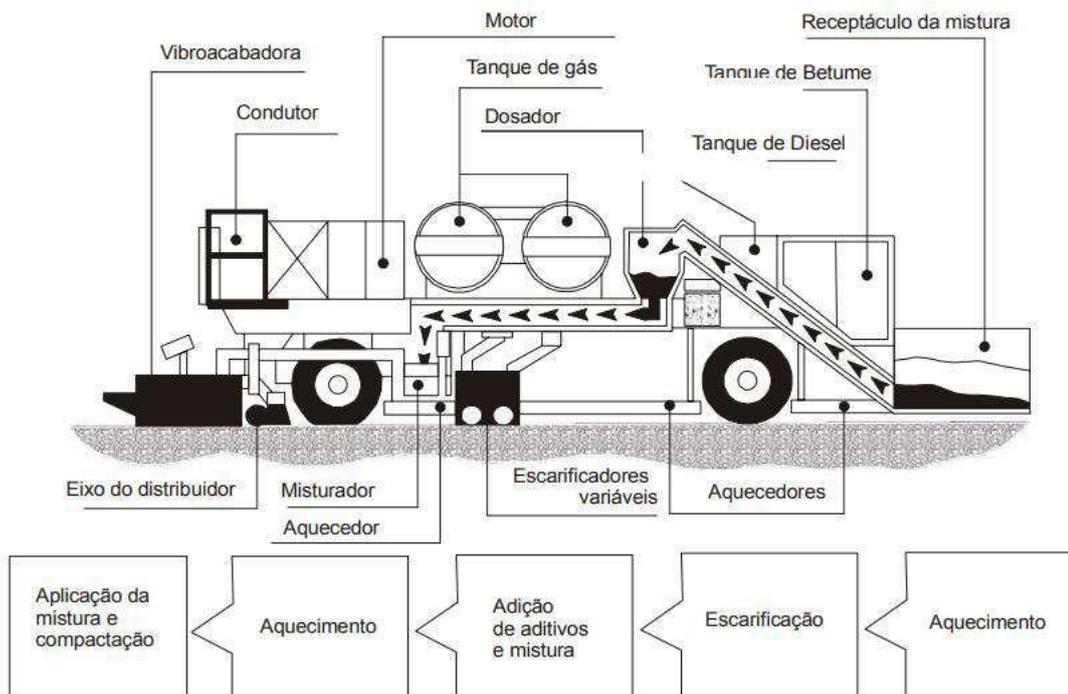


Fonte: DNIT, 2006

c) Hot in-placerecycling (HIR) – Reciclagem a quente no local;

Neste método a superfície asfáltica é removida, aquecida e amolecida a permitir que seja misturada por um motor rotativo a quente, com o ligante asfáltico, agregados virgens e agentes rejuvenescedores (Figura 4). Após isso, a mistura reciclada é realocada sobre o pavimento. A reciclagem a quente no local é recomendada para reparação de trincamentos na superfície do pavimento.

Figura 4 – Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local



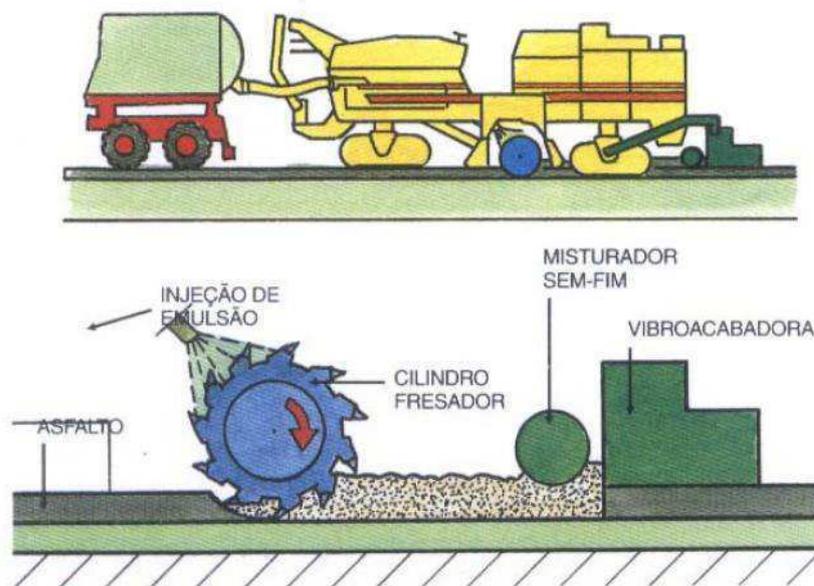
Fonte: DNIT, 2006

d) Coldin-placerecycling (CIR) – Reciclagem a frio no local;

A reciclagem a frio no local é a reabilitação do revestimento existente adicionando-se normalmente emulsão asfáltica à temperatura ambiente. Não é necessário transporte de materiais, com exceção do aditivo a ser utilizado. O processo consiste na execução da

fresagem, adição da emulsão asfáltica e aditivos, espalhamento e compactação, (Figura 5). Este método é recomendado para correção de defeitos como reflexão de trincas e borda de pavimento.

Figura 5 – Reciclagem a frio in situ



Fonte:LIMA, 2003

e) Full depth reclamation (FDR) – Recuperação profunda do pavimento.

Neste método é incorporado as camadas do pavimento aditivos, como emulsões asfálticas e agentes químicos, como cloreto de cálcio, cimento Portland, cinza volante e cal, para produzir uma camada de base estabilizada (Figura 6). Esta é indicada na correção de defeitos estruturais do pavimento como afundamento de trilha de roda profundo, panelas-buraco, problemas de base/sub-base e depressões.

Figura 6 – Reciclagem profunda



Fonte: TECNOPAV, 2019

2.3 Reciclagem à Quente

A NR 033/2005 e 034/2005 do DNIT definem mistura asfáltica reciclada a quente como uma mistura preparada, no local (com equipamento apropriado) ou em usina, empregando o fresado, ligante e agregados virgens e, se necessário, material de enchimento (fíler) e agente rejuvenescedor misturado, espalhado e comprimido à quente.

A reciclagem à quente quando comparada com os demais métodos de recuperação do pavimento se mostra eficiente com relação à economia de energia. A Tabela 1 apresenta a economia média de energia das técnicas de reciclagem a quente em confronto com o método de recapeamento tradicional.

Tabela 1 – Comparação entre consumo de energia

PROCESSO	NECESSIDADE DE ENERGIA (BTU/ton)
Recape com mistura nova (e=4cm)	581.980
Fresagem a frio e reciclagem a quente em usina	
-20% reciclado/80% mistura nova (e=4cm)	542.049
-40% reciclado/60% mistura nova (e=4cm)	488.401
Reciclagem a quente na pista	202.300

Fonte: adaptada de DNIT, 2006

Dentre as vantagens de reciclagem à quente em usina pode-se citar a capacidade de correção de erros na dosagem, melhora dos materiais existentes no asfalto e melhor controle na qualidade. Kandhal e Mallick (1997) destacam as seguintes vantagens:

- melhorias estruturais significativas obtidas com pouca ou nenhuma mudança da espessura, melhorando os materiais de asfalto existentes;
- problemas de distorção de superfície e base podendo ser corrigidos;
- desempenho da mistura reciclada tão bom quanto o de uma mistura asfáltica convencional.

O DNIT (2006) ainda destaca vantagens na execução das operações da reciclagem em usina como melhor controle de qualidade em termos de dimensões de partículas, teor do agente rejuvenescedor, porcentagens de participação do agregado novo e do reciclado na mistura e homogeneidade da mistura.

Zubaran (2014) relata que o primeiro aspecto sustentável da utilização do RAP é a resolução da disposição do rejeito em locais inapropriados. De acordo com Genesseeux (2015) o reaproveitamento gera a redução dos gastos com construção de novos pavimentos, pela diminuição do impacto causado ao despejo inadequado (fresado), como pela redução da necessidade de exploração de novas jazidas. A reciclagem do RAP não é apenas uma alternativa benéfica, mas também uma garantia econômica de competitividade para a construção de pavimentos flexíveis.

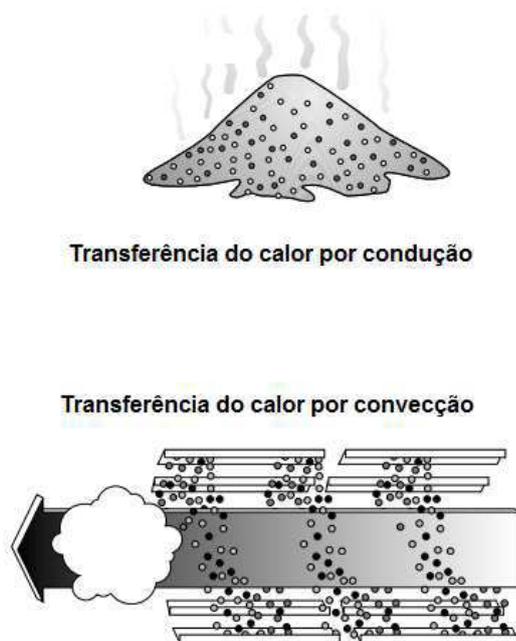
Há também desvantagens a serem consideradas como parâmetros de projeto de reabilitação questionáveis e por apresentar uma execução mais lenta do que um simples reforço de pavimento. Há também desafios como a quantificação do ligante envelhecido despreendida no aquecimento e homogeneização desse ligante envelhecido com o virgem. Porém as vantagens são superiores às desvantagens, levando o processo de reciclagem a ser uma alternativa que deve ser considerada.

2.3.1 Dosagem das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente

Numa mistura asfáltica reciclada quanto mais alto o teor de material fresado, melhor o benefício econômico e ambiental. Por outro lado, o comportamento mecânico dessas misturas deve ser avaliado à risca para que as misturas a serem produzidas possuam uma qualidade igual ou superior as convencionais.

O teor de RAP a ser utilizado deve considerar a temperatura a ser empregada na usinagem para que não haja o sacrifício do ligante virgem adicionado. De acordo com a *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 1997) o RAP pode ser aquecido por duas maneiras: transferência de calor por condução em que os agregados virgens são superaquecidos para passar o calor ao RAP, e a transferência de calor por convecção onde o material é exposto a uma quente corrente de gás (Figura 7).

Figura 7 – Transferência do calor por condução e convecção



Fonte: NAPA, 1997

Segundo com Genesseaux (2015) o aquecimento dos componentes da mistura depende das taxas de fresado. Em processo com taxas elevadas de RAP, o procedimento se torna energeticamente inviável, pois também superaquece os agregados naturais (temperaturas acima de 250^o), sendo necessária a adaptação em usinas para aumento de produtividade e redução do envelhecimento do ligante durante o processo de usinagem.

De acordo com Canchanya (2017) todas as taxas de utilização do RAP estão sujeitas à limitações e ao conhecimento das características básicas do material. Serfass (2008) relata que a reciclagem com teores elevados de material fresado, entre 50% e 70%, é viável apenas se o estoque estiver homogeneizado e identificado, onde a boa uniformidade do RAP e caracterização do ligante é fundamental e necessita de diversos controles. Suzuki (2019) traz a importância de uma atenção especial na gestão do RAP antes da usinagem, desde a produção desse material, o armazenamento, a dosagem, até o processamento em usina para que seja possível uma mistura final mais homogênea e de ótima qualidade.

Segundo o DNIT (2006) a sequência de desenvolvimento das misturas recicladas a quente, em usina fixa segue as seguintes etapas:

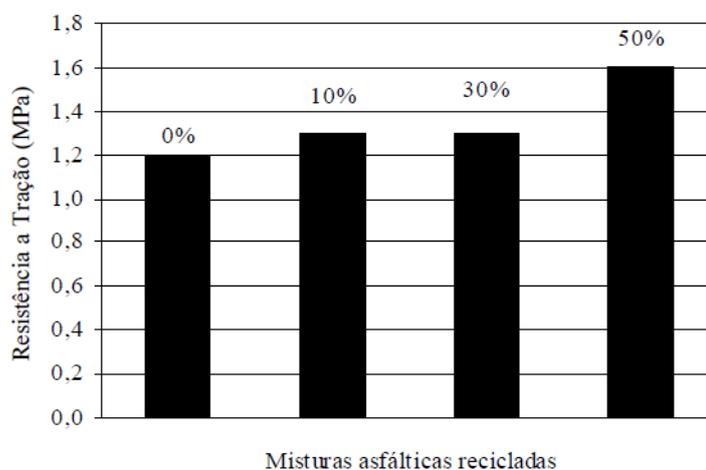
- primeira etapa: corresponde ao preparo do material, em que há a retirada do pavimento asfáltico existente e em seguida a redução até um tamanho adequado;
- segunda etapa: análise dos estoques, a fim de identificar as características do material estocado, para estudo de mistura reciclada;
- terceira etapa: processo de usinagem a quente, onde o objetivo principal compreende algumas modificações das usinas convencionais, ou, o revestimento asfáltico retirado é aquecido e seco, sem ser posto diretamente à chama do secador;
- quarta etapa: lançamento e compactação, a mistura será lançada e compactada como uma mistura convencional, usando os mesmos métodos e equipamentos.

2.3.2 Comportamento Mecânico das Misturas Recicladas a Quente

Atualmente, as misturas com até 40% de RAP no processo de reciclagem a quente, ainda é visto como um alto teor de material reciclado para adicionar em novas misturas, devido à existência de deficiências na não homogeneidade do RAP, e em relação ao aumento de temperatura no processo de usinagem, e às preocupações de que as misturas finais se tornarão muito rígidas tendo como consequência uma menor trabalhabilidade e dificuldade de compactação, podendo ainda levar a mistura a falhas em campo, como à fadiga do pavimento recuperado.

A fim de propiciar uma melhor compreensão dos pavimentos com misturas quentes que incorporam percentuais de material fresado acima de 25% temos Lima (2003) que realizou a caracterização mecânica de misturas recicladas a quente sem a adição de RAP (Mistura I), e com a adição de 10% (Mistura II), 30% (Mistura III) e 50% de RAP (Mistura IV). Os resultados obtidos para o RT demonstraram um aumento de acordo com o aumento do teor de fresado, exceto a mistura II onde o valor foi igual ao da mistura III, conforme pode ser observado na Figura 8. O MR das misturas estudadas apresentou um aumento na rigidez das misturas com o aumento do teor de fresado. Para a vida de fadiga as amostras apresentaram uma necessidade no aumento do número de golpes para levar os corpos de prova ao trincamento, ou seja, maiores teores de fresado apresentaram maior vida de fadiga, demonstrando que um aumento na rigidez reflete na fadiga.

Figura 8 – Valores de RT para as misturas estudadas



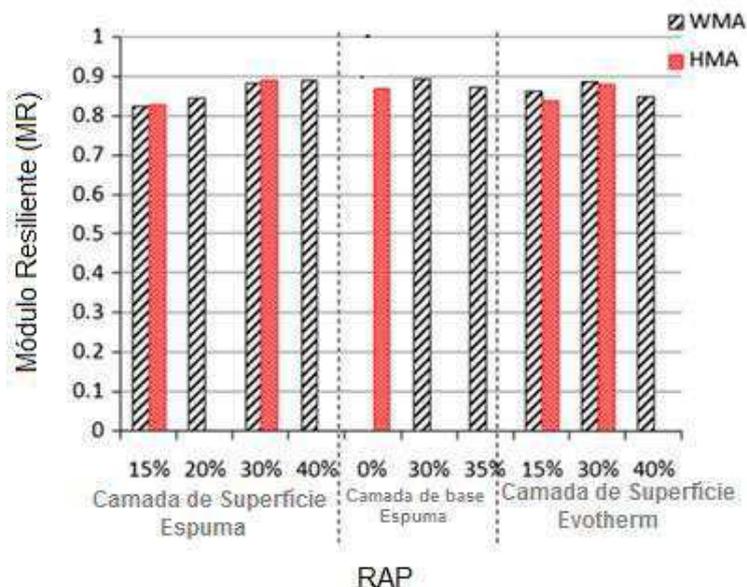
Fonte: LIMA, 2003

Al-Qadiet *et al.* (2012) que verificaram a utilização 0%, 30%, 40% e 50% de RAP na mistura, sendo os testes conduzidos de susceptibilidade a umidade, *Flow Number*, módulo complexo, fadiga, flexão semicircular e rastreamento de roda. O estudo conduziu que todas as misturas com esses teores de RAP tiveram desempenho igual ou melhor do que a mistura sem material fresado, mostrando eficácia para atender aos requisitos de desempenho em campo desejado de acordo com o agente rejuvenescedor adequado.

Zhao *et al.* (2013) avaliaram os efeitos do comportamento mecânico em misturas mornas e quentes com teores variando entre 15% e 40% de RAP, com uma combinação de espuma de asfalto e agente de mistura morna Evotherm®, para diferentes tipos de camadas (superfície e base). Os autores verificaram que as misturas mornas apresentaram menor resistência à deformação permanente do que as misturas quentes. Para o módulo resiliente os dados obtidos não apresentaram diferença significativa de resiliência entre as misturas mornas e quentes, de acordo com a Figura 9, indicando que a técnica empregada pode não

afetar nesse aspecto. Em relação a resistência a fadiga verificou-se que houve um aumento para misturas mornas e diminuição para misturas quentes, no entanto, o efeito do RAP pode ser comprometido para teores acima de 30%. As misturas mornas com alto teor de material fresado demonstraram resistência à fadiga maior que misturas quentes com baixo teor de RAP, mostrando que não há grandes preocupações em relação à trincas e fadiga de misturas mornas com alto teor de RAP.

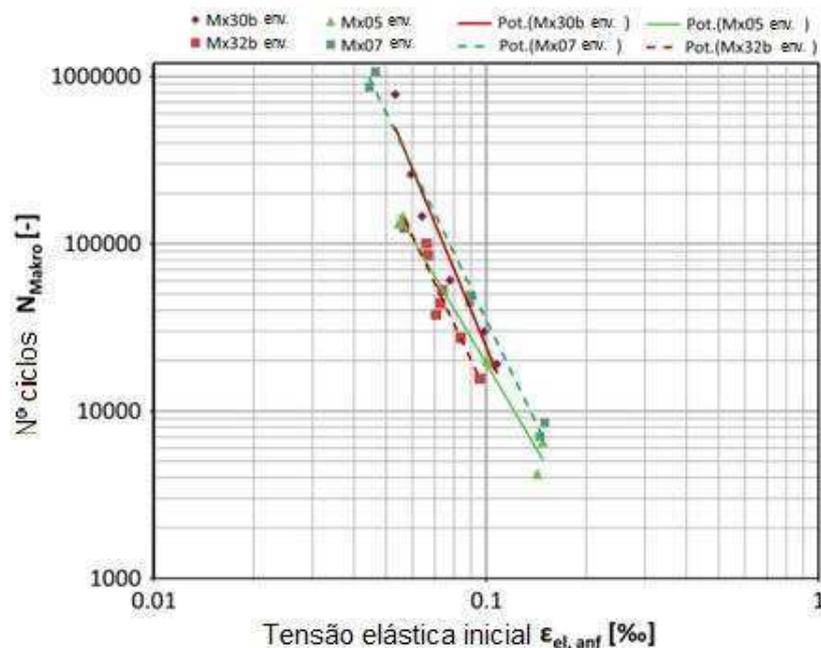
Figura 9 – Resultados de MR



Fonte: Adaptado de ZHAO *et al.*, 2013

Poulikakos *et al.* (2014) verificaram que uma mistura asfáltica com um teor de 40% de RAP teve melhor desempenho em relação à fadiga que a mistura convencional. Em comparação a uma mistura asfáltica de módulo elevado, a mistura sem RAP teve um melhor desempenho à fadiga, como pode ser observado na Figura 10. O módulo de rigidez aumentou com a adição de RAP para altas temperaturas e não foi afetado às baixas temperaturas.

Figura 10 - Comportamento à fadiga; Mx05 sem RAP e Mx07 com 40% de RAP; Mx 30 sem RAP e Mx32 com 40% de RAP ambos envelhecidos



Fonte: POULIKAKOS *et al*, 2014

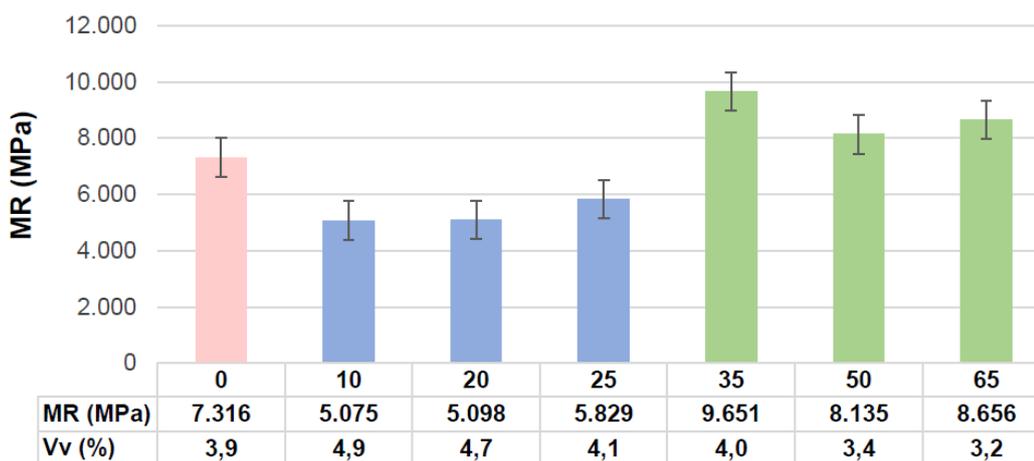
Segundo *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre o potencial de utilização de diferentes misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de RAP como camada de base e de ligação em pavimentos asfálticos, sendo 3 misturas, uma com 100% de RAP, outra com 75% de RAP e 25% de agregados naturais e outra com 75% de RAP e 25% de agregados do tipo refugo de usina de asfalto, como alternativa para uso em camadas de elevado módulo de elasticidade em pavimentos flexíveis, utilizando o software PMG/CAP3D. Os valores dos deslocamentos, das deformações e das tensões obtidos para diferentes estruturas de pavimentos asfálticos compostos por essas misturas foram avaliados a partir do dimensionamento de estruturas e, a partir disso, o tráfego que essas estruturas eram capazes de suportar foi calculado, demonstrando a redução do potencial de dano por fadiga e minimização das deformações por tração no fundo da camada de revestimento. A mistura com 100% de RAP proporciona uma maior economia de materiais virgens em comparação as demais misturas sem haver perda do ponto de vista estrutural. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas recicladas a quente compostas por alto teor de RAP podem compor estruturas em rodovias de tráfego médio e alto.

Em Centofante *et al.* (2018) foram avaliadas misturas contendo 10%, 20% e 30% de RAP comparadas a uma mistura de referência sem adição de fresado, sendo possível observar uma importante economia do teor de ligante adicionado, que variou entre 12,9% até 35,7%. O estudo ainda apresentou que a adição do RAP aumenta a rigidez das misturas

como esperado; no ensaio de cântabro não houve problemas significativos de adesividade e desgaste, não comprometendo a utilização do material.

Suzuki (2019) analisou o efeito de diferentes teores de RAP na dosagem e no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente. Neste foram avaliadas misturas com a incorporação de 0%, 10%, 20%, 25%, 35%, 50% e 65% de RAP, sem adição de agente rejuvenescedor, e depois foi avaliado o comportamento em misturas com 25% e 50% de material fresado com a adição de um agente rejuvenescedor de base vegetal. Em todas as misturas, em relação aos ensaios de resistência a tração por compressão diametral e dano por umidade induzida, atenderam aos parâmetros estabelecidos pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) e do DER/SP (Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo). Foi observado um aumento dos módulos de resiliência para as misturas com altos teores de RAP conforme Figura 11, bem como um aumento dos módulos dinâmicos nas zonas de temperaturas elevadas, indicando boa resistência à deformação permanente, o que foi possível verificar devido aos resultados obtidos pelo *Flow Number*. Em relação a vida de fadiga, foi possível concluir que misturas com alto teor de material fresado possui propriedades semelhantes a uma mistura convencional, ou até melhor, uma vez adicionado o agente rejuvenescedor.

Figura 11 – Módulos de resiliência (a 25°C) das misturas recicladas



Fonte: SUZUKI, 2019

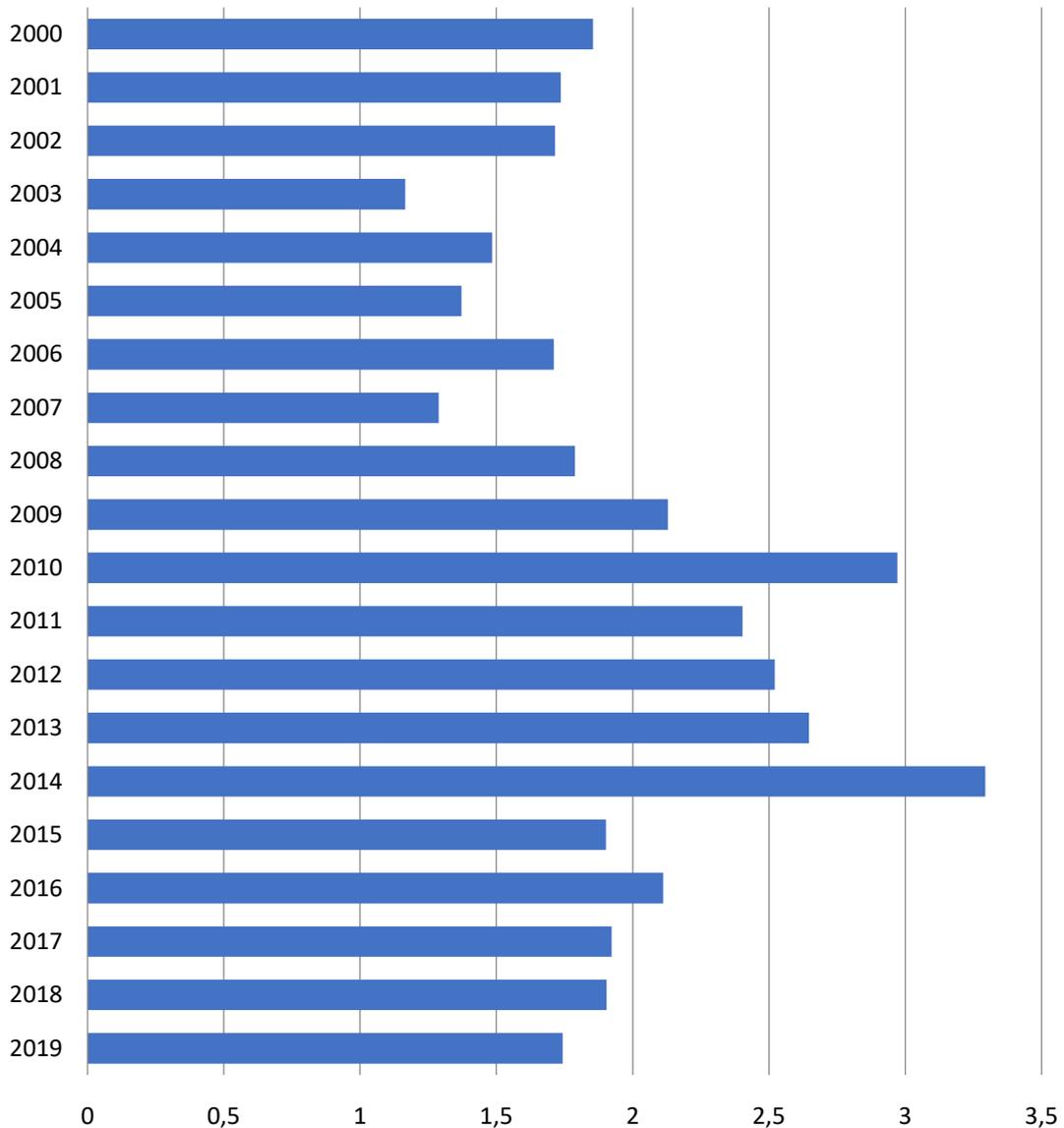
2.4 Ligante Asfáltico

No Brasil, apenas 12,35% da malha rodoviária é pavimentada, no entanto 95% da malha rodoviária pavimentada é constituída por pavimentos flexíveis, sendo o CAP o principal tipo de asfalto empregado na pavimentação (CNT, 2021).

O ligante asfáltico é caracterizado como um adesivo pouco reativo, termoviscoelástico, impermeável à água, semissólido em baixas temperaturas, viscoelástico em temperatura ambiente e líquido em altas temperaturas. Por possuir uma reatividade química pequena a muitos agentes, não significa que não possa sofrer envelhecimento por oxidação por meio do contato com o ar e a água (BERNUCI *et al.*, 2008). Este é derivado da destilação do petróleo e produzido em quatro padrões considerando os graus de penetração e viscosidade, de acordo com a Resolução da ANP nº19 de 11/07/2005 e DNIT EM 095/2006, sendo eles os ligantes 30/45, 50/70, 85/100 e 150/200.

Com base em dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2021) o consumo de ligante asfáltico em 2000 era anualmente de 1,853 bilhão de Kg. Um aumento do volume de ligante asfáltico consumido indica um maior investimento em infraestrutura no país. Em 2014, houve um recorde sendo absorvido pelo mercado brasileiro 3,294 bilhões de Kg, indicando crescimento de 4,3% ao ano nesses 14 anos. A Figura 12 demonstra essa evolução.

Figura 12–Consumo de asfalto no Brasil em bilhões de kg por ano



Fonte: ANP, 2019

A precificação do ligante asfáltico depende das distâncias entre refinarias, distribuidores e consumidores finais, e de acordo com a CNT (2019) o ligante asfáltico vem sofrendo aumentos desde 2014, sendo o maior responsável as políticas de reajustamento de preços adotadas pela Petrobras e o mercado internacional de petróleo. Os aumentos sucessivos do preço impactam diretamente a sociedade, tendo em vista que o valor ajustado pela Petrobras é repassado para as distribuidoras, que por sua vez repassam para as construtoras, e assim para o contratante.

Mesmo com a queda do consumo nos últimos anos a possibilidade de crescente consumo de ligante asfáltico não está diretamente relacionada à necessidade de novos

pavimentos, mas também a conservação e restauração das rodovias já existentes no país, ainda mais quando esta apresenta muitas necessidades de melhorias. No entanto, o aumento dos preços do asfalto aumenta conseqüentemente o valor para execução de obras de construção e manutenção, diminuindo a quantidade de serviços que poderão ser prestados, tendendo a acarretar uma piora na qualidade das rodovias (CNT, 2019).

2.5 Agente Rejuvenescedor

A deterioração do pavimento ao longo da sua vida útil ocasiona a perda de propriedades reológicas e o enrijecimento do ligante asfáltico. Para repor essas características perdidas pode ser utilizado um repositor da consistência original do ligante denominado de Agente Rejuvenescedor (AR).

Os AR's ajudam a deixar o ligante com uma menor viscosidade, melhoram a flexibilidade e reduzem a fragilidade do pavimento influenciando diretamente na rigidez final da mistura asfáltica. A medida que o ligante asfáltico envelhece os seus compostos aromáticos são transformados em resinas e essas resinas se convertem em asfaltenos por influência do oxigênio, reduzindo assim a proporção de maltenos para asfaltenos, refletindo diretamente numa maior viscosidade e redução da ductilidade do ligante. Os agentes rejuvenescedores são compostos, basicamente, por lubrificantes e óleos extensores, que possuem uma grande quantidade de maltenos. O Quadro 1 apresenta as cinco maiores categorias de agentes rejuvenescedores (NCAT, 2021).

Quadro 1 – Tipos de agentes rejuvenescedores

Categoria	Descrição
Óleos parafínicos	Óleos lubrificantes usados, refinados
Extratos aromáticos	Produtos petrolíferos refinados com componentes aromáticos polares
Óleos natênicos	Hidrocarbonetos modificados para modificação de asfaltos
Triglicerídeos e ácidos graxos	Derivados de óleos vegetais
Óleo de pinho	Subprodutos da indústria de papel (Mesma família química dos agentes de adesividade líquidos e emulsionantes)

Fonte: Adaptado de NCAT, 2014

De acordo com Suzuki (2019) agentes rejuvenescedores como óleos de base biológica (derivados de gorduras e bio-solventes) e óleos vegetais modificados (compostos por componentes de óleos vegetais básicos e produtos químicos) vem sendo produzidos no mercado, porém a maioria são patenteados, dificultando uma descrição química detalhada de sua composição.

No Brasil, os principais tipos de agentes utilizados são à base de óleo de xisto e extrato aromático de neutro pesado. A Tabela 2 apresenta a especificação brasileira dos agentes

rejuvenescedores, sendo a escala de concentração AR-1 maior concentração de óleo de xisto e AR-500 menor concentração.

Tabela 2 – Especificação brasileira para Agentes Rejuvenescedores

Características	Unid	Especificações					
		AR-1	AR-5	AR-25	AR-75	AR-250	AR-500
		Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.
		Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
Viscosidade cinemática, 60°C	CST	50 175	176 900	901 4500	4501 12500	12501 37500	37501 60000
Ponto de fulgor (VAC) ¹	°C	218	218	218	218	218	218
Saturados	% massa	30	30	30	30	30	30
ECA, 163°C (Efeito do calor e do ar)							
Razão viscosidade ²	-	4	4	4	4	4	4
Variação de massa, Max.	de %	4	4	3	3	3	3
Densidade 20/4°C		Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar

Fonte: DNC 733/97

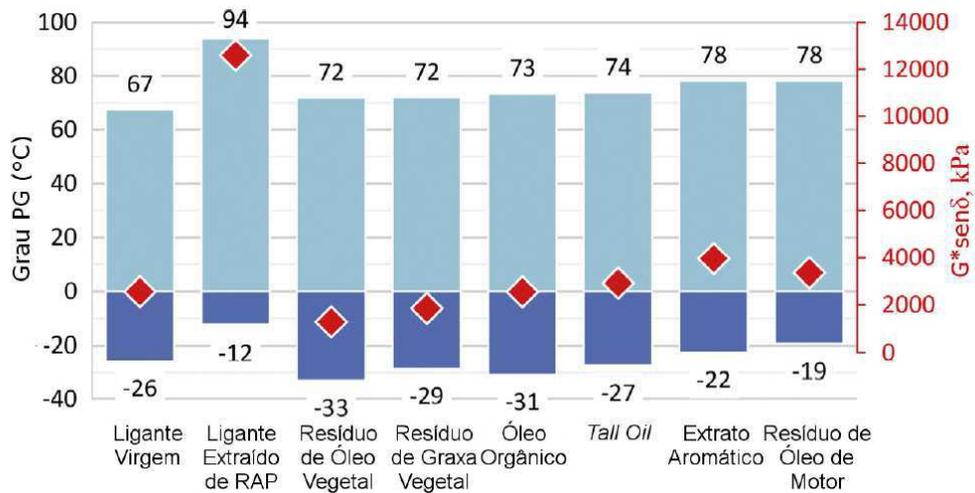
¹VAC – Vaso Aberto de Cleveland.

²Razão de viscosidade = $\frac{\text{Viscosidade a } 60^{\circ}\text{C no pó RT FOT ou TFOT}}{\text{Viscosidade a } 60^{\circ}\text{C no líquido RT FOT ou TFOT}}$

O uso de agentes rejuvenescedores alternativos vem sendo estudado com a intenção de melhorar as propriedades das misturas asfálticas envelhecidas presentes no RAP, por exemplo, resíduos de óleo vegetal, resíduos de óleo de motor, resíduo de graxa vegetal, óleo orgânico produzido a partir da biomassa de pinheiro e resíduo de óleo de algodão.

Zaumanis *et al.* (2014) analisaram a influência de seis tipos de rejuvenescedores: resíduo de óleo vegetal, resíduo de graxa vegetal, óleo orgânico produzido a partir da biomassa de pinheiro, *tall oil* obtidos durante o processamento do papel Kraft, extrato aromático e resíduo de óleo de motor, com intenção de utilização em misturas asfálticas com 100% de RAP, em que cada rejuvenescedor foi dosado a 12% da massa do ligante. Cinco rejuvenescedores reduziram o grau de PG de 94-12, do aglutinante extraído, para PG 64-22, exceto o resíduo do óleo de motor, que precisa ser adicionado em maior quantidade para atingir esse resultado, como pode ser observado na Figura 13, onde o parâmetro de fadiga de temperatura superpave a 25°C estão indicados em losangos.

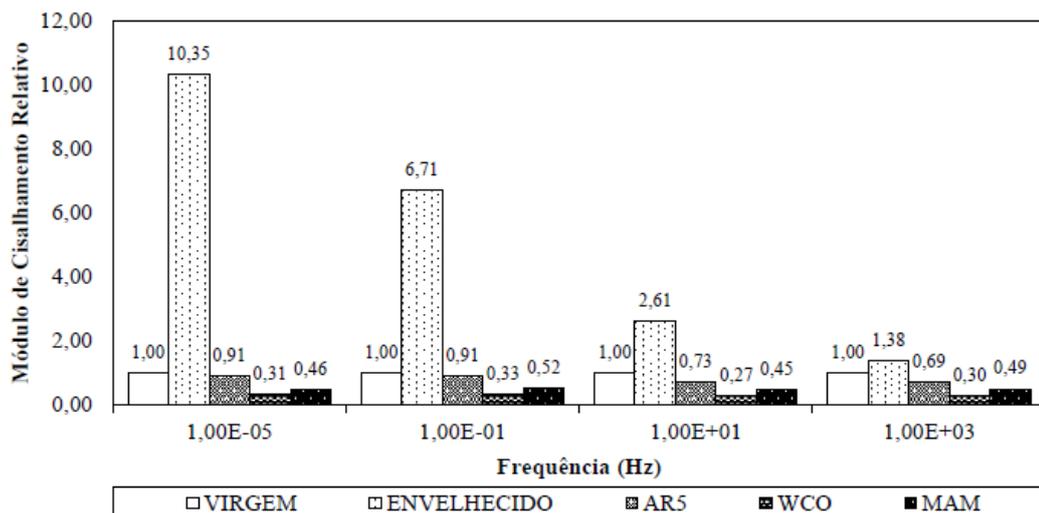
Figura 13 – Modificação do grau de PG de ligantes asfálticos com adição de agentes rejuvenescedores



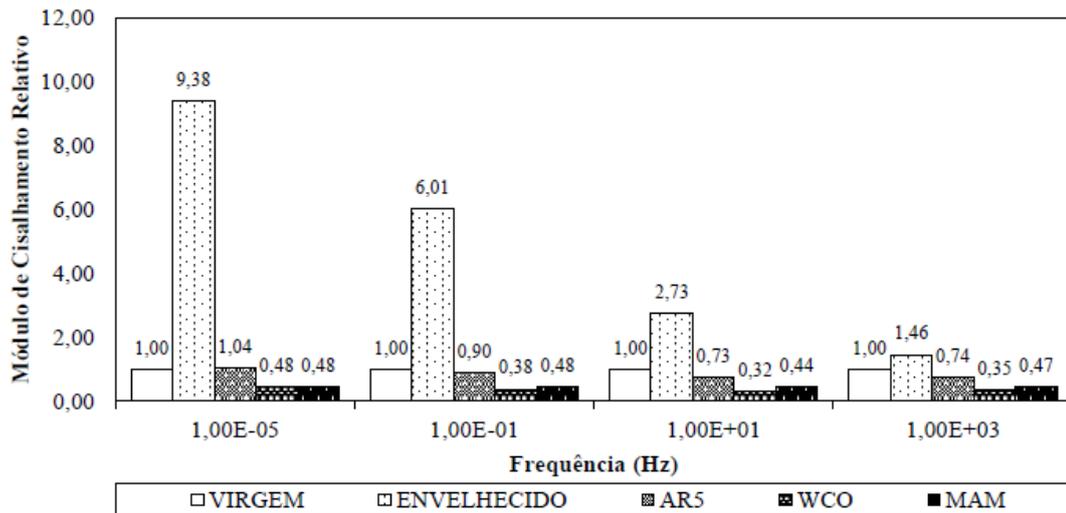
Fonte: ZAUMANIS et al, 2014

Osmari (2016) analisou o efeito de três agentes rejuvenescedores, um comercial (AR-5) e dois alternativos (resíduo de óleo de cozinha – WCO e óleo de mamona – MAM), no processo de rejuvenescimento de ligantes asfálticos em amostras envelhecidas, onde diferentes teores dos agentes foram avaliados, o AR-5 com 12% para o CAP 50/70 e 30/45, o resíduo de óleo de cozinha e óleo de mamona com 7% para o CAP 50/70 e 8% para o CAP 30/45, indicando que o resíduo de óleo de cozinha e o óleo de mamona apresentam potencial de rejuvenescimento em necessitarem de menos teores para aplicação. Como esperado, as amostras envelhecidas apresentaram maior rigidez do que as originais enquanto as amostras rejuvenescidas com AR-5 mostraram uma boa recuperação dessa propriedade sendo que os agentes alternativos reduziram ainda mais essa rigidez (Figura 14).

Figura 14 – Módulo de cisalhamento dinâmico relativo em relação ao ligante virgem do CAP (a) 30/45 e (b) 50/70.



(a)



(b)

Fonte: OSMARI, 2016

Ji *et al.* (2017) investigaram a adição de óleos residuais de soja e de milho, com os teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% cada agente, em relação ao peso do ligante, para recuperar as propriedades reológicas de um ligante asfáltico envelhecido, extraído do RAP. Os resultados demonstram que os rejuvenescedores de óleo vegetal podem diminuir efetivamente a viscosidade e a rigidez do ligante de asfalto envelhecido, o que é benéfico para a resistência a fadiga e a rachaduras em baixas temperaturas.

O agente a ser utilizado, demonstra um importante fator a ser considerado para o entendimento do comportamento das misturas asfálticas recuperadas pelo rejuvenescimento do ligante envelhecido, com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas e químicas possibilitando a análise dos efeitos das adições desses agentes nos materiais asfálticos.

2.5.1 Glicerina

Segundo Beatriz *et al.* (2011) o termo glicerina se refere ao glicerol na sua forma comercial, com pureza acima de 95%. A glicerina vegetal é derivada de matérias-primas de origem vegetal e de fontes renováveis, obtida a partir de hidrólise de triglicerídeos vegetais e de isolamento dos ácidos graxos, cujos processos posteriores de purificação e destilação permitem o atendimento a diversos destinos, em virtude de sua pureza elevada. No processo de produção do biodiesel, após a reação entre um óleo ou gordura de origem animal ou vegetal, obtém-se o biodiesel e a glicerina, em uma proporção de 90% e 10%.

O uso comercial da glicerina está condicionado ao seu grau de pureza, uma vez que os preços da glicerina originada por meio da produção de biodiesel vêm diminuindo devido à grande oferta no mercado. Em fevereiro/2020, a tonelada da glicerina bruta perdeu 4,1% do

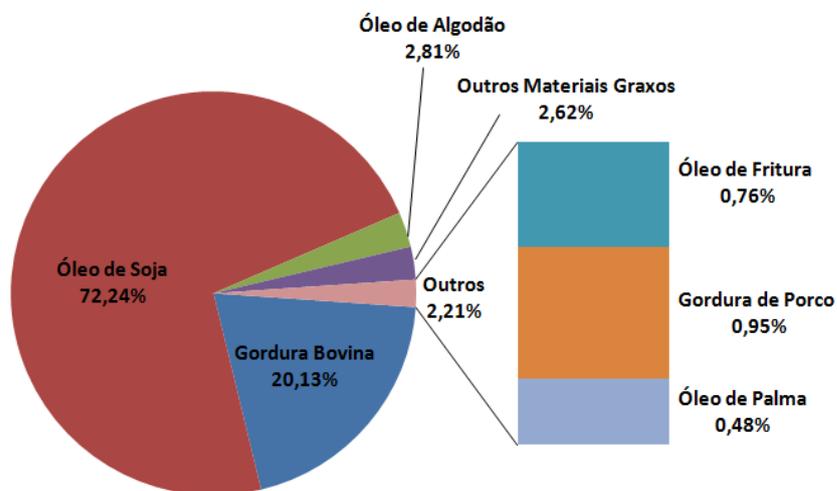
seu valor em relação a janeiro/2020 fechando o mês cotada em U\$138,62, demonstrando uma queda persistente nos preços desde o primeiro trimestre de 2018 (BIODISELBR, 2020).

O aumento da demanda de biodiesel ocasiona no aumento da produção da glicerina visto que é o principal coproduto do biodiesel, pois independente dos processos de produção, ela é o resíduo, na forma de glicerina bruta (PALHA e SILVA, 2016). Estima-se que em 2020 foram produzidas 640 mil toneladas, sendo a sua exportação total de 328 mil toneladas (EPE, 2021). De acordo com Schwengberet *al.* (2016) o mercado brasileiro é capaz de absorver apenas 40 mil toneladas por ano, não tendo um descarte correto para o excedente.

De acordo com a ANP (2016) o Brasil possui uma diversidade de espécies vegetais e gordura animal que podem ser utilizadas na produção do biodiesel, conforme destacado na Figura 15.

Figura 15 – Matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel

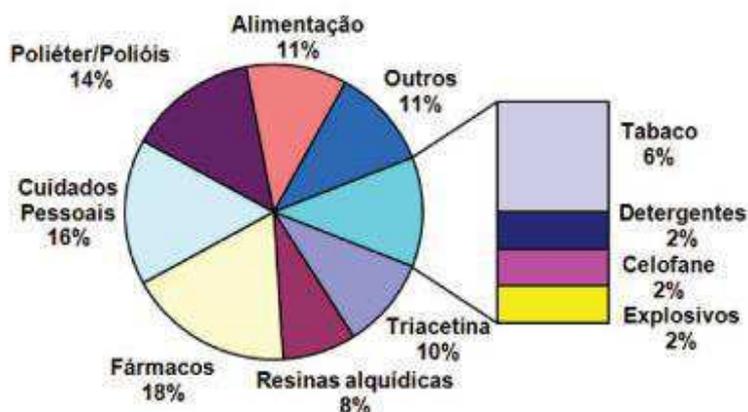
Janeiro/2016



Fonte: Adaptado de ANP, 2016

A glicerina é um líquido incolor, inodoro, viscoso, de sabor adocicado, higroscópico e não corrosivo, que possui inúmeras aplicações no mercado, demonstradas na Figura 16 (BEATRIZ, 2011).

Figura 16 – Mercado e uso do glicerol (volumes e usos industriais)



Fonte: BEATRIZ, 2011

O uso da glicerina ainda não é difundido como agente rejuvenescedor na indústria da pavimentação, mas um estudo patenteado realizado por Davis *et al.* (2014), que visa a utilização de um ligante modificado com glicerol em uma mistura asfáltica com alto teor de material fresado, se refere também ao uso do glicerol como agente corretivo da trabalhabilidade e para promover a resistência à rachadura em baixa temperatura e resistência a tensão de uma mistura com alto teor de material reciclado. No estudo, foram utilizados percentuais de 1% a 4% em peso do ligante, e os ensaios mecânicos realizados demonstraram que as misturas asfálticas com o glicerol oferecem desempenhos semelhantes ou ainda melhores do que em misturas sem a adição desse agente.

2.6 Considerações Finais

A partir da literatura pode-se observar que o uso de RAP tem benefícios da ordem ambiental e econômica, ao passo em que proporciona uma alternativa sustentável para a pavimentação, no entanto a sua utilização ainda requer maiores investigações relacionadas ao seu desempenho, uma vez que misturas recicladas demonstram um comportamento rígido.

Com o intuito de melhorar significativamente as propriedades reológicas do ligante e mecânica das misturas asfálticas recicladas produzidas, a adição de agentes rejuvenescedores vem sendo estudada. Os rejuvenescedores visam diminuir a rigidez da mistura reciclada por consequência do material fresado, visto que a viscosidade inferior do rejuvenescedor garante uma maior afinidade do ligante com os agregados podendo tornar essas misturas menos propensas a degradação.

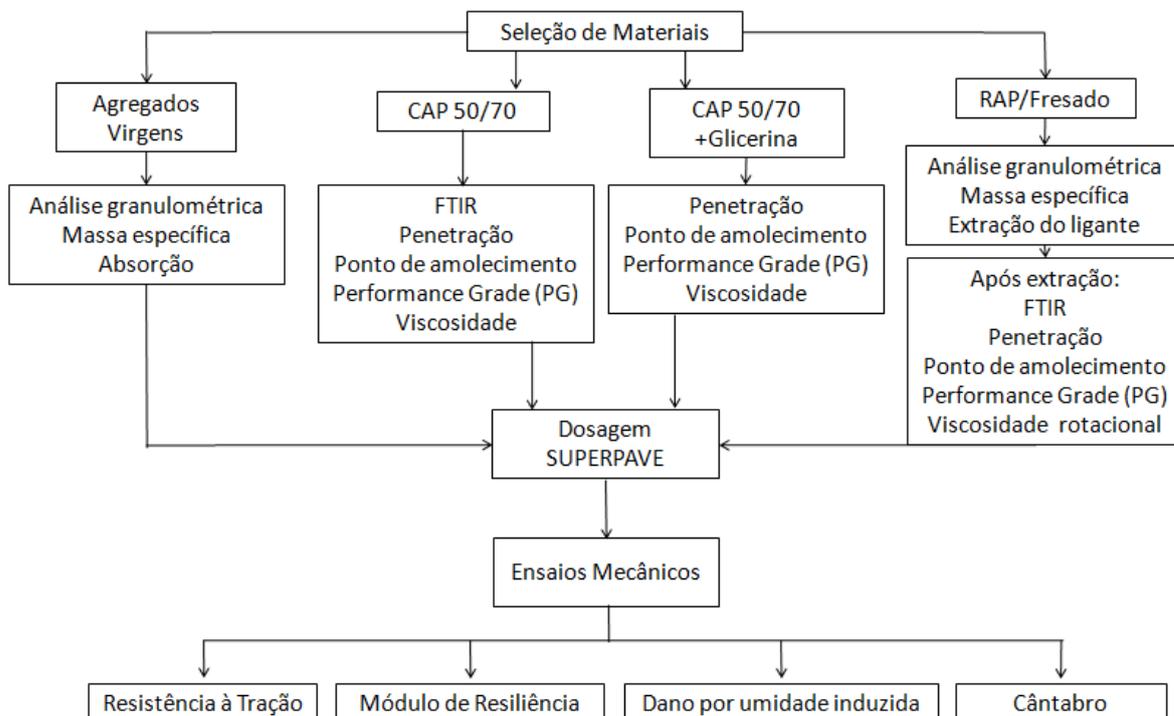
O uso de materiais alternativos como rejuvenescedor de ligantes podem contribuir para minimização de agressões ao ambiente com os descartes irregulares, tanto do RAP, quanto

do agente alternativo escolhido. Assim, a glicerina que é um coproduto do biodiesel, produzida em larga escala, apresenta ser uma solução viável, por ser de baixo custo, constituindo-se em uma opção real e economicamente viável para atuar como precursor de produtos com alto valor agregado, como o asfalto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos que compõem a matriz experimental desta pesquisa. O Fluxograma da Figura 17 apresenta o esquema das etapas desenvolvidas no presente estudo.

Figura 17 – Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa



Cada corpo de prova, exceto a amostra de referência, é composto de 30% de material fresado, e há 2 amostras, uma com 4% e outra com 6% de glicerina que foi inserida junto ao ligante virgem CAP 50-70. A Tabela 3 apresenta as nomenclaturas das misturas moldadas.

Tabela 3 – Composição das amostras

Nomenclatura da amostra	Composição
AREF	0% RAP + 0% glicerina
ARAP30+0G	30% RAP + 0% glicerina
ARAP30+4G	30% RAP + 4% glicerina
ARAP30+6G	30% RAP + 6% glicerina

3.1 Materiais

3.1.1 RAP

O RAP utilizado neste trabalho é resultado da fresagem dos trechos 49,0 a 50,8Km crescente, 49,0 a 50,0Km e 62,0 a 60,0Km decrescente, da rodovia BR-230, localizada no estado da Paraíba e encontrava-se acondicionado em pilha exposta (Figura 18), na Unidade Local do município de Santa Rita, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

As amostras foram separadas para os ensaios de caracterização do RAP, como a massa específica máxima medida, determinação do teor de ligante e análise granulométrica antes e após extração de ligante.

Figura 18 – Material fresado utilizado na pesquisa

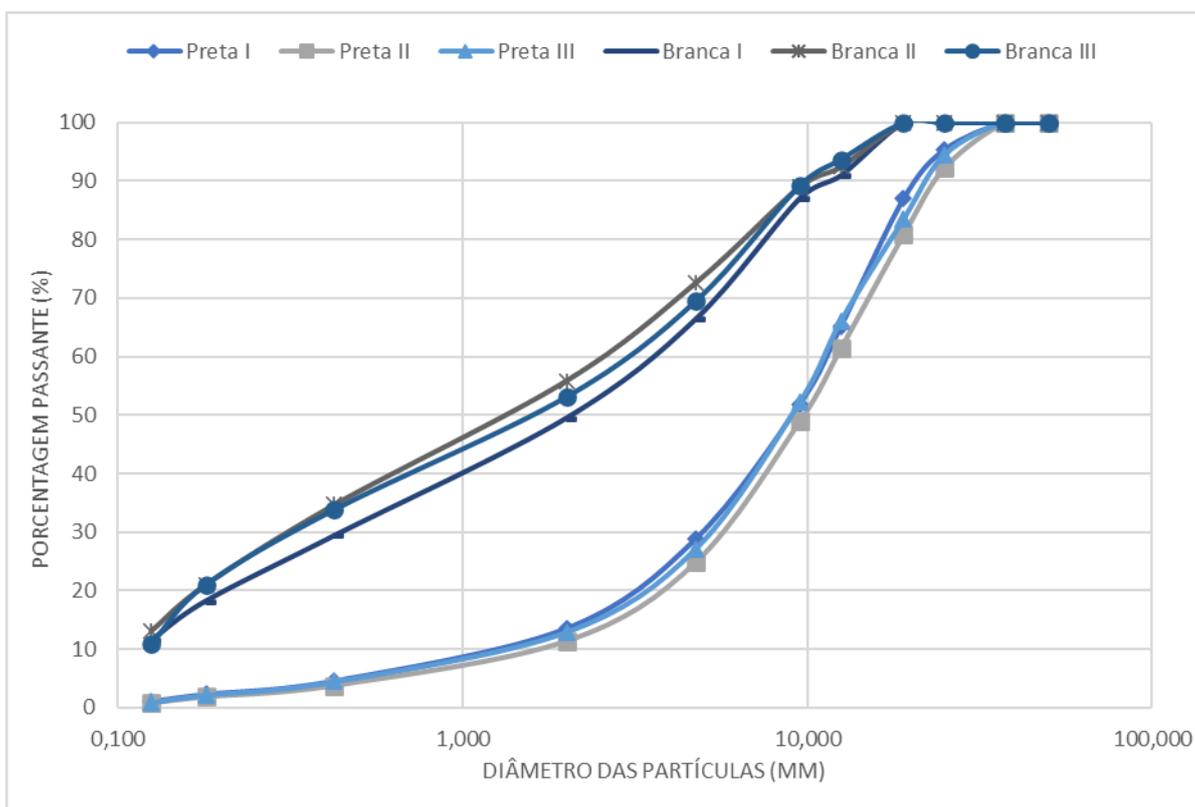


A determinação da massa específica máxima medida (G_{mm}) foi realizada com duas amostras, apresentando um valor médio de $2,3\text{g/cm}^3$ (Tabela 4), em que também está apresentado o teor de ligante determinado após a extração do ligante. Para a extração do ligante do material fresado foi utilizado um extrator de betume do tipo Rotarex, sendo o solvente o tricloroetileno, conforme o procedimento especificado pela norma DNIT-ME 053/1994. Para caracterização granulométrica separaram-se três amostras do material reciclado, onde a análise foi realizada antes (granulometria preta) e após a extração do ligante (granulometria branca), apresentadas na Figura 19.

Tabela 4 – Massa específica máxima medida e teor do ligante

Parâmetro ensaiado	Norma	Amostra	
		I	II
Massa específica máxima medida (g/cm^3)	$G_{mmR\text{AP}}$ AASHTO T 209 2012	2,3	2,3
Teor de ligante (%)	$P_{bR\text{AP}}$ DNIT-ME 083/98	4,4	

Figura 19 – Granulometria do RAP antes e após extração do ligante



De acordo com a Figura 19, observa-se que as curvas granulométricas são bastantes semelhantes umas às outras, o que permite o enquadramento na faixa I da norma DNIT 035/2018 – microrrevestimento para rodovias com médio volume de tráfego, todavia o teor de ligante especificado pela norma variaria entre 7,5 e 13%, enquanto o obtido foi 4,4%.

Para a realização da caracterização do ligante do RAP, a solução de ligante dissolvida em tricloroetileno foi submetida à rotoevaporação no laboratório SupraMat, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), para a sua recuperação.

O equipamento utilizado foi o Rotavapor R-300 Buchi, com bomba de vácuo V-300 e Interface I-30, conforme apresentado na Figura 20. O balão rotativo foi parcialmente imerso em banho aquecido a 60°C, até que não houvesse mais condensação de tricloroetileno e, em seguida, a amostra recuperada foi submetida ao vácuo por 5 horas, com temperatura entre 80°C e 85°C, de acordo com a Figura 21.

Figura 20 – Recuperação do ligante em Rotavapor R-300 Buchi



Figura 21 – Ligante recuperado na rotoevaporação e estufa a vácuo



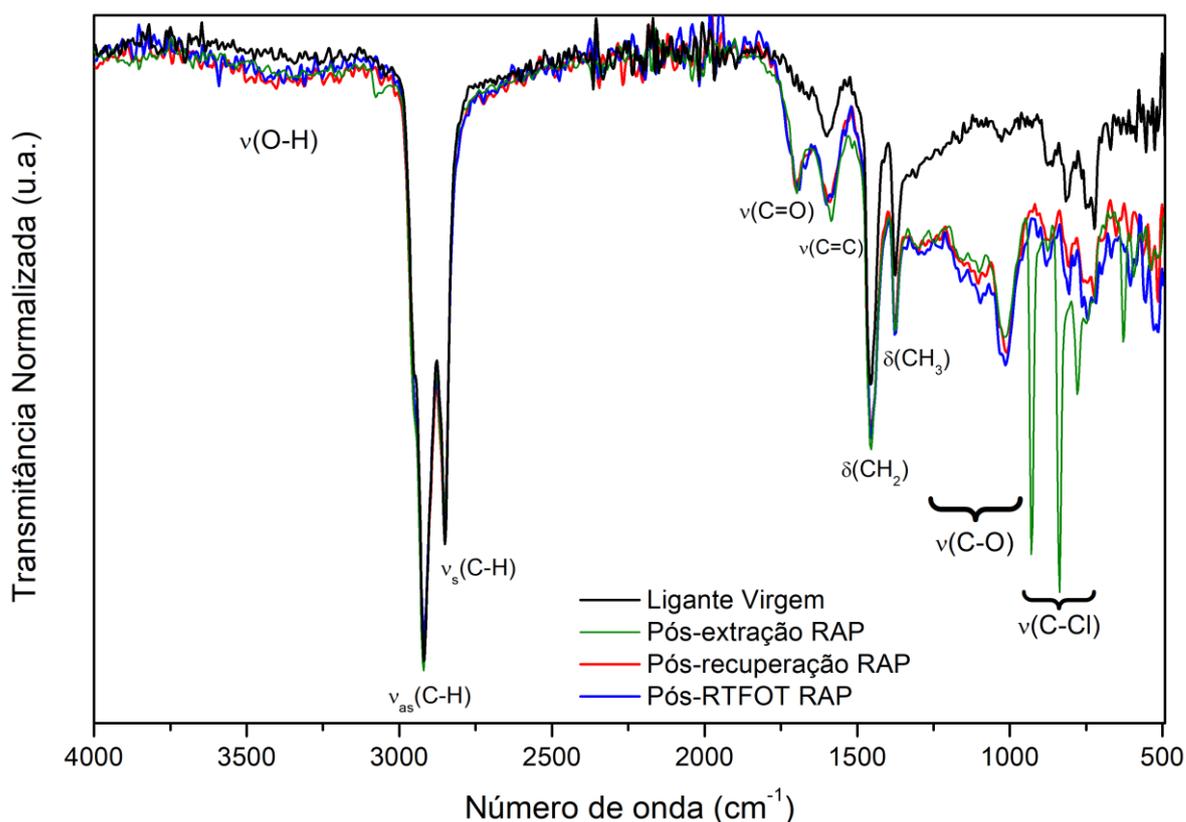
Após o procedimento de recuperação do ligante foi realizado o procedimento de RTFO (*Rolling ThinFilmOven*), no Laboratório de Engenharia de Pavimento – LEP, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para que, caso houvesse solvente residual, fosse removido. Para a avaliação da efetividade do procedimento de recuperação do ligante, foram obtidas 3 amostras representativas:

- (i) após a extração no rotarex;
- (ii) após a rotoevaporação e estufa a vácuo;
- (iii) após o RTFO.

Essas amostras, juntamente com uma amostra de ligante virgem (50/70), foram submetidas ao ensaio de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), com o Espectrômetro Bruker Vertex 70, sonda ATR, e faixa de 4000 a 500 cm^{-1} , no Laboratório LAMMEN da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), verificando assim o estado de envelhecimento e a remoção do ligante.

Observa-se no espectro apresentado na Figura 22 que a amostra (i) apresenta picos de transmitância em 780, 845 e 930 cm^{-1} , relativos as ligações C-Cl do solvente. Ao verificar na amostra (ii) que esses picos referentes ao tricloroetileno não são transmitidos, assim como na amostra (iii), pode-se concluir que o método de recuperação do ligante utilizado foi suficiente para retirada do solvente.

Figura 22–Espectro FTIR das amostras



Na Figura 22 ainda é possível observar a presença de picos de hidroxila (O-H) na faixa de transmitância superior a 3000 cm^{-1} (banda leve), de carbonilas de cetonas (C=O) em torno de 1700 cm^{-1} e picos para estiramento simétrico de C-O em éteres e/ou álcoois na faixa entre 1020 e 1300 cm^{-1} , o que indica uma alta oxidação do ligante do RAP em relação ao ligante virgem 50/70.

Com o ligante recuperado foram realizados ensaios de viscosidade rotacional, para determinação das temperaturas de usinagem e compactação, penetração, ponto de

amolecimento e *Performance Grade*, cujos resultados e procedimentos normativos podem ser observados na Tabela 5 do próximo tópico.

3.1.2 Ligante Asfáltico

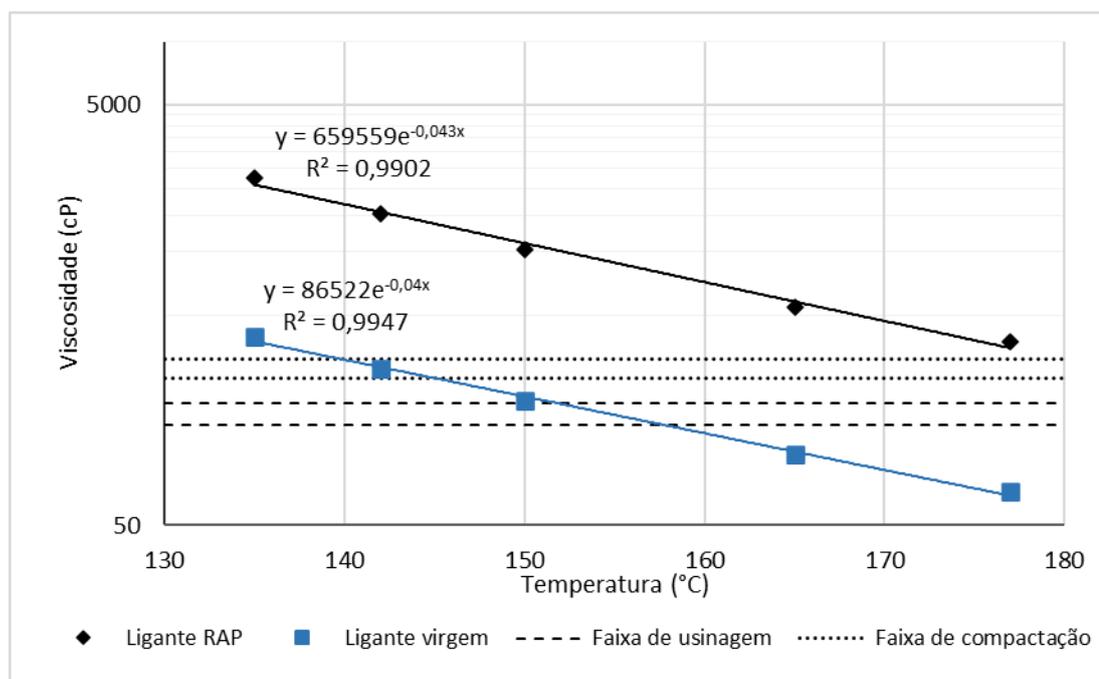
O ligante virgem utilizado nessa pesquisa foi o 50/70, em que teve suas características determinadas em laboratório, conforme mostra a Tabela 5, onde também estão descritos a caracterização reológica do ligante recuperado.

Tabela 5 – Caracterização dos ligantes recuperado e virgem

Ensaio	Resultado		
	Ligante Recuperado	Ligante virgem	
		Antes RTFO	Após RTFO
Penetração (mm⁻¹) DNIT 155/10 - ME	16,0	57	33
Penetração retida (%)	-	58,4	
Variação de massa (%)	-	0,4	
Ponto de amolecimento (°C) DNIT 131/10 - ME	71	52	58
Índice de Susceptibilidade térmica	0,54	-0,38	-
Performance Grade (°C) ASTM D6816/11	106	64	-
	135°C 2250	395,0	716,0
	142°C 1521	279,3	523,3
Viscosidade (cP) NBR 15184/05	150°C 1030	195,5	408,5
	165°C 550	108,7	131,7
	177°C 372,5	72,0	98,8

De acordo com o NCHRP Report 648 (2010), as temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas estão entre as faixas de viscosidade de 170±20 cP e 280±30 cP, no entanto observa-se por meio da Figura 23 que uma temperatura não pode ser determinada para o ligante do RAP.

Figura 23 – Curvas viscosidade versus temperatura para os ligantes virgem e recuperado do RAP



Com isso, as temperaturas de usinagem e compactação do ligante do RAP foi realizada com a equação 1 desenvolvida por Wu *et al.* (2007), apresentadas na Tabela 6, com os valores obtidos no gráfico da Figura 23 para a mistura de referência.

$$\ln T_b = W^{0,5} \ln T_r + (1 - W^{0,5}) \ln T_f \quad (\text{equação1})$$

Onde,

T_b é a temperatura ótima relevante da mistura de ligantes;

T_r é a temperatura ótima relevante do ligante do RAP;

T_f é a temperatura ótima relevante do ligante virgem;

W é o teor de RAP na mistura.

Tabela 6 - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas de referência e com RAP

Temperatura	AREF	ARAP30	Variação tolerável
Usinagem (°C)	156	175	±3°C
Compactação (°C)	143	163	±3°C

3.1.3 Agregados

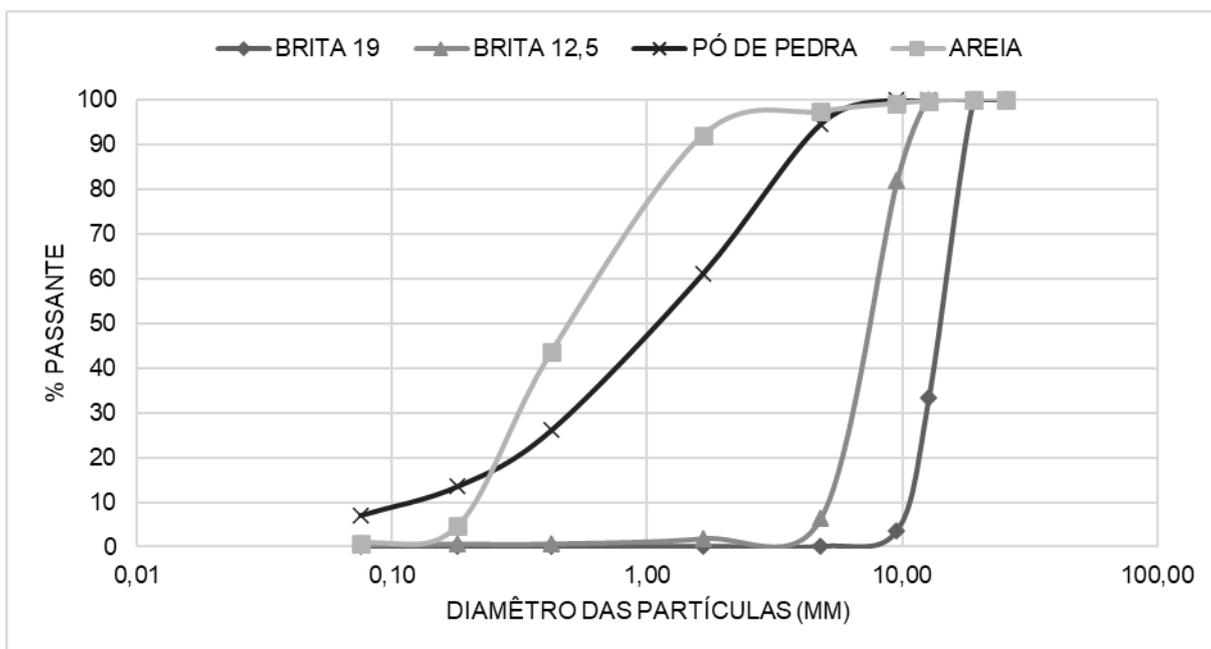
Os agregados graníticos a serem empregados são oriundos do trecho de 28,1 km em obra de triplicação da BR-230, entre os municípios de João Pessoa e Cabedelo, localizados no estado da Paraíba, nas graduações 19mm, 12,5mm e pó de pedra granítica. A areia é oriunda do Rio Paraíba, adquirida em comércio local. Na Tabela 7 pode ser observada as

propriedades físicas dos agregados, e na Figura 24 as distribuições granulométricas. O fíler utilizado também foi obtido em comércio local, sendo a Cal hidratada CH-1.

Tabela 7 – Caracterização física dos agregados

Ensaio	Norma	Resultados			
		Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)		2,668	2,665	2,513	2,626
Massa específica aparente (g/cm ³)	DNIT 411/2019 DNIT 413/2019	2,636	2,616	2,475	2,481
Absorção (%)		0,460	0,706	0,600	0,140
Equivalente areia (%)	DNIT 054/1997	-	-	65	61
Índice de forma	DNIT 086/1994	0,89	0,70	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT 035/1998	19,0	-	-	-

Figura 24 – Distribuição granulométrica



3.1.4 Glicerina

A glicerina foi selecionada como agente rejuvenescedor a fim de se obter melhorias na trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Esta foi adquirida em comércio local, em sua forma líquida, com 99% de pureza. No Quadro 2 são apresentadas algumas propriedades da glicerina, retiradas da Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ), concedida pela fabricante Paraíba Química (2018), na qual constam informações importantes sobre o produto.

Quadro 2 – Propriedades da glicerina

FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ	
1 – Identificação do Produto	
1.1 – Nome do produto:	Glicerina Bi destilada
2 – Composição e Informação Sobre os Ingredientes	
2.1 – Tipo de produto:	Preparado
2.2 – Natureza química:	Glicerina
2.3 – Descrição:	Uso diverso
3 – Identificação de Perigos	
3.1 – Perigos mais importantes:	Substância não inflamável
3.2 – Efeitos do produto:	O produto não causa danos aos olhos e a pele
4 – Propriedades Físico-Químicas	
4.1 – Estado físico:	Líquido viscoso
4.2 – Cor:	Transparente
4.3 – Odor:	Inodoro
5 – Estabilidade e Reatividade	
5.1 – Estabilidade:	Estável
5.2 – Reações Perigosas:	Nenhuma conhecida, desde que respeitada as condições normais de manipulação e armazenamento

Fonte: Adaptada da fabricante Paraíba Química

3.2 Métodos

3.2.1 Mistura do Ligante com a Glicerina

No processo de mistura do ligante a glicerina, foi utilizado um agitador mecânico FISATOM (Figura 25). Ao ligante CAP 50/70 adicionou-se a glicerina no teor máximo utilizado por Davis *et al.* (2014) que é 4% do peso do ligante, e o teor de 6% também foi analisado, por ser um teor que fosse possível observar as mudanças nas misturas sem ser muito próximo do valor de 4%, ou muito distante podendo ter uma mudança brusca em seu comportamento.

Figura 25 – Agitador mecânico FISATOM



A produção do ligante modificado foi baseada em método realizado por Cavalcante (2016), onde o procedimento de mistura do ligante com glicerina iniciou-se com uma temperatura de 130°C sendo mantida constante, onde gradativamente o teor de glicerina foi incorporado ao ligante, a uma velocidade de 500 rpm no misturador mecânico, por um tempo de mistura de 20 minutos.

3.2.2 Dosagem SUPERPAVE

As misturas foram dosadas segundo a metodologia SUPERPAVE, para nível de tráfego médio e alto, sendo a faixa adotada de revestimento, faixa C do DNIT – ES 031/2006.

Para a amostra de referência AREF foram realizadas três composições granulométricas que correspondem às curvas inferior, intermediária e superior, nos limites da faixa C do DNIT, conforme pode ser observado na Figura 26. Os corpos de prova com o teor de ligante estimado de 6% para as curvas, com os números de giro N_{inicial} (8 giros), N_{projeto} (100 giros) e $N_{\text{máximo}}$ (160 giros), compactados em Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), seguindo a norma ASTM D 6925-09, observado na Figura 27. Os parâmetros calculados para a escolha da melhor curva, que foi a intermediária por ser a que mais aproximou dos parâmetros SUPERPAVE, estão apresentados na Tabela 8.

Figura 26 – Curvas granulométricas superior, intermediária e inferior da amostra de referência

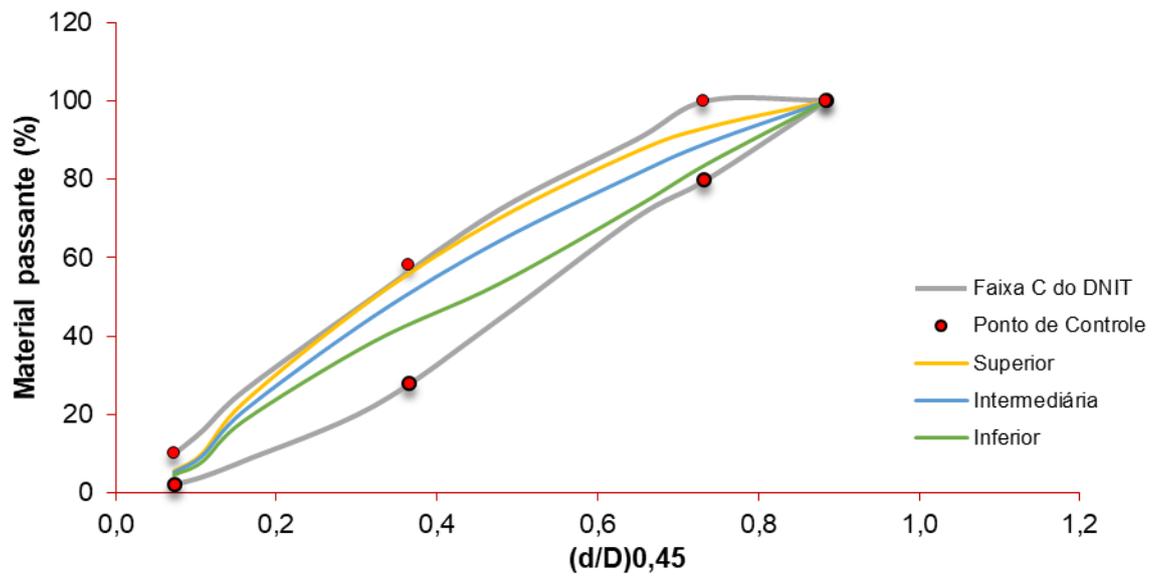


Figura 27 – Compactador Giratório SUPERPAVE



Tabela 8 – Parâmetros volumétricos das curvas superior, intermediária e inferior da amostra de referência

Curva	Teor de ligante (%)	%Gmm			VAM (%)	Vv (%)
		@N _{inicial}	@N _{projeto}	@N _{máximo}		
Inferior	6,0	93,2	98,2	99,1	15,90	1,77
Intermediária	6,0	88,6	96,2	98,3	16,31	3,72
Superior	6,0	89,4	95,1	96,4	17,14	4,8
Crítérios SUPERPAVE		<89,0	96,0	<98,0	≥13,0	4,0

As amostras contendo 30% de RAP (ARAP30+0G), 30% de RAP e 4% de glicerina (ARAP30+4G) e 30% de RAP e 6% de glicerina (ARAP30+6G) foram projetadas para que apresentassem composições parecidas com a curva escolhida da amostra de referência. Os percentuais dos materiais nas misturas estão apresentados na Tabela 9, bem como as distribuições granulométricas finais na Figura 28 e os teores e parâmetros volumétricos na Tabela 10.

Tabela 9 – Percentuais finais dos materiais nas misturas

Mistura	RAP (%)	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Fíller (%)
AREF	0	15,0	17,0	49,0	11,3	1,9
ARAP30+0G	30	13,2	13,2	28,3	9,4	1,9
ARAP30+4G	30	13,1	13,1	28	9,3	1,9
ARAP30+6G	30	13,3	13,3	28,4	9,5	1,9

Figura 28 – Curvas granulométricas finais das amostras de referência e com RAP e glicerina

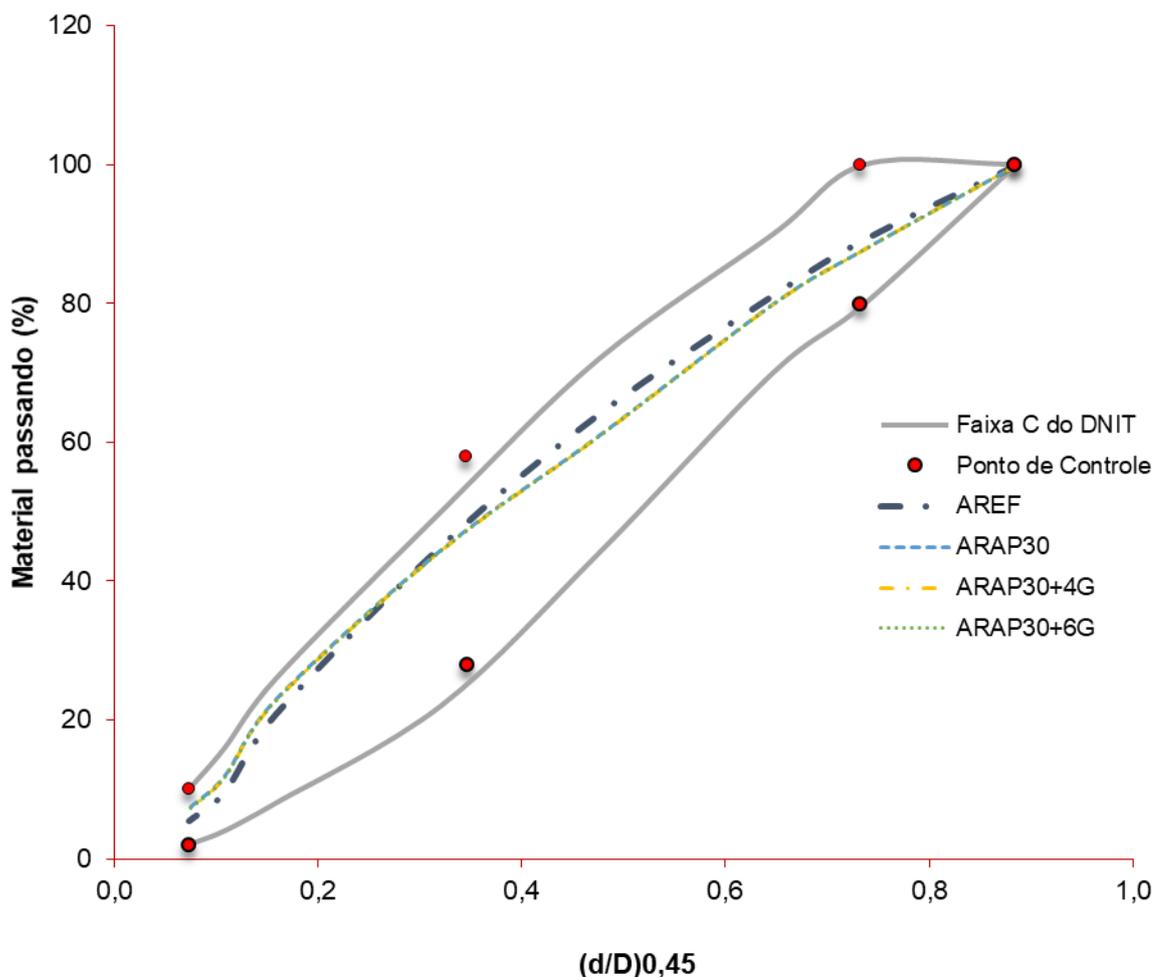


Tabela 10 – Parâmetros volumétricos finais das misturas

Mistura	Teor de ligante		%Gmm @N _{projeto}	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	P/A
	Total	Virgem					
AREF	5,8	5,8	96,5	19,72	3,9	67,17	0,9
ARAP30+0G	5,3	4,0	96,3	18,02	4,2	64,98	1,2
ARAP30+4G	5,6	4,3	96,0	16,73	4,0	74,10	1,1
ARAP30+6G	5,0	3,7	96,0	15,46	4,0	74,31	1,2
	Crítérios SUPERPAVE		96,0	≥13,0	4,0	65-75	0,6-1,2

Ao moldar os corpos de prova, foram medidos os parâmetros volumétricos (massa seca, massa submersa e massa saturada superfície seca) para obtenção do melhor teor, sendo o mais próximo do volume de vazios de 4%. As misturas com RAP apresentaram um menor teor de ligante total, podendo ser associada aos agregados da mistura já estarem envolvidos com o ligante envelhecido, necessitando assim de uma menor quantidade. Durante a

usinagem, o ligante com teor de 4% de glicerina apresentava formação de vapores maior que as demais misturas, o que pode indicar a volatilização da glicerina, evidenciado um maior teor de ligante.

3.2.3 Penetração

O ensaio de penetração foi realizado conforme norma DNIT-ME 155/2010, onde é medida a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa de 100g, penetra verticalmente, durante 5 segundos, a amostra de ligante numa temperatura de 25°C. Em cada ensaio foram realizadas 6 medições, sendo descartada a maior e realizando a média das 5 restantes. O penetrômetro utilizado está demonstrado na Figura 29.

Figura 29 – Penetrômetro automático



3.2.4 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento do ligante asfáltico foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 131/2010, sendo este método conhecido como “anel e bola”. O ensaio constitui de uma amostra do ligante em um molde de um anel de latão, onde é suspenso em um banho de água destilada, com temperatura controlada, e uma esfera de aço é colocada sobre o anel. O conjunto é aquecido até que o peso da esfera se desloque junto com a amostra amolecida até tocar numa placa, que fica a 25,4mm, sendo medida a temperatura neste ponto. A Figura 30 demonstra a realização do ensaio.

Figura 30 – Ensaio anel e bola



3.2.5 Performance Grade (PG)

O ensaio de PG seguiu as instruções da norma ASTM D6816/11, realizada com um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), verificando o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ de acordo com a variação de temperatura, iniciando com 46°C, aumento de 6°C em 6°C, sendo o valor do PG dado pela temperatura anterior a falha observada no reômetro. As amostras utilizadas nesse teste foram de ligantes asfálticos puros e modificados por adição da glicerina.

3.2.6 Viscosidade Rotacional

Para determinação da viscosidade rotacional foi utilizado o viscosímetro rotacional Brookfield, realizado conforme a norma NBR 15184/2005. A execução do ensaio constitui de 8 gramas de ligante dentro de uma cubeta, cuja cubeta está inserida em um cilindro (spindle). Foi realizado um torque com uma haste interligada ao cilindro e então o ligante foi aquecido em temperaturas pré-estabelecidas na norma, de 135°C, 142°C, 150°C, 165°C e 177°C. O viscosímetro utilizado foi o modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura (Figura 31).

Figura 31 – Viscosímetro Brookfield



3.2.7 Ensaios Mecânicos

Nesta pesquisa o comportamento mecânico das misturas foi analisado com a realização de ensaios de laboratório, sendo eles, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, cântabro e dano por umidade induzida, conforme normas apresentadas nos próximos tópicos.

3.2.7.1 Resistência a Tração por Compressão Diametral

A resistência a tração por compressão diametral (RT) foi realizada de acordo com a norma do DNIT 136/2010. Para a amostra de referência e para cada teor de glicerina (0%, 4% e 6%), foram moldados corpos de prova com volume de vazios de 4%. Logo após, com uma prensa mecânica, demonstrada na Figura 32, uma carga vertical de compressão, com uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, foi aplicada, gerando uma tensão de tração no plano perpendicular ao diâmetro, até o corpo de prova se romper, sendo a resistência a tração calculada por:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad (\text{equação 2})$$

Onde,

σ_t é a resistência à tração;
F é a carga de ruptura;
D é o diâmetro do corpo de prova;
H é a altura do corpo de prova.

Figura 32 – Prensa mecânica



3.2.7.2 Módulo de Resiliência

O ensaio do módulo de resiliência para as misturas estudadas foi realizado conforme a NBR 16018/2011 na prensa hidráulica UTM-25 (*Universal testing machine*), da IPC Global, onde há a aplicação de pulso de cargas com frequência de 1Hz, no plano diametral vertical do corpo de prova, como demonstrado na Figura 33. Dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) mediram o deslocamento diametral recuperável. A força aplicada foi correspondente a 10% da resistência à tração e foram ensaiados dois corpos de prova por mistura.

Figura 33 – Ensaio Módulo de resiliência



3.2.7.3 Cântabro

Para análise da perda de massa foi realizado o ensaio de cântabro, que consistiu na análise de 3 amostras de cada mistura submetidas ao aparelho de abrasão Los Angeles, da Figura 34, sem esferas metálicas, à 300 revoluções, onde é normatizado através da DNIT – ME 383/1999. O desgaste da mistura é calculado pela média dos valores dos corpos de prova, mediante o emprego da Equação 3:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

- A – desgaste da mistura betuminosa;
- P – peso do corpo de prova, antes do ensaio;
- P' – peso do corpo de prova após o ensaio.

Figura 34 – Aparelho de Abrasão Los Angeles



3.2.7.4 Dano por Umidade Induzida (Lottman)

A avaliação do dano por umidade induzida das misturas asfálticas conforme a norma DNIT – ME 180/2018 é realizada por meio de um procedimento de verificação da sensibilidade à água de corpos de prova das misturas, moldados em laboratório, avaliando-se a adesividade agregado-ligante em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. O comprometimento das propriedades mecânicas se refere à relação entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras em condições normais.

Para a amostra de referência e para cada teor de glicerina (0, 4 e 6%), foram moldados seis corpos de prova, divididos em dois grupos de 3 amostras. Em um grupo as amostras foram parcialmente saturadas e submetidas à temperatura de $-18 \pm 3,0^\circ\text{C}$ para congelamento, por um período mínimo de 16h, simulando assim a presença de água na mistura e induzindo a tensões internas. Logo após as amostras foram levadas a um banho aquecidas a 60°C , por 24h e depois a temperatura de 25°C , e então submetidas ao ensaio de resistência à tração (RT'). O outro grupo de amostras que não foram submetidas à saturação e congelamento foram levadas também ao ensaio de RT. A relação entre RT'/RT deve ser maior ou igual a 0,70, indicando a perda de resistência por umidade induzida.

De forma semelhante, as temperaturas de usinagem e compactação suportadas pelo ligante com 4% de glicerina são de 154°C e 142°C, respectivamente, e as suportadas pelo ligante com 6% de glicerina são 155°C e 143°C, respectivamente. Quando combinadas com as temperaturas do ligante do RAP, apresentadas na Figura 35, por meio da Equação 1, são determinadas as temperaturas de usinagem e compactação das misturas apresentadas na Tabela 12.

Figura 35 – Resultados do ensaio de viscosidade

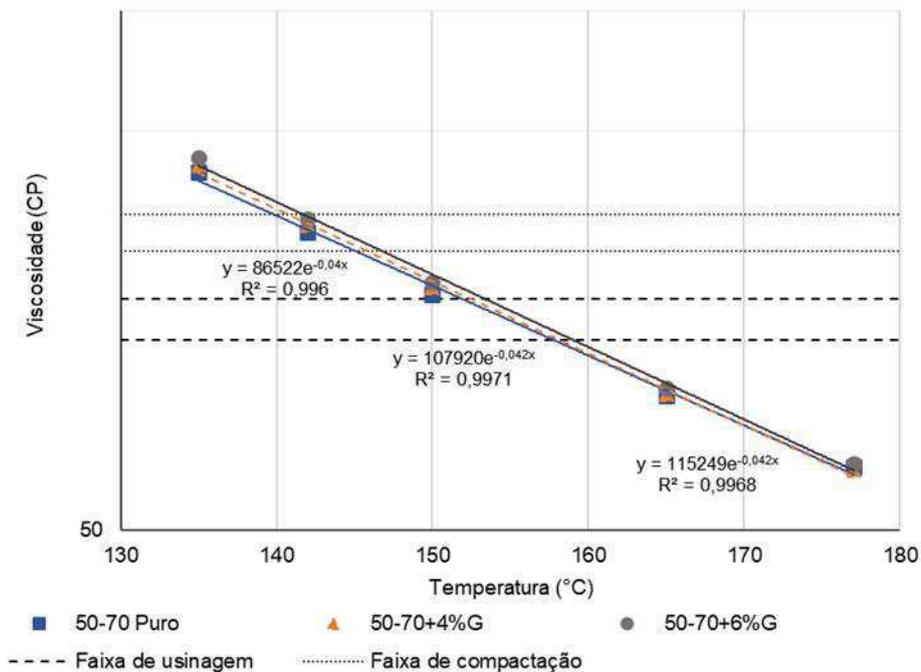


Tabela 12 – Temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

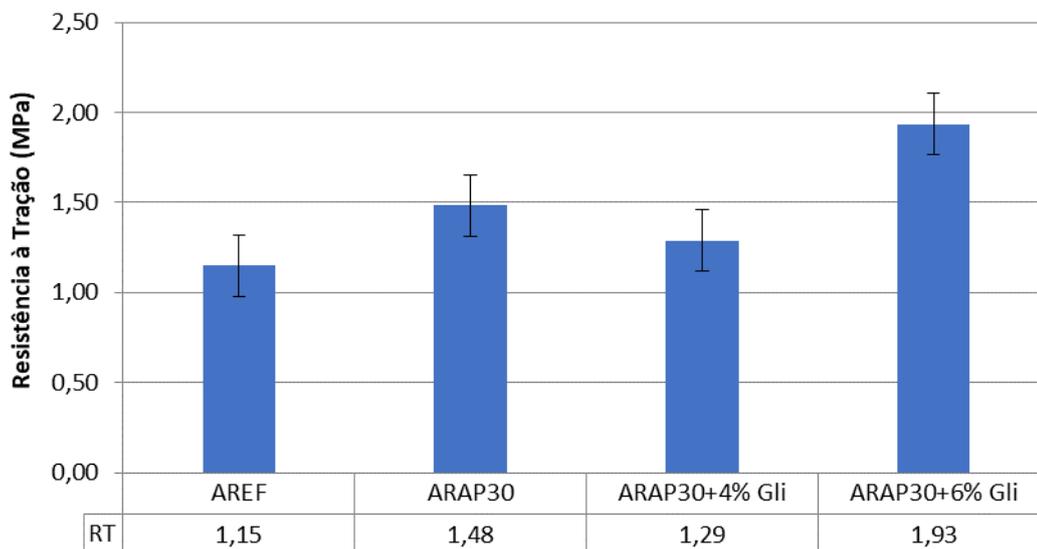
Temperatura	AREF	ARAP30	ARAP30+4G	ARAP30+6G	Varição tolerável
Usinagem (°C)	156	175	174	174	±3°C
Compactação (°C)	143	163	162	163	±3°C

Verifica-se ainda que à medida que a temperatura aumenta a variação de viscosidade entre as amostras diminui. Silva (2011) analisou os efeitos de quatro agentes rejuvenescedores, sendo três a base de óleo de xisto e um a base de alcatrão, podendo observar que a altas temperaturas as viscosidades tendem a um mesmo valor independente de qual é o agente rejuvenescedor utilizado.

4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Figura 36 apresenta os resultados do ensaio de Resistência à Tração encontrados para a média dos corpos de provas analisados. Observa-se que os valores de RT atenderam ao limite mínimo preconizado pela norma do DNIT – ME 031/2006, que é de 0,65 MPa (a 25°C) em misturas destinadas a camadas de rolamento.

Figura 36 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



A Figura 36 mostra um aumento da resistência quando se adiciona o RAP, em relação a amostra de referência, para ARAP30 há um aumento de 28,7%, de 12,2% para a amostra com 4% de glicerina, e um aumento de 67,8% na mistura com 6% de glicerina.

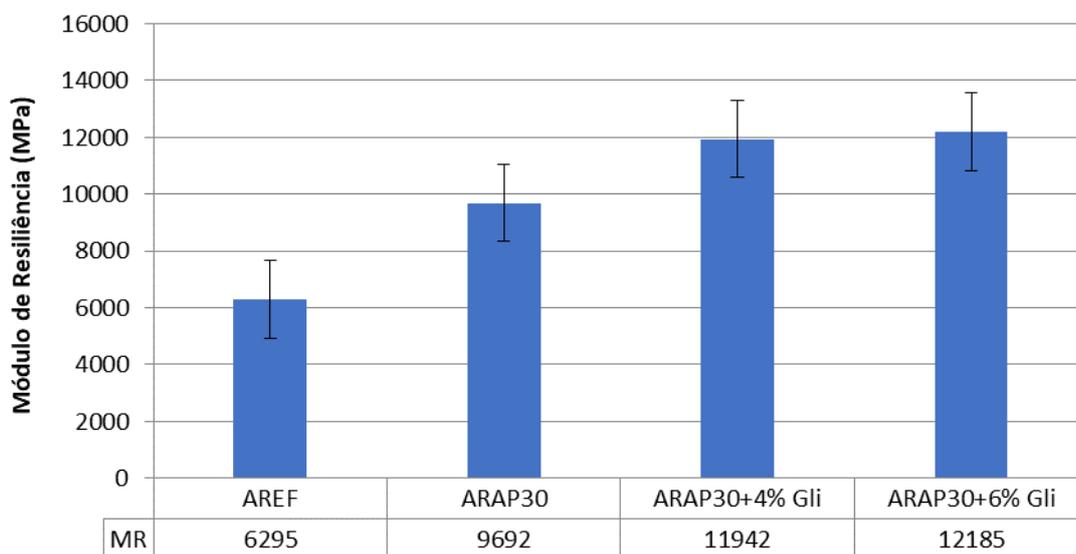
Ao analisar os efeitos da glicerina como agente rejuvenescedor das amostras, é possível observar que após a sua adição com o teor de 4% aproximou do valor da amostra de referência, ou seja, o RAP tornou a mistura mais rígida, porém o efeito da glicerina ao ligante pode ter comprometido a coesão dos componentes da mistura, resultando nessa redução. Avaliando a amostra com 6% de teor de glicerina pode-se afirmar que houve um aumento significativo na resistência, demonstrando aumento da rigidez nessa amostra.

Em Zanette *et al.* (2016) o estudo com o uso de 30% do agente rejuvenescedor AR-5 (produzido a partir do xisto processado) em misturas com 100% de RAP, demonstraram no ensaio de resistência a tração a obtenção de um valor médio de 1,152 MPa. O corpo de prova coletado em campo (mesmo material do RAP), sem adição de agente rejuvenescedor, apresentou um valor médio de 0,580, ou seja, o uso do agente apresentou um acréscimo de 99%, e além disso, a mistura rejuvenescida também atende ao valor de resistência à tração mínimo exigido pela norma.

4.3 Módulo de Resiliência

A Figura 37 apresenta os valores de MR para cada uma das misturas, a temperatura de 25°C, referentes a 10% da carga de RT, apresentadas no tópico 4.1.

Figura 37 – Módulo de Resiliência



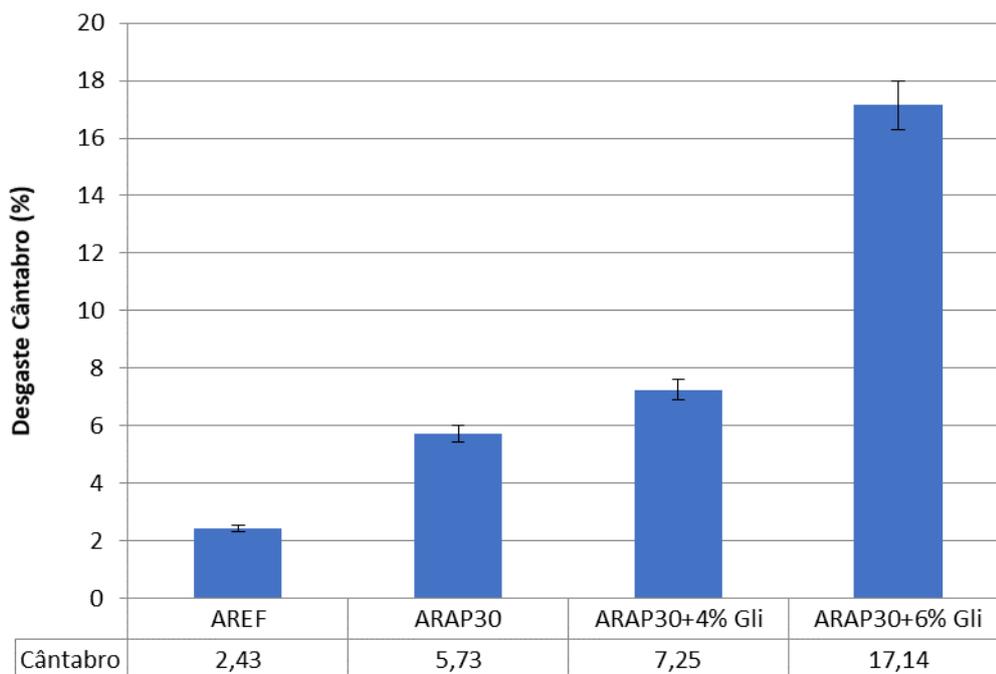
Observa-se que a influência do RAP aumenta a rigidez das misturas, bem como a glicerina. Assim como no ensaio de resistência a tração, o módulo de resiliência aumentou com o teor de RAP. A glicerina também aumentou a rigidez, no entanto entre os teores de 4 e 6% não houve diferença significativa, tal aumento pode ser associado a perda de voláteis devido a presença da glicerina, não influenciando tanto de um teor para outro. A presença do RAP aumentou em 35% a rigidez em relação a amostra de referência, e a glicerina aumentou em 19% e 20% nos teores de 4% e 6% respectivamente, em relação a amostra com 0% de glicerina.

O objetivo da adição do agente rejuvenescedor é reduzir a viscosidade do ligante, diminuindo conseqüentemente o valor de MR. A glicerina aumentou a viscosidade influenciando diretamente na rigidez das amostras estudadas.

4.4 Cântabro

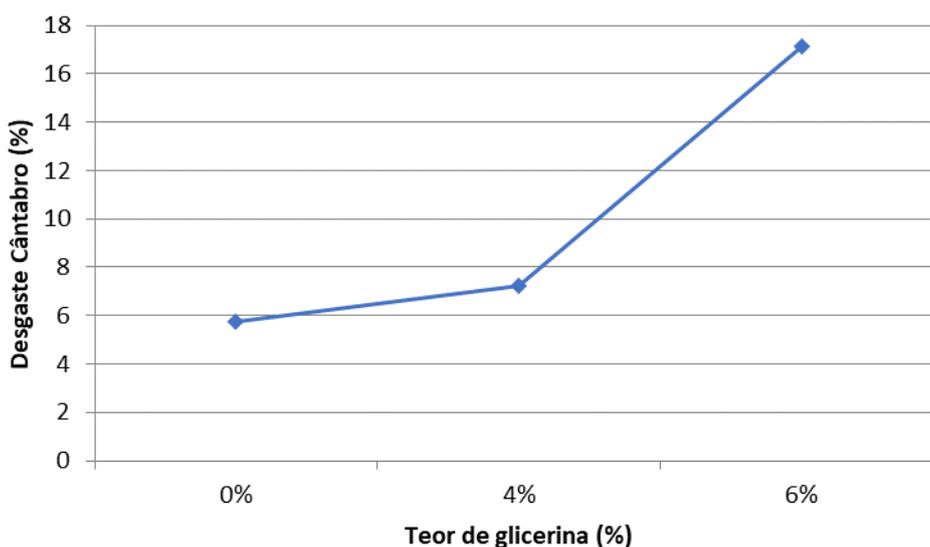
A Figura 38 ilustra os resultados do ensaio de resistência ao desgaste por perda de massa Cântabro.

Figura 38 – Desgaste Cântabro



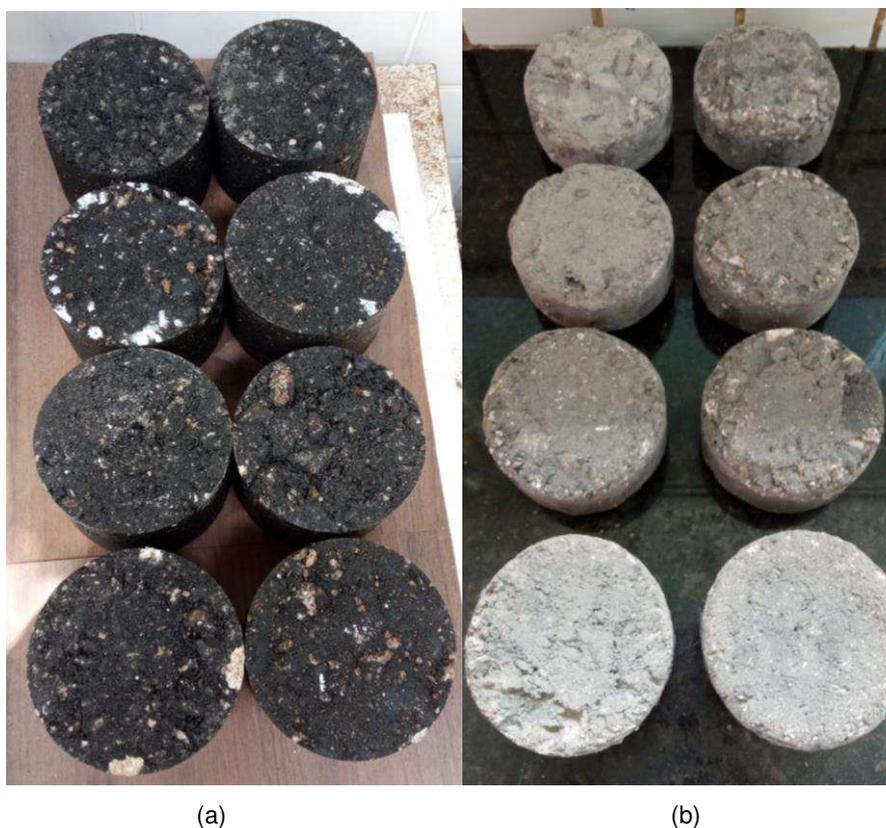
Nota-se que ao adicionar material fresado, a perda de massa pelo desgaste físico aumenta e, conforme aumenta o teor de glicerina esta perda se intensifica. A glicerina aumenta a tendência ao desgaste, causada pela perda da abrasão que está ligada diretamente a redução da rigidez do ligante modificado, como observada essa redução pelo aumento da penetração e da viscosidade. No entanto, o desgaste por abrasão final apresenta valores individuais inferiores a 20% das médias, seguindo a norma DNIT-ME 383/99. A Figura 39 apresenta os resultados em função do teor de glicerina.

Figura 39 – Resultado do ensaio de perda de massa em função do teor de glicerina



Quanto maior o teor de glicerina na mistura, menor o teor de ligante efetivo na amostra, e menor poder cimentante, diminuindo assim a compatibilidade entre ligante e agregados. A Figura 40 mostra os corpos de prova antes e após o ensaio.

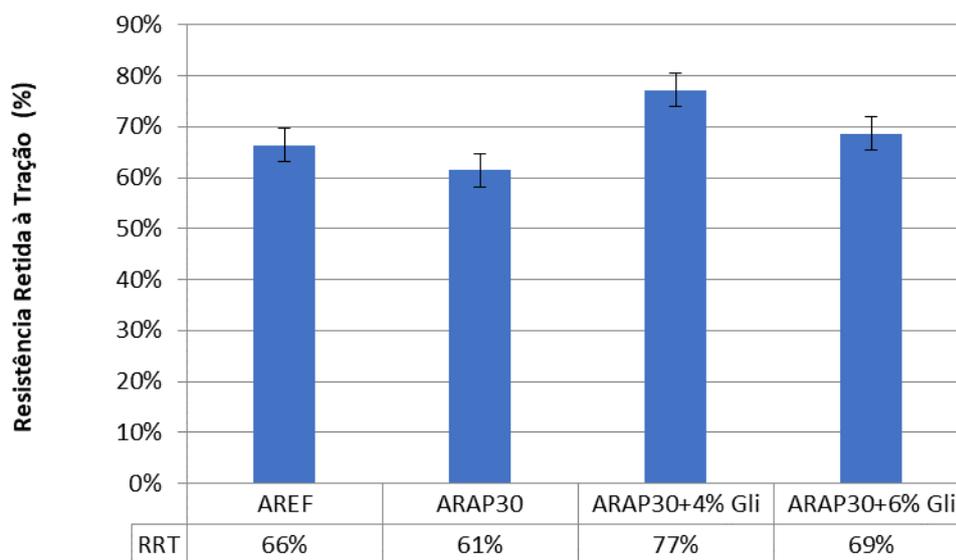
Figura 40- Corpos de prova (a) antes e (b) após o ensaio Cântabro



4.5 Dano por Umidade Induzida (*Lottman*)

A Figura 41 apresenta os valores médios obtidos da resistência à tração retida das misturas asfálticas estudadas.

Figura 41 – Resultados do dano por umidade induzida



A especificação de serviço DNIT 031/2006 estabelece que para concretos asfálticos o RRT mínimo deva ser de 70%, onde podemos observar que as amostras com glicerina apresentaram sensibilidade a umidade maior que as demais misturas, sendo com o teor de 4% de glicerina, 77%, e o teor de 6%, 69%.

Não houve diferença significativa entre a amostra de referência e a inserção do RAP, demonstrando que o RAP não influencia na resistência a ação deletéria da água. No entanto, os resultados obtidos da amostra com RAP e a adição de glicerina podem ser atribuídos a um ganho de adesão entre a superfície do agregado e o ligante asfáltico na presença de umidade.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados analisados foi possível concluir que:

- na caracterização dos ligantes, a penetração apresentou uma redução e a viscosidade um aumento à medida que se aumentou o teor de glicerina, indicando um aumento de rigidez da mistura, demonstrando a não possibilidade de diminuição da temperatura de usinagem e compactação da mistura;
- a adição da glicerina não alterou o ponto de amolecimento e PG das misturas, demonstrando a insensibilidade da mesma nesses parâmetros;
- a resistência à tração das amostras com a adição de RAP aumenta e é ainda maior com a adição da glicerina, sendo considerados satisfatórios, e superiores ao determinado pela norma. No entanto, há uma observação a ser levada em consideração na mistura com o teor de 4% de glicerina, onde houve uma aproximação do valor de RT da amostra de referência, significando que a presença de glicerina pode ter comprometido a coesão dos componentes da mistura, nesse teor, ou que houve a volatilização da mesma no processo de usinagem.
- os resultados para o MR das misturas apresentaram aumento em relação a adição de RAP, e um aumento ainda maior para a adição da glicerina. Esse aumento de rigidez pode estar relacionado ao aumento da viscosidade com a adição da glicerina influenciou diretamente no aumento da rigidez da mistura, ao tempo de mistura da glicerina e os outros componentes da mistura, ocasionando na perda da eficiência da glicerina na recuperação das propriedades reológicas do material reciclado, e ainda ao efeito de uso de Cal como fíler, onde alguns pesquisadores afirmam contribuir para aumento na rigidez do ligante.
- os resultados obtidos para cântabro indicam que a adição de glicerina aumenta a perda de massa, porém não chega a um limite que possa condenar as misturas, visto que atendem aos requisitos estabelecidos por norma, ou que ainda merece uma atenção no processo de dosagem, bem como em relação ao dano por umidade induzida, onde foi possível observar um aumento na resistência ao efeito deletério da água com a glicerina, estando apenas a amostra com teor de 4% de glicerina acima do limite especificado em norma.

Podemos inferir que o RAP possui um alto potencial na redução de consumo de asfalto, com suas contribuições, tendo aumentado a RT, o MR, pouco aumento no desgaste cântabro e pouca diminuição no dano por umidade induzida, conforme verificado na pesquisa.

Por fim, ao avaliar os quatro parâmetros conjuntamente (RT, MR, cântabro e dano por umidade induzida), concluiu-se que a mistura com o teor de 4% de glicerina apresentou um melhor comportamento mecânico, quando comparada as demais misturas. Portanto, a glicerina não é um material adequado para utilização em rejuvenescimento, mas pode ser utilizada com a finalidade de agente corretivo da trabalhabilidade, agindo como agente tenso ativo, reduzindo o atrito na interface dos agregados, e para promoção de aumento a resistência à tração e resistência a ação deletéria da água de uma mistura contendo RAP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – **AASHTO T283. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.** 2014.

_____**AASHTO T85. Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.** 2014.

_____**AASHTO T84. Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.** 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D4402-15 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.** Washington. 2015.

_____**ASTM D 2196-18. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer.** Washington. 2018.

_____**ASTM D 1475-13. Standard Test Method for Density of Liquid Coating, Inks, and Related Products.**Washington, 2013.

ANP, 2016. ANP- **Agência Nacional do petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.Boletim mensal do biodiesel.**Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>.Acesso em: 06 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6576. Materiais asfálticos – Determinação da penetração.** Brasília, 2007.

_____**NBR 6560. Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola.** Brasília.2016.

_____**NBR 16208. Misturas asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo reflucoduplo.** Brasília. 2013.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt mix design methods.** Manual Series n. 02 (MS-2). Seventh edition. 2014.

BEATRIZ, A; ARAÚJO, Y, J, K; LIMA, D. P. L **Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas.** Química Nova. Vol. 34. N. 11. São Paulo, 2011.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B..**"Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros."** 1ª Ed. Vol1. Rio de Janeiro, 2008.

BIODIESELBR. **Exportações de Glicéria voltam a beirar 40 mil toneladas em fevereiro.** Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/>. Acesso em: 06 nov. 2020.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D; BUDNY,J.; SPECHT, L.; CERATTI, J. A. **Estudo Laboratorial sobre os Efeitos de Diferentes Formas de Adição de Cal e Concreto**

Asfáltico. Revista TPEC – Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 14, p. 59-69. Outubro, 2009.

BOHN, K. A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero.** 254p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e Linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado.** 301p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte rodoviário: impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário.** Brasília: CNT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – ME 083/98. **Agregados – análise granulométrica. Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3ª Edição. Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Ministério dos Transportes, 2006.

_____. **DNIT ES 033/2005. Pavimentos flexíveis– Concreto asfáltico reciclado a quente na usina.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **DNIT ES034/2005. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **DNIT ME 136/2010. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro. 2010.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS – EPE. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020.** Brasil, 2021.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** 195p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

JI, J. YAO, H; SUO, Z; LI, H; XU, S; SUN, L. **Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n 3, 2016.

KANDHAL, P. S. e MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments.** Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-97. Washington, 1997.

KANDHAL, P. S. **Recycling of Asphalt Pavements – an Overview.** Innovations in Construction and Maintenance of Flexible Pavements. Agra, 2006.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. 2003. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MOTTA, L. G. **Princípios do projeto e análise superpave de misturas asfálticas**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1996.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY – NCAT. Disponível em: <<https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/education/index.html#education%20and%20raining>>. Acesso em 13 de abril de 2021.

OLIVEIRA, P. A. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico**. 2019. 30p. Artigo (Pós graduação em Engenharia de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós graduação em Engenharia de Infraestrutura Urbana, Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas, São Paulo.

OSMARI, P. H. **Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores**. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PALHA, M. L. A. P. F. e SILVA, S. P. R. **Potencial aproveitamento da glicerina gerada na cadeia produtiva do biodiesel**. Biodiesel: 10 Anos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no Brasil, v.2, p. 1141-1142, 2016.

PARAÍBA QUÍMICA. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – Glicerina Bi Destilada**. Paraíba Química. Campina Grande, Brail, 2018.

POULIKAKOS, L. D., SANTOS, S., BUEO, M., KUENTZEL, S., HUGENER, M., PARTL, M. N. **Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, v.5, 2014.

SCHWENGBER, C A; ALVES, H. J; SCHAFFNER, R.A; SILVA, F. A; SEQUINEL, R; BACH, V R; FERRACIN, R. J. **Overview of glycerol reforming for hydrogen production**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 58, p. 259-266, 2016.

SEGUNDO, I. G. R.; BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L. e HOLANDA, A. S. **Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado**. Transportes, v. 24, n. 4, 2016.

SERFASS, J. P. **Recyclage em centrale des matériaux de chaussés**. Centre français d'exploitation du droit. França, 2008.

SILVA, E. S. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de**

Manaus. 2013. 223p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.** Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M.; LEIE, L. M. e BRANCO, J. V. C. **O efeito da consistência de CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas.** XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, vol. 1, São Carlos, 1999.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** 153p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2019.

TECNOPAV. **Reciclagem de pavimentos: tecnologia, sustentabilidade e economia de custos.**<<https://www.tecnopav.com.br/reciclagem>>. Acesso em: novembro de 2020.

TONIAL, I. A. **Efeito do tempo de transporte da massa asfáltica sobre o envelhecimento do CAP.** Asfalto em Revista, n. 7, Ano 1, p. 17-19, 2009.

ZANETTE, C. C.; MORENO, K. R. e CARPIO J. A. V.. **Uso do agente rejuvenescedor AR-5 na produção de misturas asfálticas 100% recicladas – resistência a tração.** Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. Vol. 4, p. 2054-2065, 2016.

ZAUMANIS, M e MALLICK, R. B. **100% recycled hot mix asphalt; A review and analysis.** Resources Conservation and Recycling. 2014.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; POULIKAKOS, L. e FRANK, R.. **Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures.** Construction and Building Materials, 2014.

ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; WOODS, M. **Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement.** Constr. Build. Mater., 44, p 92-100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010. 2013.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** 151 p . Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.