



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

ALANA TAMIRES RODRIGUES DOS SANTOS

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM ADIÇÃO DO ÓLEO DE COZINHA RESIDUAL**

CAMPINA GRANDE

2018

ALANA TAMIRES RODRIGUES DOS SANTOS

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM ADIÇÃO DO ÓLEO DE COZINHA RESIDUAL**

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

Orientadores: Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Ablenya Grangeiro de Barros

CAMPINA GRANDE

2018

ALANA TAMIRES RODRIGUES DOS SANTOS

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM ADIÇÃO DO ÓLEO DE COZINHA RESIDUAL**

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

Aprovada em: ____ de _____ de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Nota: _____

Profª. DSc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(Presidente – Orientadora)

Nota: _____

Ablenya Grangeiro de Barros
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(Orientadora)

Nota: _____

Prof. Msc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(1º Examinador)

Nota: _____

Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
(2º Examinador)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois foi Ele quem colocou em meu coração o sonho por essa profissão e permitiu que se tornasse realidade. À minha mãe, Avaní, que também tomou o sonho para si e permaneceu ao meu lado confiando e acreditando que chegaríamos até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, que em sua infinita bondade, se faz presente em todos os momentos da minha vida guiando os meus passos. A Ele seja toda glória eternamente.

À minha mãe, Avaní, por todo amor, dedicação e esforço depositado sobre mim, por ter lutado todos os dias para que eu chegasse até aqui, por ter sido sempre minha melhor amiga, pelo incentivo, por ter acreditado e se orgulhado em todas as minhas conquistas.

Ao meu avô, Manoel Pedro (in memoriam), por ter sido meu pai, pelo seu amor e cuidado, por ter me ensinado a ler e me apresentado o que tenho hoje de mais precioso, Deus.

Ao meu noivo, Nicolas, pelo amor, paciência, cuidado e companheirismo em todos os momentos, pelo apoio e ajuda na realização deste trabalho. A você todo o meu amor e admiração.

Ao meu padrasto, Sena, por não medir esforços para me ajudar, por incentivar e sempre vibrar diante das minhas conquistas.

À minha tia Nadir e minhas primas Kalliane e Késsia, por serem presente em todas as fases da minha vida e torcerem por mim.

À minha orientadora, professora Lêda, por quem tenho muita admiração, agradeço pelas oportunidades concedidas, pela confiança depositada, por ter sido sempre disponível para me ajudar e por todo o conhecimento transferido.

À minha coorientadora, Ablenya, por toda ajuda e dedicação com esse trabalho, por ter “colocado a mão na massa” e não ter medido esforços para me auxiliar.

A Paulo Marinho, que foi meu orientador no PIVIC e se tornou alguém com quem pude contar, sempre acessível, disposto a ensinar e ajudar. Muito sucesso, você merece!

Aos meus amigos da UEPB, em especial, Gabriel, Jayne, Victor, Brendo e Janayna, que foram minha família fora de casa no início dessa jornada e permanecem presente apesar da distância.

Aos amigos da UFCG, que me acolheram tão bem e tornaram meus dias mais leves. Em especial quero agradecer a Mila, Letícia, Higor, Jéssica, Thiago e Drihelly, por terem dividido comigo madrugadas de estudo e compartilhado bons momentos juntos.

A Daniel, Christian e Conrado por terem sido prestativos e me ajudado durante a fase de experimentos no PIBIC e no TCC.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Ildinho e Jadilson, por toda ajuda.

A todos que contribuíram com esta conquista, muito obrigada!!

“Nenhuma alta sabedoria pode ser atingida sem uma dose de sacrifício.”

(Cs. Lewis)

RESUMO

A busca por novas tecnologias na pavimentação asfáltica que proporcionem diminuição dos impactos ambientais impulsionaram o estudo das Misturas Asfálticas Mornas. Esse tipo de mistura asfáltica é produzida e aplicada em temperaturas inferiores às misturas usinadas à quente e, devido a isto, promovem benefícios relacionados à redução da emissão de poluentes na atmosfera e menores gastos energéticos. A modificação do ligante asfáltico a partir da incorporação de aditivos oriundos de oleaginosas apresenta-se como uma alternativa na busca pela diminuição das temperaturas de usinagem e aplicação das misturas asfálticas, proporcionada pela redução da viscosidade do ligante. O óleo de cozinha residual quando destinado de forma incorreta também causa danos ao meio ambiente. Diante disso, a presente pesquisa tem por finalidade avaliar a influência da adição em peso de 1% do óleo de cozinha residual ao cimento de petróleo asfáltico 50/70. Para isto, avaliou-se as propriedades mecânicas das misturas asfálticas por meio dos ensaios de Resistência a Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Lottman Modificado e Flow Number. As amostras das misturas asfálticas analisadas foram usinadas e compactadas nas temperaturas determinadas a partir o ensaio de viscosidade rotacional, bem como a 10 °C e 20 °C abaixo destas, como forma de verificar o efeito de maiores reduções de temperatura nos parâmetros mecânicos. Os resultados indicaram que a incorporação do óleo ao ligante proporcionou aumento da resistência à tração e resistência à deformação permanente. Contudo, a diminuição da temperatura causou redução desses parâmetros e queda na rigidez das misturas. Ainda assim, estas propriedades analisadas atenderam aos requisitos exigidos para o desempenho do pavimento. No que se refere ao dano por umidade induzida, as misturas asfálticas modificadas produzidas abaixo da temperatura de projeto indicaram maior resistência retida à tração (RRT), sugerindo um provável benefício promovido pela adição do óleo e redução das temperaturas de projeto. A análise dos resultados permitiu concluir que a modificação apresentou resultados satisfatórios quanto ao desempenho mecânico do pavimento em temperaturas inferiores à de projeto e sugeriu um destino adequado ao óleo de cozinha residual.

Palavras chave: Misturas asfálticas mornas, ligantes asfálticos modificados, oleaginosos.

ABSTRACT

The search for new technologies in asphalt pavements that provide a reduction of the environmental impacts boosted the study of Warm Asphalt Mixtures. This type of asphalt mix is produced and applied at lower temperatures than hot-blended mixtures, and because of this, they promote benefits related to reducing the emission of pollutants into the atmosphere and lower energy costs. The modification of the asphalt binder from the incorporation of oleaginous additives is an alternative in the search for the reduction of the machining temperatures and application of the asphalt mixtures, provided by the reduction of the viscosity of the binder. Residual cooking oil when improperly used also damages the environment. Therefore, the present research has the purpose of evaluating the influence of the addition of 1% of the residual cooking oil to the 50/70 asphalt oil cement. For this, the mechanical properties of the asphalt mixtures were evaluated through the Diametral Compression, Resilience Modulus, Modified Lottman and Flow Number tests. The samples of the asphalt mixtures analyzed were machined and compacted at the temperatures determined from the rotational viscosity test, as well as at 10 ° C and 20 ° C below these, as a way to verify the effect of higher temperature reductions on the mechanical parameters. The results indicated that the incorporation of the oil to the binder provided increased tensile strength and resistance to permanent deformation. However, the decrease in temperature caused a reduction of these parameters and a decrease in the stiffness of the mixtures. Nevertheless, these analyzed properties met the requirements required for pavement performance. Regarding damage due to induced humidity, modified asphalt mixtures produced below the design temperature indicated higher tensile strength (RRT), suggesting a probable benefit promoted by the addition of the oil and reduction of design temperatures. The analysis of the results allowed to conclude that the modification presented satisfactory results regarding the mechanical performance of the pavement at lower temperatures than the project and suggested a suitable destination for the residual cooking oil.

Key words: Warm mix asphalt, modified asphalt binders, oleaginous.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação por faixa de temperatura (D'Angelo, 2008a – Adaptado CCR Nova Dutra).....	19
Figura 2 - Comparação visual da emissão de fumos de asfalto gerados na mistura à quente e na mistura morna. SINICESP, 2013.	22
Figura 3 - Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico conforme a variação da temperatura (MERIGHI, 2015).....	27
Figura 4 - Etapas para o desenvolvimento da pesquisa	32
Figura 5 - Óleo residual obtido a partir de diferentes origens	33
Figura 6 - Agregados graúdos: (a) Brita 19mm (b) Brita 9,5mm	33
Figura 7 - Agregados miúdos e filler: (a) Areia; (b) Pó de Pedra; (c) Cal hidratada.	33
Figura 8 - Agitador Mecânico utilizado para a mistura do ligante	34
Figura 9 - Gráficos de viscosidade x temperatura	35
Tabela 2 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos e reduções alcançadas.....	36
Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados.....	37
Figura 11 - Curva de Fuller	38
Figura 12 - Compactador giratório SUPERPAVE	39
Figura 13 - Rice Test	39
Figura 14 – Prensa Mecânica	40
Figura 15– Equipamento utilizada para o ensaio de módulo de resiliência	41
Figura 16 – Equipamento utilizado para a aplicação do vácuo nos corpos de prova	42
Figura 17 – Regiões da curva deformação permanente versus número de ciclos aplicados durante o ensaio uniaxial de carga repetida (COSTA, 2017)	43
Figura 18 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	44
Figura 19 – Valores de módulo de resiliência	45
Figura 20 – Resultado do ensaio de <i>Lottman</i> modificado	46
Figura 21 - Valores de Flow Number	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de caracterização dos ligantes asfálticos	34
Tabela 2 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos e reduções alcançadas	36
Tabela 3 - Ensaio de caracterização dos agregados para a mistura asfáltica	37
Tabela 4 - Proporções dos agregados na mistura	38
Tabela 5 – Parâmetros volumétricos para a mistura com o teor ótimo de ligante puro	39
Tabela 6 - Valores mínimos de FN para diferentes níveis de tráfego, conforme Nascimento (2008)	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Industrias de Óleos Vegetais;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AASTHO	<i>American Association Of State Highway And Transportation Officials</i>
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros;
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Tester</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional dos Transportes;
CPs	Corpos de Prova
DMT	Massa Especifica Teórica das Misturas Asfálticas
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
FHWA	Federal Highway Administration;
FN	<i>Flow Number</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
LVTD	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
OCR	Óleo de Cozinha Residual
RBV	Relação Asfalto Vazios
RRT	Relação da Resistência à Tração
RT	Resistência à tração
RTu	Resistência à Tração condicionado
SABITA	South Africa Bitumen Association
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TC	Temperatura de compactação
TU	Temperatura de usinagem
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Vazios do Agregado Mineral
V _v	Volume De Vazios
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
cP	Centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
F	Carga de ruptura
H	Altura do corpo de prova
Hz	Hertz
m	Massa do material
MPa	Mega Pascal
Pa	Pascal
Pa.s	Pascal segundo
σ	Resistência a tração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Ligantes asfálticos.....	15
2.2	Misturas asfálticas.....	16
2.2.1	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas.....	17
2.2.2	Classificação das misturas asfálticas quanto à temperatura de produção.....	18
2.2.3	Influência da temperatura na produção das misturas asfálticas.....	19
2.3	Misturas Asfálticas Mornas.....	20
2.3.1	Benefícios das misturas asfálticas mornas.....	21
2.3.2	Possíveis desvantagens das misturas asfálticas mornas.....	23
2.4	Tecnologias utilizadas na obtenção de misturas asfálticas mornas.....	24
2.4.1	Espumejo do Asfalto.....	25
2.4.2	Aditivos Surfactantes.....	25
2.4.3	Aditivos Orgânicos.....	26
2.4.3.1	Óleo de cozinha residual.....	27
2.4.3.2	Utilização do óleo de cozinha residual na pavimentação.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1	Materiais.....	32
3.2	Métodos.....	34
3.2.1	Produção da mistura do ligante asfáltico com o óleo residual.....	34
3.2.2	Caracterização dos ligantes asfálticos.....	34
3.2.3	Caracterização dos agregados.....	37
3.2.4	Dosagem SUPERPAVE.....	37
3.2.5	Propriedades mecânicas.....	39
3.2.5.1	Resistência à tração (RT) por compressão diametral.....	40
3.2.5.2	Ensaio de Módulo de Resiliência.....	41
3.2.5.3	Ensaio de Lottman modificado.....	41
3.2.5.4	Ensaio de Flow Number.....	42
4	RESULTADOS.....	44
4.1	Resistência à tração (RT) por compressão diametral.....	44
4.2	Módulo de Resiliência (MR).....	45

4.3	Dano por umidade induzida – <i>Lottman</i> modificado	46
4.4	Flow Number (FN)	47
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	50
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras são responsáveis por movimentar a maior parte de passageiros e principalmente cargas, tendo esse modal de transporte grande importância no desenvolvimento econômico do país. Apesar disso, de acordo com a Confederação Nacional de Transportes - CNT (2017), esse tipo de transporte utiliza vias que não possuem infraestrutura satisfatória. O desenvolvimento de novas tecnologias, que possam ser utilizadas na fabricação de misturas asfálticas, tem como objetivo aumentar a qualidade e durabilidade das vias e melhorar a qualidade de vida das pessoas que trabalham diretamente com esse tipo de material (MORAES, 2018).

As misturas asfálticas empregadas nos pavimentos flexíveis têm como constituintes básicos agregado, filler e o ligante asfáltico, sendo este último o responsável por envolver os agregados da mistura, influenciando diretamente na homogeneidade, resistência e durabilidade do pavimento. Segundo Silva (2016) para a produção de misturas asfálticas convencionais deve-se aquecer o ligante asfáltico, bem como os agregados, em temperaturas que variam entre 150°C e 200°C. Nesse tipo de processo há um elevado consumo de energia combustível, além da liberação de gases tóxicos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana.

As misturas asfálticas mornas ou, em inglês, Warm-Mix Asphalt (WMA), correspondem a um grupo de tecnologias desenvolvidas desde a década de 90 com a finalidade de diminuir as temperaturas de produção e aplicação das misturas asfálticas em cerca de 20°C a 50°C em relação às misturas asfálticas usinadas à quente, sem influenciar o desempenho dessas. Segundo Budny (2012) essas tecnologias visam o menor consumo de energia de usinagem, melhores condições de trabalho, maiores lucros, menores danos ambientais, entre outros aspectos de qualidade e durabilidade uma vez que a diminuição da temperatura de produção das misturas promove redução da emissão de poluentes, diminuição do consumo de combustível bem como redução do envelhecimento do ligante asfáltico.

A redução da temperatura alcançada pela mistura asfáltica morna advém do uso de tecnologias que têm sido desenvolvidas nos últimos anos, e que podem ser classificadas em três grupos: aditivos orgânicos, aditivos químicos, e os processos de formação de espuma que contém água ou à base de água. Embora todos eles apresentem o mesmo objetivo, o processo de fabricação é diferente (RUBIO, 2011). De acordo com Nynas (2009), a incorporação de aditivos orgânicos como óleos na produção das misturas asfálticas

mornas pode proporcionar benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, econômicas e ambientais.

Portugal (2016) avaliou as propriedades físicas e reológicas de ligantes asfálticos modificados com óleo de soja e de milho (variando de 1% a 3% em relação ao peso do ligante), novo e residual, e comprovou que a incorporação desse aditivo possibilita a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação sem comprometer o desempenho reológico desse.

O destino inapropriado do óleo residual, proveniente das atividades de cocção, pode provocar enormes prejuízos para o meio ambiente se forem destinados de forma direta no solo e/ou descartados em cursos de água (AZAHAR *et al*, 2016). Além de vantagens econômicas, o emprego do óleo de cozinha residual nas misturas asfálticas caracteriza esse como um “aditivo verde” por se tratar de uma forma sustentável de descartar esse resíduo, tendo em vista o alto consumo de óleo vegetal e a crescente preocupação a respeito do seu destino.

Diante disso, esta pesquisa tem como finalidade avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas mornas produzidas a partir da modificação do ligante asfáltico com óleo de cozinha residual de origem comercial, industrial e residencial, com objetivo de simular aqueles obtidos nos postos de coleta.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Avaliar o efeito da adição do óleo de cozinha residual, ao ligante asfáltico, nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- estudar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas compactadas nas temperaturas determinadas no ensaio de viscosidade do ligante modificado com óleo residual;
- avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas compactadas com a adição de óleo residual ao ligante asfáltico em temperaturas inferiores em 10°C e 20°C as determinadas no ensaio de viscosidade rotacional;
- verificar a viabilidade de incorporação dos óleos residuais no ligante asfáltico a fim de promover um descarte adequado destes resíduos.
- contribuir para o desenvolvimento sustentável na área da pavimentação asfáltica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligantes asfálticos

Segundo Bernucci et al (2008), apesar do asfalto ter inúmeras aplicações, seu uso na pavimentação é um dos mais importantes entre todas e uma das mais antigas também. Assim como no Brasil, na maioria dos países do mundo a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento.

O ligante asfáltico betuminoso é utilizado na pavimentação por possuir boa aderência aos agregados. Este é um produto do refinamento do petróleo cru, apresentando coloração negra ou marrom escuro. Muito viscoso, age como ligante na pavimentação, apresentando a temperaturas ambientes, consistência sólida a semissólida, necessária para manter o envolvimento dos agregados. (ASPHALT INSTITUTE apud BALBO, 2007).

De acordo com Cezaro Junior (2008) o ligante asfáltico além de possuir um comportamento dependente da temperatura (termoplástico), também é dependente do tempo de carregamento (frequência), exibindo comportamentos diferentes quando uma mesma carga é aplicada em frequências diferentes. Quando em temperaturas suficientemente elevadas e em tempos de carregamentos longos, o ligante puro comporta-se quase que completamente como um fluido viscoso (newtoniano) mas quando em temperaturas suficientemente baixas e carregamentos de curta duração, esse comporta-se quase que completamente como um sólido elástico. Entretanto, quando em temperaturas intermediárias, o ligante asfáltico apresenta características relativas aos dois comportamentos, isto é, apresentando um comportamento viscoelástico.

Os ligantes asfálticos são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligação covalentes. Os ligantes utilizados no Brasil têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio (LEITE, 1999).

O conhecimento a respeito da composição química dos ligantes asfálticos auxilia no processo de modificação desses, uma vez que, como explica Fernandes (2009) as propriedades físicas, mecânicas e reológicas do ligante asfáltico dependem basicamente da sua composição química, e em particular da proporção entre asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos constituem de 5 a 25% do asfalto e são compostos polares de maior massa molar e insolúveis em n-heptano, enquanto os maltenos são constituídos por resinas, compostos aromáticos e saturados, solúveis em n-heptano e de menor massa molar.

O ligante asfáltico utilizado na pavimentação nem sempre terá uma distribuição dos seus elementos que incluam todas as características desejadas no que diz respeito às propriedades físicas, mecânicas, condições de tráfego, economia e sustentabilidade. Por isso, a incorporação de materiais ao ligante modifica a estrutura desses a fim de promover uma interação entre os constituintes que resultam em um ligante asfáltico que, para a produção de misturas asfálticas, seja mais adequado de acordo com as propriedades desejadas. Segundo Rosa Júnior (2015) os modificadores são adicionados ao ligante asfáltico a fim de aumentar sua resistência ao acúmulo de deformações permanente, ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento prematuro do ligante e melhorando a interação entre o este e os agregados (adesividade).

2.2 Misturas asfálticas

Na estrutura de um pavimento, a camada de rolamento é aquela que está sujeita a maiores solicitações devido ao tráfego de veículos e mais suscetível às condições climáticas. O revestimento do pavimento deve possuir resistência suficiente para suportar as repetidas cargas, horizontais e verticais, provenientes do tráfego, sem que ocorram elevadas deformações elásticas e plásticas.

No pavimento flexível, a camada de revestimento se trata de uma mistura asfáltica constituída de uma mistura de agregados, material de enchimento e ligante asfáltico, sendo o ligante responsável por unir os agregados da mistura e conferir a essa rigidez e impermeabilidade.

Bernucci et al. (2008) explica que a mistura asfáltica deve ser preparada em proporções adequadas de tal forma que garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local.

Na preparação das misturas asfálticas, o ligante asfáltico deve ser submetido a temperaturas que possibilitem sua fluidez a fim de promover o envolvimento dos agregados. Após o lançamento da mistura em campo, essa deve apresentar consistência e flexibilidade suficientes de modo que seja possível suportar as cargas do tráfego a altas temperaturas, sem que haja deformações permanentes e a baixas temperaturas, não ocorra o aparecimento de trincas.

2.2.1 *Propriedades mecânicas das misturas asfálticas*

Nos últimos anos aumentou a importância do estudo das misturas asfálticas face ao crescimento das cargas, do volume de tráfego, da pressão de inflação dos pneus, etc e até do desenvolvimento de modelos mecanísticos que induziram o abandono do empirismo no dimensionamento dos pavimentos asfálticos (MOTTA & MEDINA, 2006).

O conhecimento adequado das propriedades de estado, físicas e mecânicas de misturas asfálticas podem refletir, de forma direta e/ou indireta, no desempenho dos revestimentos asfálticos durante a vida útil do pavimento. Este, por sua vez, pode ser dimensionado a partir de métodos que consideram a compatibilidade das deformações entre as sucessivas camadas do pavimento (Métodos Racionais ou Mecanísticos) que, aliados às medições diretas realizadas em campo, tornam-se ferramentas indispensáveis para o estudo das composições, dos constituintes e dos agentes modificadores (aditivos) de misturas asfálticas. Esses métodos visam estabelecer uma dosagem racional e adequada aos níveis e às formas de diferentes tipos de carregamento em consonância com as variações sazonais inerentes do meio ambiente local (SOUZA, 2012).

A caracterização de materiais de pavimentação é uma tarefa complexa em virtude das propriedades desses materiais dependerem de diversos fatores, entre eles: meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos, e estado de tensões. No caso das misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante aumenta a complexidade já que é difícil a simulação desse fenômeno em laboratório para a devida caracterização do material. Diante disso, a caracterização das misturas requer um balanço apropriado entre rigor e praticidade, uma vez que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente. Privilegiam-se então os aspectos considerados de maior relevância para previsão do comportamento das misturas asfálticas em campo (BERNUCCI et al 2008).

O método mecanístico empírico traz algumas vantagens frente às metodologias empíricas de dimensionamento de reforço asfáltico. O método mecanístico-empírico, possibilita um dimensionamento a partir de modelos de previsão da vida útil dos materiais empregados, ao analisar o conjunto dos materiais constituintes e considerar um conjunto de variáveis, tais como as características elásticas de cada material (FRANCO, 2000; FONSECA, 2013).

O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) é um software que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos, por meio

da rotina AEMC “Análise Elástica de Múltiplas Camadas”. Esta rotina calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas (FRANCO, 2018).

De acordo com Bruxel (2015) os ensaios mecânicos são utilizados para análise dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas e realizados com o objetivo de reproduzir as condições de campo, embora impliquem às vezes na utilização de elevadores fatores de ajuste campo-laboratório.

2.2.2 *Classificação das misturas asfálticas quanto à temperatura de produção*

A partir da temperatura empregada em sua produção, as misturas asfálticas podem ser divididas em quatro grupos: misturas quentes (HMA), misturas mornas (WMA), misturas semimornas (HWMA) e misturas frias.

Nas misturas à quente, os agregado e o ligante asfáltico são aquecidos com temperaturas variando entre 150°C e 180°C, esse tipo de mistura é a mais utilizada na pavimentação pelo fato de garantir boa resistência e durabilidade.

Na produção das misturas mornas e semimornas são utilizadas temperaturas intermediárias às das misturas a quente e a frio. O que diferencia estes dois tipos são a tecnologia empregada e a temperatura final de usinagem, uma vez que na faixa de temperatura entre 60°C e 100°C a mistura é semimorna e entre 100°C e 150 °C a mistura é morna.

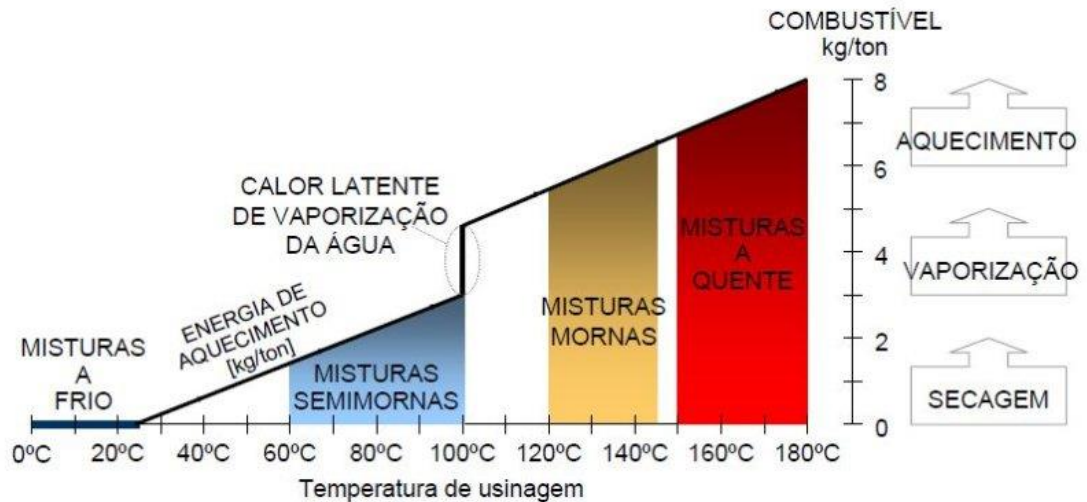
Nas misturas à frio não há a necessidade de aquecimento dos componentes da mistura, são utilizadas as emulsões asfálticas e normalmente são destinadas a revestimentos de pavimentos de baixo volume de tráfego por não serem tão resistentes quanto as demais.

Essa classificação também está relacionada com o consumo energético na produção das misturas asfálticas. O consumo de energia combustível nas misturas quentes, mornas e semimornas se dá no processo de secagem dos agregados e vaporização da água. Além disso, nas misturas à quente, esse consumo é ainda maior a fim de manter a temperatura da mistura bem como reduzir viscosidade do ligante asfáltico. De acordo com Motta (2011) nas misturas mornas e semimornas são utilizados agentes melhoradores de adesividade ou produtos que reduzem a viscosidade do ligante para que haja uma secagem efetiva dos agregados pétreos bem como adequado recobrimento dos agregados.

A Figura 1 apresenta a classificação das misturas asfálticas, indicando para cada tipo, o aumento do consumo de combustível de acordo com o acréscimo da temperatura de usinagem. As misturas mornas e semimornas são produzidas em temperaturas intermediárias

às das misturas à quente e à frio, sendo consideradas misturas de baixa energia, ainda que, no processo de secagem e vaporização da água, necessitem de elevado consumo energético. Nas misturas à quente há um alto consumo de combustível na usinagem, tendo em vista a necessidade de secagem dos agregados pétreos, manutenção da temperatura e redução da viscosidade do ligante asfáltico.

Figura 1 - Classificação por faixa de temperatura (D'Angelo, 2008a – Adaptado CCR Nova Dutra)



2.2.3 Influência da temperatura na produção das misturas asfálticas

Pela natureza viscosa dos materiais asfálticos, as temperaturas do ambiente e a do pavimento influenciam diretamente nas suas propriedades resilientes. Dessa forma, as misturas asfálticas acabam por ter um comportamento mecânico termo-visco-elastoplástico, o que significa que as curvas ‘tensão versus deformação’ desses materiais variam, também, com a temperatura (FRANCO, 2007).

Para o pavimento atingir, com eficácia, a sua função estrutural e funcional é necessário haver um permanente controle tecnológico dos materiais no momento de sua construção. Nesse controle é fundamental que a temperatura de usinagem e de compactação esteja de acordo com as obtidas nos projetos das misturas asfálticas. As temperaturas de mistura e de compactação são escolhidas a partir da curva viscosidade *versus* temperatura. Determinados ligantes exigem temperaturas mais elevadas para garantir boa viscosidade, mas que podem resultar no envelhecimento precoce da mistura (BUDNY, 2012).

Segundo AZARI et al. (2003) apud CERATTI (2007) a seleção de um intervalo apropriado de temperatura de compactação é um importante aspecto da preparação de corpos de prova em laboratório e de lançamento de misturas asfálticas, porque a temperatura afeta o

teor ótimo de ligante, o grau de envelhecimento, a absorção do asfalto, a estrutura do agregado e a densidade da mistura compactada, que por sua vez afetam o desempenho da mistura asfáltica.

O manuseio e estocagem do ligante asfáltico devem ser feitos com a temperatura mais baixa possível a fim de evitar o envelhecimento do ligante, que influencia no desempenho da mistura asfáltica. A exposição do ligante às altas temperaturas e as intempéries leva à perda de voláteis e à sua oxidação, o que acelera o processo de fissuramento das misturas. Tem-se, ao longo dos anos, tentado diminuir este efeito com adição de produtos e novas tecnologias executivas (CAVALCANTI, 2010).

De forma geral, quanto mais quente a mistura, mais fluido o ligante e menos resistente é a mistura à compactação. Segundo o ASPHALT INSTITUTE (1989) o limite superior de temperatura de mistura é aproximadamente 150°C, pois, temperaturas maiores podem causar danos ao asfalto pela aceleração do envelhecimento. Assim sendo, a melhor temperatura para iniciar a rolagem (compactação) é a máxima temperatura entre 85° e 150°C na qual a mistura suporte o rolo compactador sem deslocamentos horizontais ou fissuramento.

2.3 Misturas Asfálticas Mornas

As misturas mornas se referem a um grupo de tecnologias que vêm sendo desenvolvidas desde à década de 90 com o intuito de diminuir a temperatura de produção e aplicação das misturas asfálticas em cerca de 30°C ou mais, em relação às misturas a quente convencionais, mantendo-se o mesmo desempenho destas últimas (Prowell e Hurley, 2007).

Após o ano de 1997, quando foi firmado o protocolo de Quioto, alguns países começaram a desenvolver os primeiros pavimentos com misturas asfálticas mornas. Na Europa, a Alemanha e a Noruega foram os países pioneiros na pesquisa e execução de pavimentos, a partir de 1995, utilizando diferentes tecnologias e, posteriormente, o tema foi introduzido nos Estados Unidos em 2002 (MOTTA, 2011).

De acordo com Portugal (2016) a diminuição da temperatura na produção de misturas asfálticas é desejável sob diversos aspectos. As reduções das emissões de gases poluentes e do consumo de energia tem grande importância no aspecto da sustentabilidade. De acordo com Rubio et al. (2012) trabalhar com misturas asfálticas à quente causam impacto ambiental negativo colaborando com o aquecimento global, visto que produzem emissão de gases de efeito estufa, assim como substâncias químicas poluentes que prejudicam a qualidade do ar.

Segundo Cavalcanti (2010) estas tecnologias permitem a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do ligante em temperaturas de 20 a 55°C mais baixas que a temperatura

das misturas quentes. Assim, há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante e, conseqüente melhoria no desempenho em termos de resistência a formação de trincas.

Ínfimos produtos e processos possuem eficácia de diminuir a temperatura na qual o asfalto quente é misturado, sem danificar o desempenho estrutural dos pavimentos. As produções com estes novos produtos podem ser reduzidas em 40%. Minorar a temperatura de mistura na usina simboliza, entre outras coisas, a economia de custos com combustíveis ao contratante. Apurou-se que uma geração de redução de 30% no consumo de energia combustível é conseqüência da diminuição de temperatura de usinagem (OTTO, 2009).

2.3.1 Benefícios das misturas asfálticas mornas

As misturas mornas apresentam vários benefícios quando comparada às misturas asfálticas convencionais, os quais a literatura elenca alguns deles, como:

- a) redução da emissão de poluentes atmosféricos;

As temperaturas mais baixas geram menores quantidades de poluentes lançados ao ar, não só porque são emitidos menos vapores e fumos de asfalto durante a mistura em usina e a aplicação em campo, mas também porque parte do combustível que seria utilizado na usinagem deixa de ser queimado (PROWELL E HURLEY, 2007). O relatório emitido pela South Africa Bitumen Association – SABITA (2011) expõe que investigações realizadas nas usinas de asfalto americanas concluíram que, quando a temperatura de produção reduz de 29°C a 43°C, há diminuição de emissão de materiais particulados entre 67% e 77%, enquanto o nível dos fumos do asfalto, medido por meio do método de materiais solúveis em benzeno, foi reduzido na faixa de 72% a 81% comparado com a mistura de referência à quente.

A Figura 2 apresenta uma comparação visual da aplicação de misturas asfálticas à quente e mornas na Rodovia Bandeirantes (SP), onde foi possível observar redução expressiva da poluição gerada pelos fumos de asfalto.

Figura 2 - Comparação visual da emissão de fumos de asfalto gerados na mistura à quente e na mistura morna. SINICESP, 2013.



b) diminuição do consumo energético;

A mistura morna necessita de menores temperaturas para serem aquecidas, portanto o consumo de energia no aquecimento é reduzido, promovendo diminuição no consumo de combustíveis fósseis. A secagem e vaporização da água e aquecimento dos agregados pétreos é uma etapa que demanda grande consumo energético, com o gasto de combustível aumentando em 10% para cada 1% a mais de água nos agregados. Prowell e Hurley (2007) afirmam em seu estudo que a economia de combustível fóssil em vários projetos que utilizaram a mistura morna variou de 20% a 35%, todavia, essa economia está relacionada com alguns fatores como temperatura de produção, umidade dos agregados e detalhes característicos das usinas de asfalto.

c) melhoria do ambiente de trabalho;

A redução da temperatura na produção das misturas asfálticas, bem como na aplicação dessas, promove melhores condições de trabalho, uma vez que produtos asfálticos submetidos a elevadas temperaturas, dissipam elementos suspeitos de serem carcinogênicos e/ou mutagênicos. A aplicação do WMA possibilita aos operários um ambiente de trabalho com melhor qualidade, pois as temperaturas são mais agradáveis e com menores odores, contribuindo um aumento na segurança e na produção dos mesmos à exposição às altas temperaturas (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007).

d) menor envelhecimento do ligante asfáltico;

O aquecimento do ligante asfáltico em temperaturas elevadas, mesmo ocorrendo por um curto período de tempo, assim como acontece durante a usinagem, pode provocar um elevado envelhecimento. (BERNUCCI et al., 2010).

A diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico, devido à redução de temperatura na produção da mistura asfáltica morna, resulta também em melhoria na flexibilidade e resistência à fadiga da mistura e também resistência ao surgimento de trincas térmicas (SABITA, 2011).

e) uso de maiores quantidades de material fresado;

A utilização de material reciclado deixa a mistura asfáltica menos trabalhável e a tecnologia da mistura morna traz benefícios neste aspecto, de modo que permite a adição de maior quantidade de material reciclado. Este potencial é por causa da redução de temperatura de usinagem, o que produz menor envelhecimento do ligante, neutralizando a rigidez do ligante do material reciclado (RUBIO et al., 2012).

f) aplicação em locais ou épocas de clima muito frio e maior habilidade de transporte por longas distâncias;

A redução da temperatura de aplicação das misturas asfálticas mornas, em relação às convencionais, possibilita que essas sejam executadas em ambientes frios bem como permite o aumento das distâncias de transporte ou da quantidade de frentes de serviço sem que a mistura perca qualidade. O emprego de misturas mornas pode ser favorável nas situações em que há grande preocupação com a queda significativa de temperatura da mistura, que acarretam em dificuldades de compactação e em perda de material, uma vez que a taxa de esfriamento é dada pela diferença de temperatura entre a mistura asfáltica e o meio ambiente. Neste caso, a mistura produzida em temperatura mais baixa esfria sob uma taxa menor, possuindo menor gradiente térmico que uma mistura mais quente (PROWELL E HURLEY, 2007).

g) melhoria na compactação;

De acordo com Hanz & Bahia (2013) apud Merighi (2015) pode-se afirmar que o ligante asfáltico, quando a mistura é compactada em temperaturas baixas, se comporta no regime hidrodinâmico devido à existência de condições adequadas para as superfícies das partículas serem totalmente separadas, por esse motivo, os aditivos orgânicos de mistura morna ajudam na compactação reduzindo a fricção interna do ligante asfáltico.

2.3.2 *Possíveis desvantagens das misturas asfálticas mornas*

De acordo com Motta (2011) a redução da temperatura na fabricação de misturas mornas e semimornas pode suscitar questionamentos principalmente quanto à secagem adequada dos agregados e ao recobrimento eficiente dos agregados pelo ligante. Isto porque a secagem dos agregados poderia não ocorrer de maneira efetiva e o cobrimento dos agregados

poderia ficar prejudicado pela menor viscosidade do ligante na mistura (causando falta de homogeneidade e dificultando a compactação). Todavia, as técnicas de misturas semimornas e mornas geralmente buscam contornar estas situações, por exemplo com o uso de agentes melhoradores de adesividade ou de produtos que reduzem a viscosidade do ligante.

Segundo uma pesquisa realizada no *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) (2011), as misturas asfálticas mornas tendem a reduzir levemente a resistência à tração indireta, causada pela suscetibilidade ao dano por umidade retida no agregado. A partir desta pesquisa também se conclui que a redução da temperatura poderia resultar em um ligante menos rígido, uma vez que a oxidação é menor, podendo acarretar em menor resistência à formação de trilha de roda e resistência a tração deficiente. No entanto, como benefício, uma mistura menos rígida pode melhorar a resistência à fadiga, aumentando o tempo de vida de projeto (MERIGHI, 2015).

Wall (2012) apud Wargha Filho (2013) afirma que apesar de possuir muitos pontos positivos, a mistura morna por si só não pode ser considerada a resposta para todos os problemas ligados à sustentabilidade na produção de misturas asfálticas. A reciclagem de revestimentos envelhecidos, que utilizaria parte de agregados outrora descartados, poderia também trazer resultados ambientais expressivos. Verifica-se assim que, seja por meio da redução do consumo de energia utilizado na produção, da reutilização de matéria prima ou da redução de emissão de gases de efeito estufa, estão sendo estudadas formas para se atingir o objetivo comum, que é de minimizar os impactos ao meio ambiente sem que isso represente a perda da durabilidade ou do produto final.

Se por um lado as vantagens estão sendo pouco a pouco comprovadas, por outro não se tem ainda resultados do desempenho em longo prazo destas misturas, justamente por ser relativamente cedo para se fazer a referida avaliação. Desta forma, estudos e pesquisas são necessários para obter os resultados, tanto em laboratório como em campo para se comprovar a eficácia de misturas usinadas a temperaturas moderadas, com os agregados disponíveis no Brasil (WARGHA FILHO, 2013).

2.4 Tecnologias utilizadas na obtenção de misturas asfálticas mornas

A redução da temperatura alcançada pela mistura asfáltica morna advém do uso de tecnologias que têm sido desenvolvidas nos últimos anos, e que podem ser classificadas em três grupos: aditivos orgânicos, aditivos químicos, e os processos de formação de espuma que

contém água ou à base de água. Embora todos eles apresentem o mesmo objetivo, o processo de fabricação é diferente (RUBIO, 2011, *apud* PORTUGAL, 2016).

Geralmente, de forma combinada a estes elementos, procede-se à diminuição da temperatura dos agregados para que a usinagem ocorra em temperatura reduzida, visto que o material pétreo compõe a maior parte de uma mistura asfáltica (cerca de 95%) e isto já seria suficiente para baixar a temperatura de usinagem de maneira significativa. Entretanto, a diminuição da temperatura do ligante também se faz interessante, visto que isto pode contribuir para o menor envelhecimento/enrijecimento do asfalto (MOTTA, 2011).

2.4.1 *Espumejo do Asfalto*

Como explica Budny (2012) o espumejo do asfalto pode ser obtido a partir do contato da água com o asfalto aquecido, de tal forma que a sua temperatura aumenta rapidamente até atingir 100°C. Este processo gera um expressivo aumento do volume do ligante e resulta na formação da espuma asfáltica. Esta espuma atua lubrificando os agregados no ligante pela redução da viscosidade, melhorando assim a trabalhabilidade do produto e facilitando a mistura e aplicação em temperaturas mais baixas.

Nas tecnologias que fazem uso deste recurso, a água é introduzida no processo de usinagem por injeção direta, por agregado úmido ou na forma de material hidrofílico como as zeólitas. Quando esta água se dispersa no ligante aquecido e se torna vapor há a expansão do ligante, resultando em diminuição da viscosidade da mistura (PROWELL e HURLEY, 2007).

Esse tipo de tecnologia requer adaptações significativas na usina de asfalto e o projeto de mistura asfáltica precisa ser revisado para incluir injeção de água e etapas de ação da espuma de asfalto até chegar à meia vida (PERKINS, 2009).

Um cuidado que deve ter ao escolher este tipo de tecnologia é a quantidade de água a ser inserida no ligante, que deve ser suficiente para causar o efeito espuma, e não superior, que possa causar problemas de falta de adesividade (RUBIO et al., 2012).

Exemplos desta tecnologia comercializada é o processo LEA (*Low Energy Asphalt*), Advera® WMA, Aspha-Min®, Double Barrel® Green e WAM-Foam.

2.4.2 *Aditivos Surfactantes*

Aditivos surfactantes são tecnologias que se baseiam na introdução desses no ligante asfáltico ou em emulsões com elevado teor de resíduo asfáltico com o intuito de produzir misturas mornas e semimornas (SILVA, 2016). Esse tipo de produto proporciona uma ótima adesividade do material, aumentando a ligação entre o ligante e os agregados, além do que, aperfeiçoamento no processo de recobrimentos dos agregados. Esse tipo de aditivo

geralmente não modifica as propriedades de consistência do ligante, que são viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (MOTTA, 2011).

Os estudos de Hanz et al. (2010) comprovaram que a incorporação de aditivo surfactante ao ligante estudado não modificou a viscosidade desse. No entanto, houve melhorias nas propriedades lubrificantes, levando os autores a concluírem que a viscosidade não deve ser o único parâmetro avaliado no contexto de misturas mornas, devendo a lubricidade ser estudada de maneira mais aprofundada.

Atualmente, existem diversos produtos desta tecnologia no mercado de pavimentação. O aditivo pode ser inserido na mistura asfáltica durante a usinagem ou adicionado ao tanque contendo ligante asfáltico, dependendo do tipo de aditivo utilizado (AUSTROADS, 2012).

Dentre alguns exemplos de tecnologias de aditivos surfactantes tem-se: Cecabase RT®, Evotherm™, Gemil XT14, QPR®, QualiTherm, Rediset VMX.

2.4.3 *Aditivos Orgânicos*

Segundo Bonaquist (2011) apud Moraes (2018) os aditivos orgânicos (ceras) foram um dos primeiros tipos de aditivo para mistura asfáltica morna desenvolvida na Europa. A introdução de aditivos orgânicos tem por objetivo promover a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, isto quer dizer que, quando submetidos a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento, causam a redução da viscosidade do ligante.

O uso de aditivos orgânicos em forma de cera em misturas asfálticas tem bons resultados em programas experimentais e aplicações de campo em diversos locais. Estes aditivos permitem a produção e a compactação de misturas asfálticas a temperaturas reduzidas. Estes também são conhecidos como fileres inteligentes pois promovem uma redução da viscosidade do ligante asfáltico na temperatura de produção e compactação das misturas asfálticas e um aumento desta viscosidade na temperatura de serviço do revestimento (WARGHA FILHO, 2013).

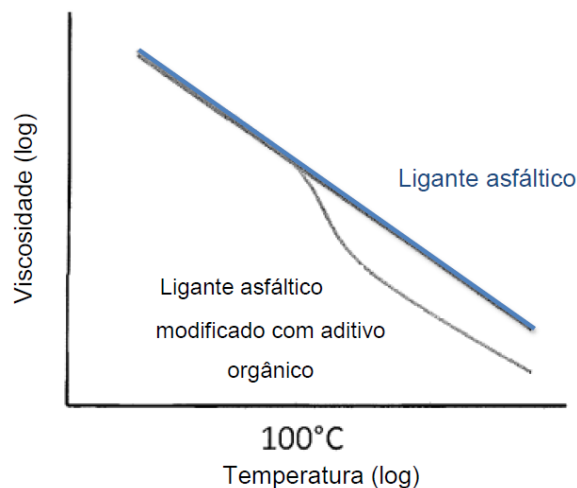
Segundo Motta (2011) os aditivos orgânicos podem ser introduzidos previamente no ligante, ou juntamente com este durante a usinagem, possibilitando redução da temperatura de mistura em cerca de 30°C a 40°C.

A escolha do aditivo orgânico deve ser feita minuciosamente, averiguando o ponto de amolecimento do aditivo e a temperatura de produção da mistura asfáltica, tanto para que não ocorra deformação permanente quanto para diminuir o potencial de trincamento térmico (PROWELL; HURLEY, 2007).

Entre alguns aditivos encontrados no mercado pode-se citar o Sasobit, produzido pela Sasol, CCBIT 113AD, realizado pela Dr. H Technologies e o Asphaltan-B, preparado pela Romonta GmbH. O Sasobit é uma cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão e exige pouca modificação na usina; o aditivo pode ser inserido diretamente no ligante ou na mistura (D'ANGELO et al., 2008).

A Figura 3 apresenta o comportamento da viscosidade de um ligante asfáltico modificado com aditivo orgânico, o qual apresenta viscosidade menor em temperaturas maiores quando comparado a um ligante não modificado.

Figura 3 - Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico conforme a variação da temperatura (MERIGHI, 2015)



2.4.3.1 Óleo de cozinha residual

De acordo com Reis et al (2007) os óleos vegetais são largamente consumidos para a preparação de alimentos nos domicílios, estabelecimentos industriais e comerciais de produção de alimentos. Segundo a CONAB (2016), diante da produção nacional de grãos, a soja lidera com 48% e milho em segundo lugar com 39%. Alternativas para o reuso do óleo residual é uma solução ecologicamente correta para o descarte, em substituição ao lançamento inadequado no meio ambiente.

Os óleos e gorduras são substâncias insolúveis em água (hidrofóbicas), de origem animal, vegetal ou mesmo microbiana, formadas predominantemente de produtos de condensação entre "glicerol" e "ácidos graxos" chamados triglicerídeos. Durante o aquecimento do óleo, no processo de fritura, ao mesmo tempo em que se infere ao alimento características organolépticas favoráveis, uma complexa série de reações produz numerosos compostos de degradação. Ultrapassando-se a temperatura de 200°C na fritura de alimentos

utilizando óleo de milho, há uma diminuição dos ácidos graxos e a elevação da viscosidade (MORETTO e FETT, 1998 apud RABELO e FERREIRA, 2008).

A fritura por imersão é um processo que utiliza óleos ou gorduras vegetais como meio de transferência de calor, cuja importância é indiscutível para a produção de alimentos em lanchonetes e restaurantes comerciais ou industriais em nível mundial. Em estabelecimentos comerciais, utilizam-se fritadeiras elétricas descontínuas com capacidades que variam de 15 a 350 litros. Já em indústrias de produção de empanados, salgadinhos e congêneres, o processo de fritura é normalmente contínuo e a capacidade das fritadeiras pode ultrapassar 1000 litros (NETO et al, 2000).

O resíduo do óleo de cozinha, gerado diariamente nos lares, indústrias e estabelecimentos do país, devido à falta de informação da população, acaba sendo despejado diretamente nas águas, como em rios e riachos ou simplesmente em pias e vasos sanitários (CASTELLANELLI *et al.*, 2007).

Quando despejados nas redes coletoras de esgoto, por ser menos denso que a água, o óleo de cozinha forma uma película sobre a mesma, o que provoca a retenção de sólidos, entupimentos e problemas de drenagem. Nos arroios e rios, a película formada pelo óleo de cozinha dificulta a troca de gases entre a água e a atmosfera, causando a morte de peixes e outros seres vivos que necessitam de oxigênio. O óleo de cozinha jogado diretamente na pia pode prejudicar o meio ambiente. Se o produto for para as redes de esgoto encarece o tratamento dos resíduos em até 45% e o que permanece nos rios provoca a impermeabilização dos leitos e terrenos, o que contribui para que ocorram as enchentes (LOPES e BALDIN, 2009).

Para Reis et al. (2007) o óleo de cozinha usado, quando retornado à produção, além de evitar a degradação do meio ambiente e os consequentes custos socioeconômicos, também cumpre o papel de evitar o gasto de recursos escassos, tais como os ambientais, humanos, financeiros e econômicos - terra, água, fertilizantes, defensivos agrícolas, maquinário, combustível, mão-de-obra, financiamento bancário, fator tempo, entre outros.

O principal objetivo para as várias pesquisas que foram desenvolvidas durante anos com emprego de óleos vegetais é alcançar um destino melhor para o reaproveitamento desse óleo de cozinha residual. Uma aplicação ecologicamente correta pode ser a utilização deste, em pequena percentagem, para substituição parcial ao ligante asfáltico empregado na produção de misturas asfálticas semimornas e mornas, para a melhoria no asfalto envelhecido (PORTUGAL, 2016).

2.4.3.2 Utilização do óleo de cozinha residual na pavimentação

A necessidade de proporcionar uma destinação correta ao óleo de cozinha residual bem como a busca por tecnologias aplicadas a pavimentação asfáltica que diminuam os danos ao meio ambiente, tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas a partir da incorporação do óleo de cozinha residual ao ligante asfáltico a fim de obter misturas asfálticas mornas.

A cadeia apolar do óleo de soja tende a promover a redução da viscosidade do ligante asfáltico por apresentar uma estrutura molecular mais organizada. Esta redução influencia positivamente a mistura, resultando em uma consequente redução da tensão superficial entre o agregado e o ligante, expulsando o ar retido e fortalecendo a coesão interfacial entre estes, melhorando, desta forma, as propriedades mecânicas (KAMARUDDIN et al, 2014; MAHARAJ et al, 2015).

De acordo com Chen et. al. (2014) o óleo de cozinha residual, comparado com outros componentes de baixa viscosidade, tem o ponto de fulgor acima de 220°C, o que significa que o cozimento do óleo de cozinha residual tem uma elevada segurança para aplicação nas misturas asfálticas. Além disso, o óleo de cozinha residual já passou pelo processo de cozedura em altas temperaturas, e consequentemente, quando aquecido novamente, não apresentará componentes voláteis como gases tóxicos.

Algumas pesquisas (Asli *et al* (2012), Zargar *et al* (2012), Portugal (2016), Osmari e Aragão (2016)), vêm sendo desenvolvidas a partir da adição de óleo de cozinha residual ao ligante asfáltico tanto na produção de misturas asfálticas semimornas e mornas, como no rejuvenescimento do asfalto envelhecido.

Portugal (2016) avaliou as propriedades físicas e reológicas de ligantes asfálticos modificados com óleo de soja e de milho, novo e residual. Em seu estudo foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, curva mestra, MSCR e PG para amostras de CAP 50/70 e AMP 55/75, sem adição de óleos, e após serem modificados com teores de 1%, 2% e 3% de óleo de soja e de milho, novos e residuais. O autor comprovou a viabilidade do uso desse modificador por meio da obtenção de diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, com consequente diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas estudadas.

Osmari e Aragão (2016) avaliaram a capacidade de rejuvenescimento de um ligante asfáltico a partir do emprego de resíduo de óleo vegetal. O ligante foi testado nos estados virgem, envelhecido e rejuvenescido em ensaios de caracterização de propriedades fundamentais do material, como viscosidade, módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase. Os resultados indicaram que o óleo foi de eficiente na recuperação das características

originais do ligante envelhecido, já que reduziu sua viscosidade e rigidez e aumentou o seu ângulo de fase a níveis semelhantes aos do ligante virgem.

Asli *et al* (2012) estudaram a utilização de óleo de cozinha residual (OMA) para rejuvenescer o ligante asfáltico. Os autores estudaram o ligante na forma original, envelhecido e rejuvenescido com óleo, por meio de ensaios convencionais: ponto de amolecimento, penetração e viscosidade rotacional. Adicionou-se para cada grupo de ligante, 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de óleo de cozinha residual. A pesquisa mostrou o potencial do óleo de cozinha residual para a reciclagem do ligante asfáltico. Esta solução diminuiria os custos de manutenção do pavimento, já que não houve diferença significativa entre o ligante original e o rejuvenescido.

Zargar *et al* (2012) estudaram a utilização de óleo de cozinha residual (OMA) com a finalidade de rejuvenescimento do CAP envelhecido. As propriedades físicas e químicas do ligante original, envelhecido e rejuvenescido, foram medidas e comparadas pelos ensaios de ponto de amolecimento, penetração, viscosidade Rotacional, reômetro de cisalhamento dinâmico e espectroscopia de infravermelho. Os testes foram realizados com os teores de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de OMA, por peso de ligante. O autor verificou que à medida que a temperatura aumentou de 30°C para 80°C, o módulo de cisalhamento complexo diminuiu progressivamente. O CAP envelhecido possui um ângulo de fase inferior ao CAP virgem. Na pesquisa foi verificado que a aplicação de OMA como um rejuvenescedor para ligante envelhecido irá introduzir uma solução ambiental e econômica para a reutilização deste resíduo.

Martins (2017) avaliou o efeito da adição do óleo de soja ao ligante asfáltico do tipo CAP 50/70, nas formas novas e residuais, utilizado em misturas asfálticas produzidas em temperaturas iguais e inferiores às determinadas pelo ensaio de viscosidade rotacional. A partir dos ensaios mecânicos realizados, o autor confirmou a viabilidade da utilização do óleo de soja residual como aditivo nas misturas asfálticas, reduzindo as temperaturas de usinagem e compactação em aproximadamente 15°C.

Silvério (2017) avaliou o efeito da adição de 1% e 2% de óleo de soja novo e residual, respectivamente, ao AMP (Asfalto Modificado por Polímeros) 55/75. Por meio de ensaios mecânicos a autora verificou o efeito de reduções de temperatura durante a produção de misturas asfálticas compostas pelo ligante modificado, e concluiu que reduções de até 16°C não comprometeram o desempenho destas.

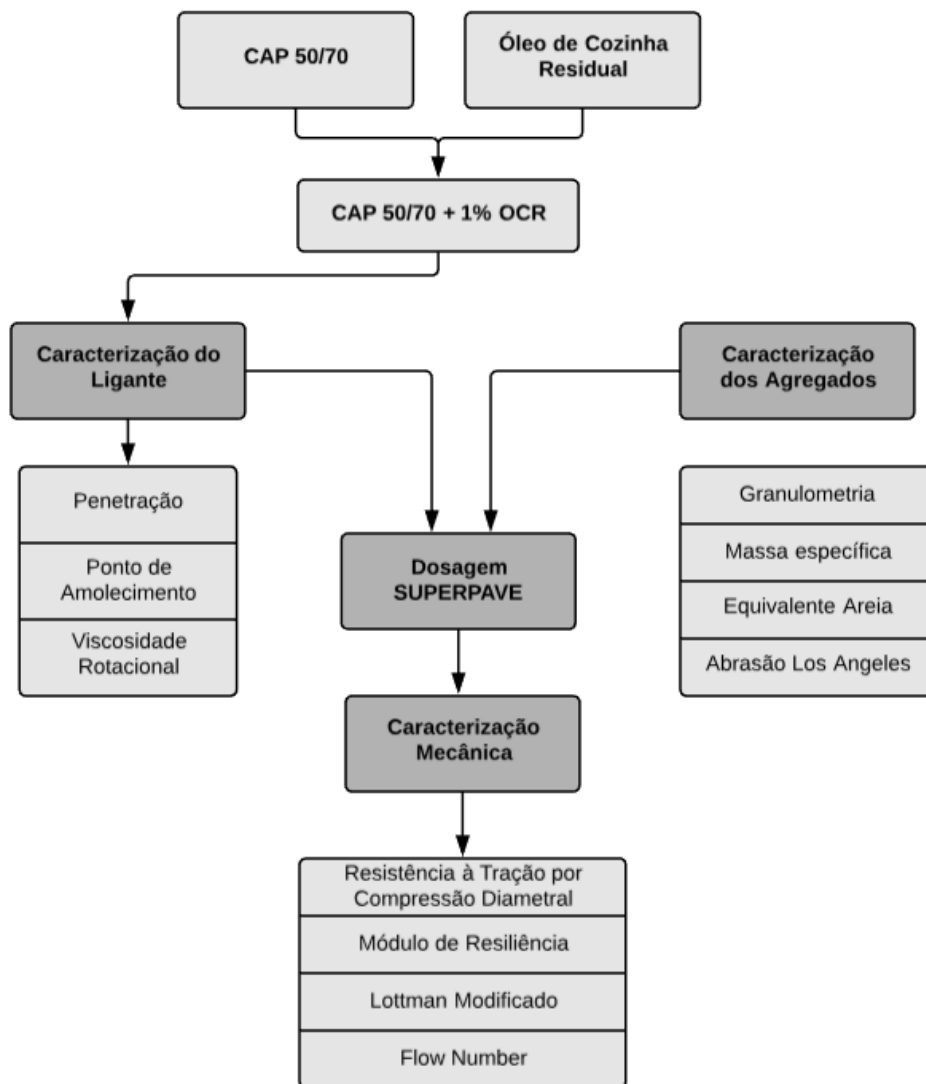
Barros (2017) estudou a adição de 2% óleo de milho novo e 1% de óleo de milho residual ao ligante asfáltico modificado por polímero SBS sob os aspectos das propriedades mecânicas das misturas asfálticas. As misturas foram produzidas nas temperaturas determinadas a partir o ensaio de viscosidade rotacional, bem como a 10 °C e 20 °C abaixo destas. Os resultados apontam que as adições de óleo, assim como as reduções de temperatura da produção das misturas asfálticas, tendem a reduzir a resistência à tração, rigidez e resistência à deformação permanente das misturas. Mesmo com estas reduções, estes parâmetros atenderam aos requisitos exigidos para o desempenho do pavimento.

Sendo assim, pode-se perceber que a atenção dada à destinação adequada dos resíduos dos óleos vegetais culminou em pesquisas que objetivam o emprego adequado destes resíduos, aplicando essa vertente sustentável na pavimentação asfáltica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia que foi utilizada no desenvolvimento da pesquisa. Os ensaios de laboratório foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O fluxograma referente à metodologia encontra-se na Figura 4.

Figura 4 - Etapas para o desenvolvimento da pesquisa



3.1 Materiais

Os materiais utilizados para compor as misturas asfálticas foram o ligante asfáltico do tipo CAP 50/70 obtido pela GRECA Asfalto localizada em Maracanaú – CE; óleo de cozinha residual (OCR) (Figura 5) de diferentes origens (comercial, industrial e residencial), coletados

em estabelecimentos comerciais e residências na cidade de Campina Grande – PB. Os agregados utilizados foram a brita 19 mm e 9,5 mm, e o pó de pedra (de origem granítica e provenientes da mineradora do Grupo Rocha Cavalcante), além de areia de leito de rio. A cal hidratada da marca MegaO foi utilizada como filer (Figuras 6 e 7).

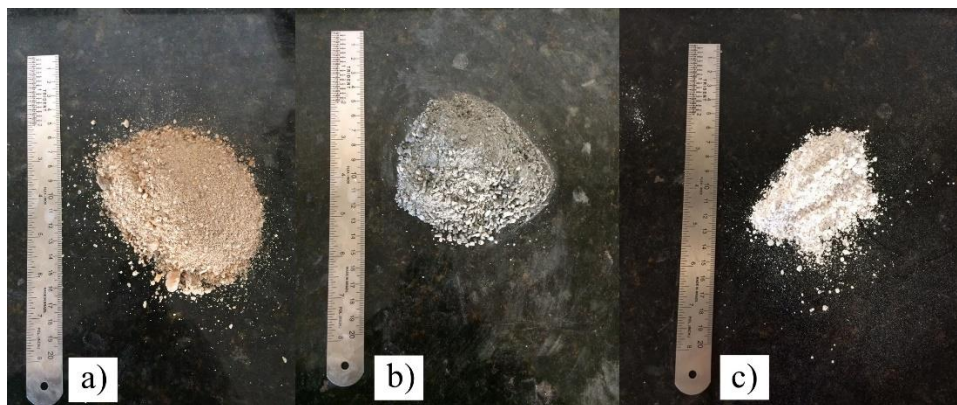
Figura 5 - Óleo residual obtido a partir de diferentes origens



Figura 6 - Agregados graúdos: (a) Brita 19mm (b) Brita 9,5mm



Figura 7 - Agregados miúdos e filler: (a) Areia; (b) Pó de Pedra; (c) Cal hidratada.



3.2 Métodos

3.2.1 *Produção da mistura do ligante asfáltico com o óleo residual*

A incorporação do modificador ao ligante asfáltico foi realizada a partir da adição de 1% em peso de óleo de cozinha residual (OCR). Esta porcentagem foi determinada de acordo com a pesquisa de Santos (2018), que incorporou esse mesmo óleo ao ligante asfáltico e encontrou 1% como sendo o teor que forneceu melhores resultados dentre os ligantes estudados pela autora. A mistura do óleo com o ligante foi realizada utilizando um agitador mecânico FISATOM, Modelo 722 (Figura 8) com as condições de temperatura e rotações controladas. O ligante fluido, previamente aquecido em estufa por uma hora e meia, foi inserido no misturador mecânico com rotações de 300 rpm. Ao ser atingida a temperatura de 135°C, foi adicionado o teor de óleo e aumentou-se o número de rotações para 406 rpm, durante um intervalo de 20 minutos.

Figura 8 - Agitador Mecânico utilizado para a mistura do ligante



3.2.2 *Caracterização dos ligantes asfálticos*

A caracterização do ligante asfáltico puro e modificado com óleo de cozinha residual foi realizada a partir dos ensaios de penetração (DNIT-ME 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT-ME 131/2010) e viscosidade rotacional (ASTM D 4402). A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir desses ensaios.

Tabela 1 - Ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos

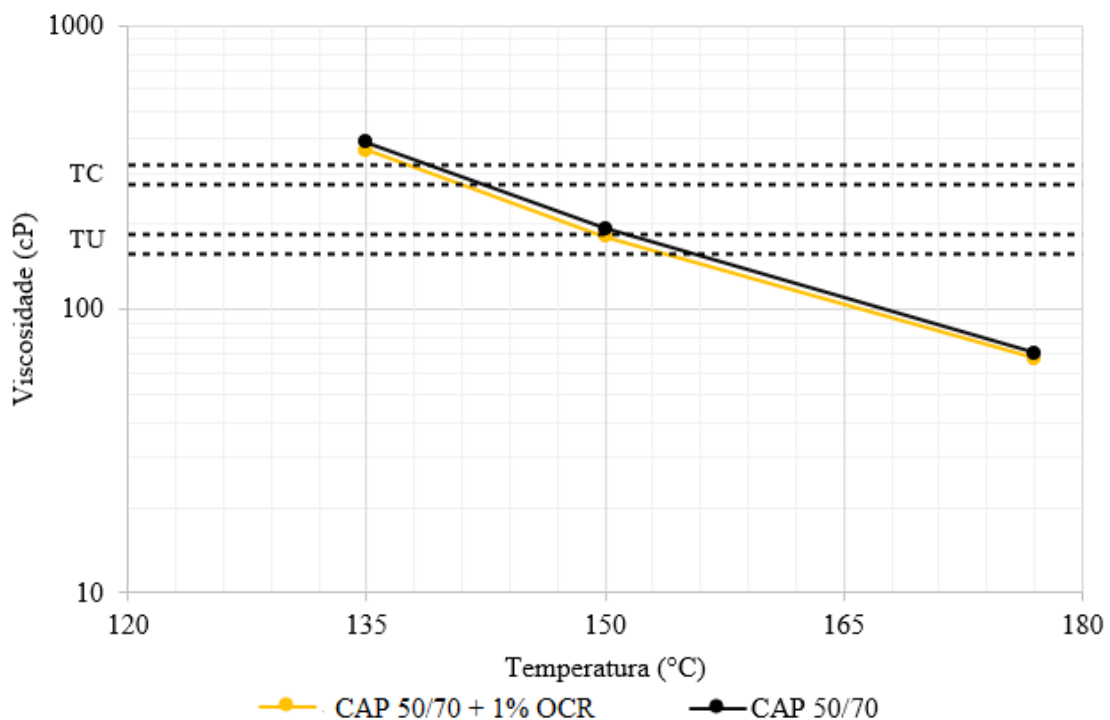
Procedimento	CAP 50/70	+ 1% OCR
--------------	-----------	----------

Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	64	80,5
Ponto de amolecimento, °C	48,8	46
Viscosidade Rotacional a 135°C, cP	390	363,75
Viscosidade Rotacional a 150°C, cP	192,5	180,8
Viscosidade Rotacional a 177°C, cP	70,25	67,25

Os resultados de caracterização de ligantes asfálticos indicou a tendência de ligantes modificados com óleo, que é a redução da consistência e viscosidade. Os resultados dos ensaios de penetração indicou que o ligante com adição de óleo apresentou maior valor de penetração, indicando menor consistência quando comparado ao ligante puro. A temperatura de fusão do ligante modificado apresentou queda quando comparada ao ligante puro, se enquadrando na temperatura mínima de amolecimento estabelecido pela ANP (2005) para ligantes do tipo CAP 50/70 que é de 46°C. O ensaio de viscosidade rotacional confirmou a diminuição da viscosidade do ligante a partir da adição do óleo, percebidos também a partir da diminuição da consistência e diminuição da temperatura de escoamento do ligante.

As temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas foram obtidas a partir do gráfico de temperatura versus viscosidade, plotado de acordo com os resultados do ensaio de viscosidade rotacional (Figura 9).

Figura 9 - Gráficos de viscosidade x temperatura



O manual de projeto de misturas asfálticas do SUPERPAVE indicou que, a temperatura apropriada de usinagem é aquela na qual o ligante asfáltico apresenta viscosidade de 170 ± 20 cP, enquanto a viscosidade adequada para a temperatura de compactação é de 280 ± 30 cP. Baseado nos valores médios destas faixas de viscosidades obteve-se as temperaturas apresentadas na Tabela 2.

A redução das temperaturas de usinagem e compactação não permitiu a classificação destas como morna, uma vez que a temperatura de usinagem é maior que 150°C . Todavia, no que diz respeito aos aditivos orgânicos e surfactantes, a redução das temperaturas de usinagem e compactação devem considerar não apenas os resultados dos ensaios de viscosidade, mas também constar estudos referentes à lubrificação da mistura asfáltica, tendo em vista que os óleos agem na interface agregado-ligante, permitindo o correto cobrimento do agregado pelo filme de asfalto, promovendo uma melhor lubrificação da mistura, o que proporciona acréscimo de trabalhabilidade em temperaturas inferiores (PORTUGAL, 2016).

Com isso, faz-se necessário a realização de ensaios mecânicos com misturas asfálticas incorporadas com este óleo em temperaturas inferiores às determinadas no ensaio de viscosidade. A partir das temperaturas de projeto determinadas nesse ensaio, denominadas também de “temperatura ótima”, reduziu-se 10°C e 20°C , visto que esta pesquisa teve por objetivo verificar a influência de temperaturas de trabalho menores que as de projeto.

Tabela 2 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos e reduções alcançadas

Amostra	Temperatura de usinagem ($^{\circ}\text{C}$)	Redução ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura de compactação ($^{\circ}\text{C}$)	Redução ($^{\circ}\text{C}$)
CAP 50/70	156	-	143,7	-
+ 1% OCR	152	4	139,8	3,9
+ 1% OCR -10 $^{\circ}\text{C}$	142	14	129,8	13,9
+ 1% OCR -20 $^{\circ}\text{C}$	132	24	119,8	23,9

3.2.3 Caracterização dos agregados

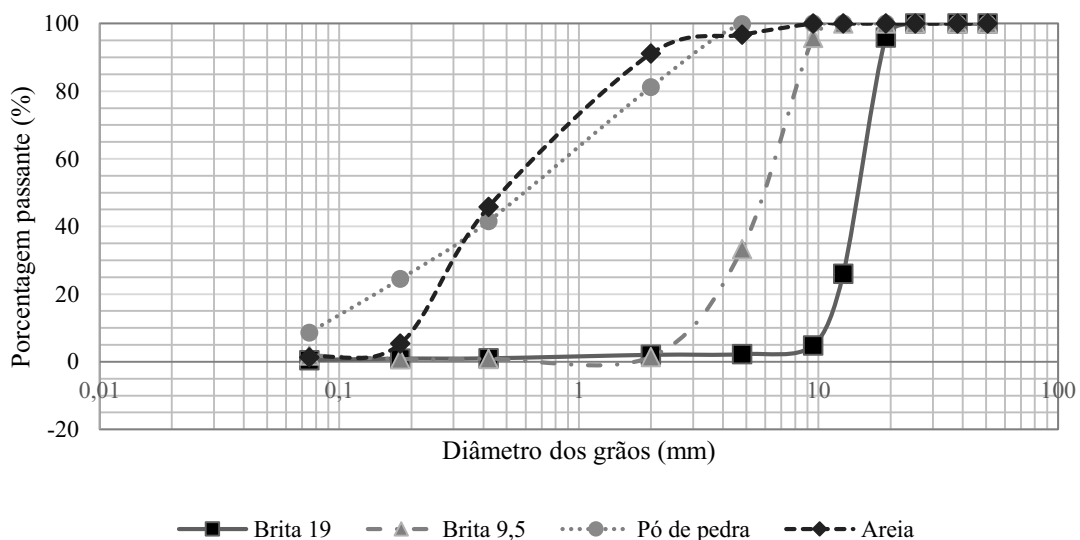
A caracterização dos agregados foi realizada por meio dos ensaios de massa específica do agregado graúdo e miúdo (DNIT-ME 081/98 e DNIT-ME 084/95, respectivamente); abrasão Los Angeles (DNIT 035/98 - ME); equivalente areia (DNIT 054/97 - ME), cujos resultados estão apresentados na Tabela 3, e granulometria dos agregados graúdos e miúdos (DNIT-ME 083/98), indicada na Figura 10.

Tabela 3 - Ensaios de caracterização dos agregados para a mistura asfáltica

Procedimento	Brita 19	Brita 9,5	Areia	Pó de pedra
Massa específica real, g/cm ³	2,775	2,722	2,576	2,54
Massa específica Aparente, g/cm ³	2,799	2,757	2,555	2,43
Abrasão Los Angeles, %	18,57	24,7	-	-
Equivalente de areia, %	-	-	75,8	54,20

A partir do resultado da granulometria, foi possível a construir as curvas da distribuição granulométricas dos agregados, apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados



3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

A metodologia SUPERPAVE utiliza pontos de controle, zonas de restrição e critérios de seleção de agregados para a dosagem. Outra importante característica do método é a curva de

densidade máxima. A curva de densidade máxima representa a distribuição dos tamanhos de partículas onde os agregados se encaixam da forma mais compacta possível. Esta, portanto, deve ser evitada de forma a permitir a inserção do filme asfáltico entre os agregados.

Nesta pesquisa, partiu-se da curva de fuller intermediária (Figura 11) para determinar as proporções dos agregados que compuseram a mistura asfáltica (Tabela 4) e enquadrando-os dentro das especificações da faixa granulométrica “C” preconizadas pelo DNIT. De posse disto, seguiu-se para a obtenção do teor ótimo de asfalto.

Figura 11 - Curva de Fuller

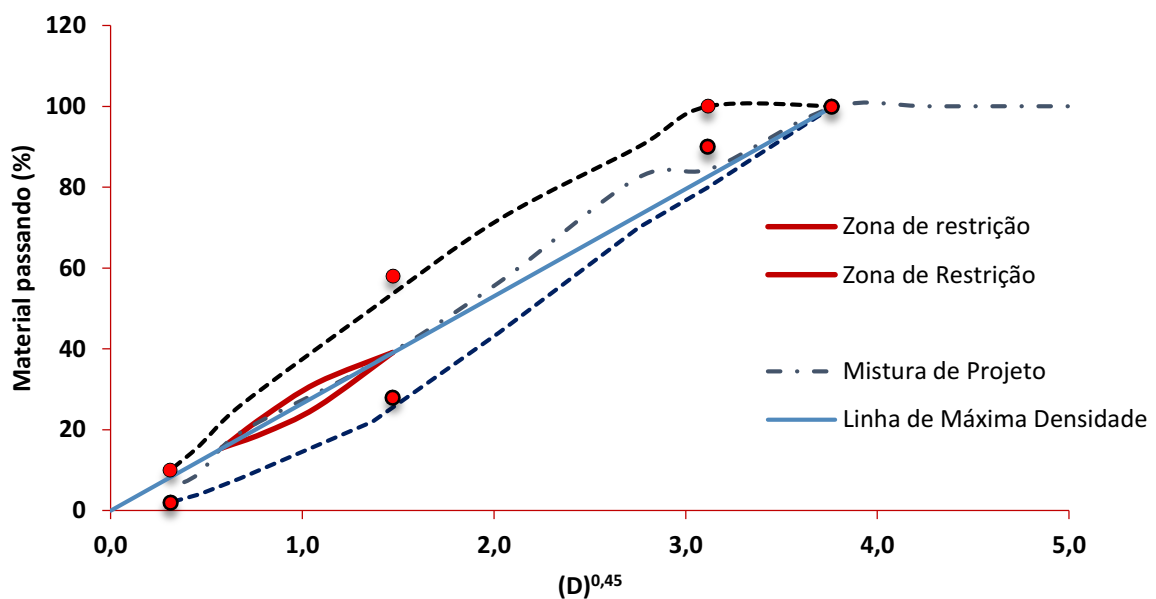


Tabela 4 - Proporções dos agregados na mistura

Brita 19	Brita 9,5	Areia	Pó de pedra	Fíller
18%	40%	15%	25%	2%

Os corpos de prova foram moldados utilizando o compactador giratório (Figura 12) com teor de ligante puro inicial estimado a 4,5%, como também nos teores de $\pm 0,5\%$ e $+1\%$ em relação a este. Após realizar a compactação desses corpos de prova, verificou-se os parâmetros volumétricos das misturas a partir da medição da densidade máxima medida (Gmm), obtida a partir do ensaio Rice Test, seguindo a norma ASTM D2041/11 (Figura 13). Desta forma, estimou-se o teor de ligante final de projeto, aquele em que a mistura asfáltica atendeu aos critérios de volume de vazios igual a quatro pontos percentuais (4%). Com isso,

obteve-se os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica utilizada ao longo da pesquisa, cujo teor ótimo de ligante asfáltico consistiu em 4,6%, conforme apresentado na Tabela 5.

Figura 12 - Compactador giratório SUPERPAVE



Figura 13 - Rice Test



Tabela 5 – Parâmetros volumétricos para a mistura com o teor ótimo de ligante puro

Teor de Ligante	%Gmm	%Vvp	%Vam	%RBV
4,6%	96,00	4,03	14,63	72,65

3.2.5 Propriedades mecânicas

A análise das propriedades mecânicas das misturas asfálticas foi realizada com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração indireta por compressão diametral (RT), dano por umidade induzida (Ensaio de *Lottman* Modificado), módulo de

resiliência à tração indireta por compressão diametral e ensaio uniaxial de carga repetida para obtenção do Flow Number.

3.2.5.1 Resistência à tração (RT) por compressão diametral

A resistência à tração é um parâmetro muito utilizado no Brasil para a caracterização de misturas asfálticas, sendo adotado desde 1972 para este fim (MOTTA, 2011).

Este ensaio consiste em determinar a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica até sua ruptura à temperatura de 25°C. Seguindo os procedimentos especificados da norma DNIT- ME 136/2010, duas forças diametralmente opostas são aplicadas a um corpo de prova cilíndrico por meio de frisos metálicos a partir de uma prensa mecânica (Figura 14), gerando tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. A carga é aplicada por meio de uma prensa mecânica, a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s.

A resistência máxima de tração suportada pela amostra é dada em MPa e calculada por meio da seguinte equação:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH}$$

Onde:

σ_t = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova

Figura 14 – Prensa mecânica

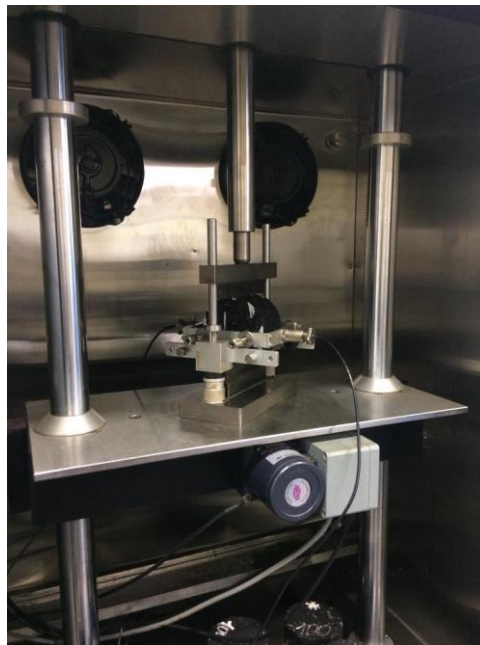


3.2.5.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado de acordo com a norma DNIT 135/2010. O procedimento parte do princípio da aplicação de uma carga compressiva em formato de onda pulsante repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular, que gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação, sendo então medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada.

O ensaio foi realizado em um equipamento composto por um sistema pneumático de carregamento com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, um sistema de medição do deslocamento axial do corpo de prova - LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) e um software para coleta e análise de dados (Figura 15). O procedimento consiste na aplicação, em compressão diametral, de 100 ciclos de uma carga de ondas quadradas, com valor igual a 10% da força da Resistência à Tração, frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com tempo de aplicação de 0,10 segundo seguido de 0,90 segundo de repouso. Para materiais viscoelásticos, esse ciclo de carregamento e descarregamento simula o efeito proveniente da passagem dos pneus dos veículos.

Figura 15– Equipamento utilizada para o ensaio de módulo de resiliência



3.2.5.3 Ensaio de Lottman modificado

Este procedimento foi realizado segundo os métodos especificados na AASHTO T283 (2014). Primeiramente, foram moldados os corpos de prova (CPs) com 1200g de mistura asfáltica, apresentando volume de vazios de $7\% \pm 1\%$. Os CPs foram divididos em dois

grupos: um com condicionamento e outro sem. O processo de condicionamento consistem em imergi-los em água e submete-los a uma pressão de vácuo, de forma a alcançar um grau de saturação dos vazios entre 70% e 80% (Figura 16). Em seguida, acondicionam-se os CPs saturados em sacos plásticos com aproximadamente 10 mL de água para leva-los à refrigeração à temperatura de -18°C , por um período mínimo de 16 horas. Posterior ao congelamento, os CPs seguem para um ciclo de aquecimento, onde foram imersos em um banho em água destilada com temperatura de 60°C , por um período de 24 horas. Por fim, os corpos de prova foram submetidos a outro banho em água destilada com temperatura de 25°C por um período de 2 horas, a fim de estabilizar sua temperatura e, por fim, rompê-los por meio do ensaio de resistência a tração por compressão diametral. O ensaio de resistência à tração foi realizado no primeiro conjunto de três CPs não-condicionado e no segundo conjunto de três corpos-de-prova após todo ciclo de condicionamento.

A resistência à tração retida por umidade induzida, dada em porcentagem, consiste na razão entre as resistências à tração das amostras previamente condicionadas (RTu) e das amostras sem condicionamento (RT).

Figura 16 – Equipamento utilizado para a aplicação do vácuo nos corpos de prova



3.2.5.4 Ensaio de Flow Number

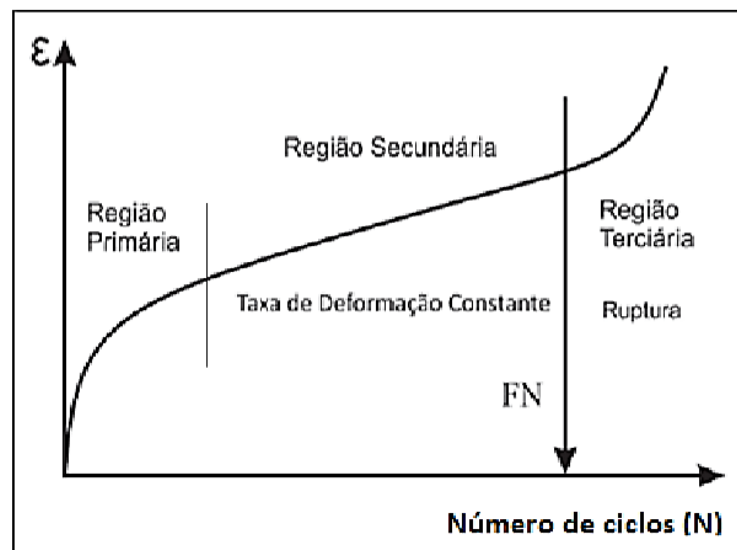
De acordo com Budny (2012), os ensaios de aplicação de cargas estáticas não representam bem as deformações permanentes verificadas em campo, sendo, por isso, mais indicado a utilização de ensaios com aplicações de cargas repetidas. Com isso, a realização do de deformação pelo critério diametral, flow number (FN), tem como finalidade a avaliação da resistência das misturas a deformações permanentes.

O Flow Number se relaciona melhor com a deformação permanente devido à aplicação uniaxial de cargas repetidas que simulam o efeito da passagem contínua de veículos pesados sobre a estrutura do pavimento, está ligado ao ciclo onde a taxa de deformação plástica é

mínima. A partir deste ciclo o corpo de prova entra na zona terciária e rompe (WITCZAK, et al. 2002 apud CAVALCANTI, 2010).

Segundo Costa (2017) o resultado do ensaio é indicado a partir de um gráfico que relaciona deformação permanente e o número de ciclos aplicados. A curva gerada pode ser subdividida em três zonas de deformação conforme a Figura 17. Na região primária a densificação da amostra ocorre a uma taxa elevada, na região secundária a taxa de deformação é praticamente constante e na região terciária a deformação cresce exponencialmente, indicando rompimento da amostra. O número de ciclos onde ocorre a transição entre as zonas secundárias e terciárias é definido como *Flow Number* (FN).

Figura 17 – Regiões da curva deformação permanente versus número de ciclos aplicados durante o ensaio uniaxial de carga repetida (COSTA, 2017)



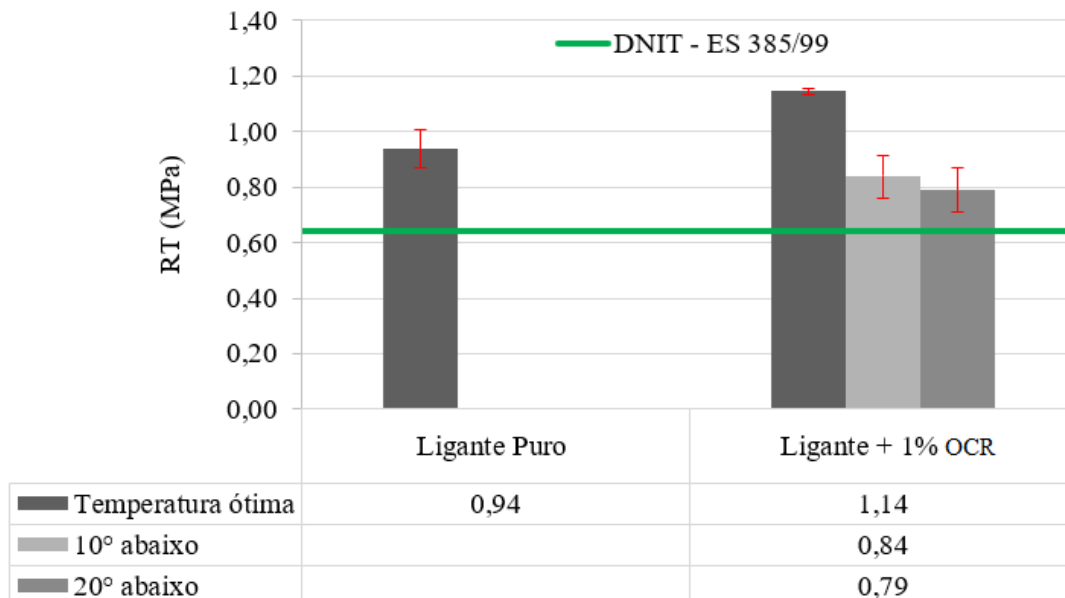
Na realização deste ensaio foram utilizados corpos de prova com dimensões em torno de 150 mm de altura, diâmetro de 100 mm e volume de vazios de $7\% \pm 0,5$. O procedimento utilizado neste ensaio foi de acordo com a norma brasileira (NBR 16505/2016) a partir da aplicação de cargas repetidas de 204 kPa em corpos de prova condicionados a uma temperatura de 60°C . O carregamento foi aplicado durante o período de 0,1s com repouso de 0,9s, até que fosse atingido um número máximo de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 microstrains.

4 RESULTADOS

4.1 Resistência à tração (RT) por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada para as misturas asfálticas compactadas com o CAP 50/70 (ligante puro) na temperatura do ensaio de viscosidade, com o ligante com adição de 1% de óleo residual produzido na temperatura de projeto, e a 10°C e 20°C abaixo desta. Os resultados apresentados foram obtidos a partir da média resultante da realização do ensaio em dois corpos de prova para cada grupo de misturas. Estes valores estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



De acordo com os resultados pode-se observar que todas as misturas asfálticas atingiram o valor de resistência mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela especificação DNIT 031/2006 para misturas asfálticas aplicadas em camadas de rolamento.

Segundo Cavalcanti (2010) a resistência à tração de misturas asfálticas é diretamente proporcional à viscosidade do ligante, sendo esta uma tendência nos valores de RT. Ainda que o ligante modificado tenha viscosidade menor que o ligante puro, pode-se observar que a modificação do ligante asfáltico com óleo produziu efeito de aumento em 23% na resistência à tração da mistura asfáltica compactada na temperatura ótima definida no ensaio de viscosidade. Este resultado pode ser justificado tendo em vista a propriedade lubrificante dos óleos, que pode ter contribuído para um melhor envolvimento dos agregados da mistura comparado ao ligante puro.

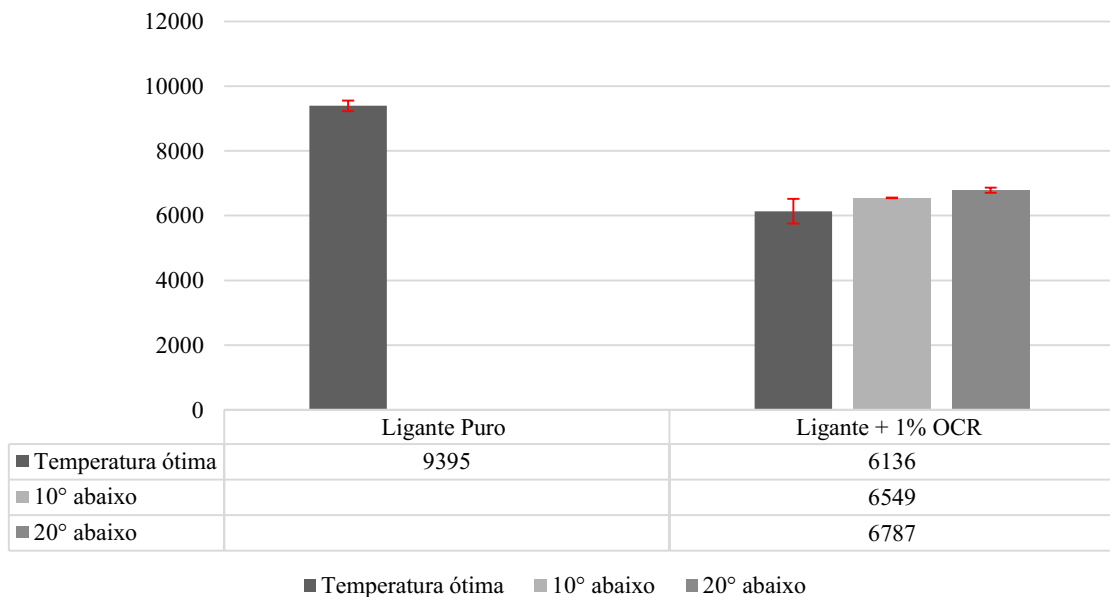
No que se refere à diminuição das temperaturas de usinagem e compactação da mistura foi possível observar a queda da RT em 26% para a mistura compactada 10°C abaixo da temperatura de projeto e 30% para a que foi compactada 20°C abaixo desta. De acordo com Motta (2011) o controle de temperatura de moldagem pode levar a uma diferença significativa de volume de vazios das misturas e ter impacto sobre a RT, promovendo assim a variação de valores verificada.

Com isso, a partir dos dados apresentados, é possível comprovar a influência adversa da temperatura de compactação na resistência à tração das misturas asfálticas.

4.2 Módulo de Resiliência (MR)

A Figura apresenta as médias dos resultados obtidos a partir da realização do ensaio de módulo de resiliência em dois corpos de prova para cada grupo de misturas analisadas.

Figura 19 – Valores de módulo de resiliência



O módulo de resiliência indica a capacidade da mistura asfáltica em absorver os esforços. Desta forma, quanto maior for o valor desse parâmetro, mais rígida é a mistura, uma vez que esta terá maior dificuldade em se deformar e voltar ao seu estado inicial. Assim, misturas asfálticas com elevado módulo de resiliência correspondem a pavimentos mais suscetíveis à absorverem tensões que podem resultar em trincamentos precoces.

Segundo Costa (2017), alguns fatores como o tipo de ligante e a temperatura de compactação influenciam na estimativa do módulo de resiliência. De acordo com BERNUCCI et al. (2008) os valores típicos de misturas asfálticas a 25° C estão situados na

faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Com exceção da mistura com ligante puro, é possível perceber que os valores encontrados estão dentro do intervalo citado.

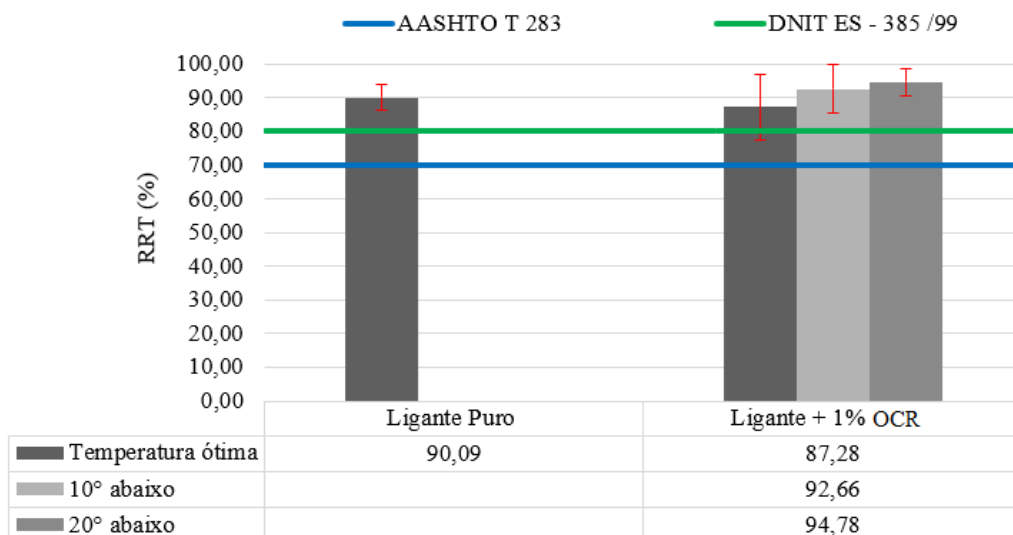
O resultado apresentado indica uma queda em torno de 35% no módulo de resiliência a partir da adição de óleo ao ligante asfáltico. A modificação do ligante fez com que esse se tornasse menos rígido e menos viscoso, o que pode ter causado menor capacidade da mistura asfáltica em absorver esforços que gerem deformações plásticas. A diminuição da temperatura de projeto da mistura asfáltica com ligante modificado não alterou o MR da mistura.

Segundo Souza (2012) MR altos, não refletem em excelência ao pavimento, pois as misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático, mas também flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego. Se a mistura asfáltica apresentar-se muito rígida, torna-se passível de danos que podem ser causados pela instabilidade do subleito, causando o seu rompimento, o qual pode ser ligeiramente percebido através do aparecimento de trincas (LEHNEN, 2015).

4.3 Dano por umidade induzida – *Lottman* modificado

A resistência ao dano é determinada a partir da Resistência Retida à Tração (RRT), que é a razão entre a resistência a tração por compressão diametral dos CPs com condicionamento (RTu) e sem condicionamento (RT). A Figura 20 apresenta os valores médios dos resultados obtidos a partir de nove RRTs resultantes da divisão entre cada valor de RTu do grupo condicionado por cada valor da RT do grupo não condicionado, visto que foram utilizados três CPs condicionados e três não condicionados para cada grupo de misturas.

Figura 20 – Resultado do ensaio de *Lottman* modificado



A AASHTO T 283 (2014) estabelece que o valor mínimo de RRT para misturas asfálticas compactadas segundo a metodologia SUPERPAVE é de 80%, valores menores que esses indicam sensibilidade da mistura à ação deletéria da água. A norma DNIT-ME 031/2006, entretanto, preconiza a RRT mínima de 70%. Todos os grupos de mistura atenderam às especificações das duas especificações, indicado que essas apresentaram bom resultado no que diz respeito à suscetibilidade ao dano.

A partir da análise dos resultados foi possível observar que a adição de óleo à mistura asfáltica resultou em uma diminuição da RRT na temperatura de projeto, que pode ser considerada pouco significativa levando em conta seu desvio padrão. Contudo, a queda na temperatura em 10°C e 20°C possibilitou um leve aumento desse parâmetro, tanto em relação às misturas com ligante modificado, quanto com o ligante puro. Esse resultado não está de acordo com o esperado, pois há uma tendência de que as misturas apresentem maior sensibilidade ao dano por umidade conforme a diminuição da temperatura de produção, uma vez que em temperaturas menores pode haver menor da evaporação da água presente nos agregados, gerando problemas de adesividade.

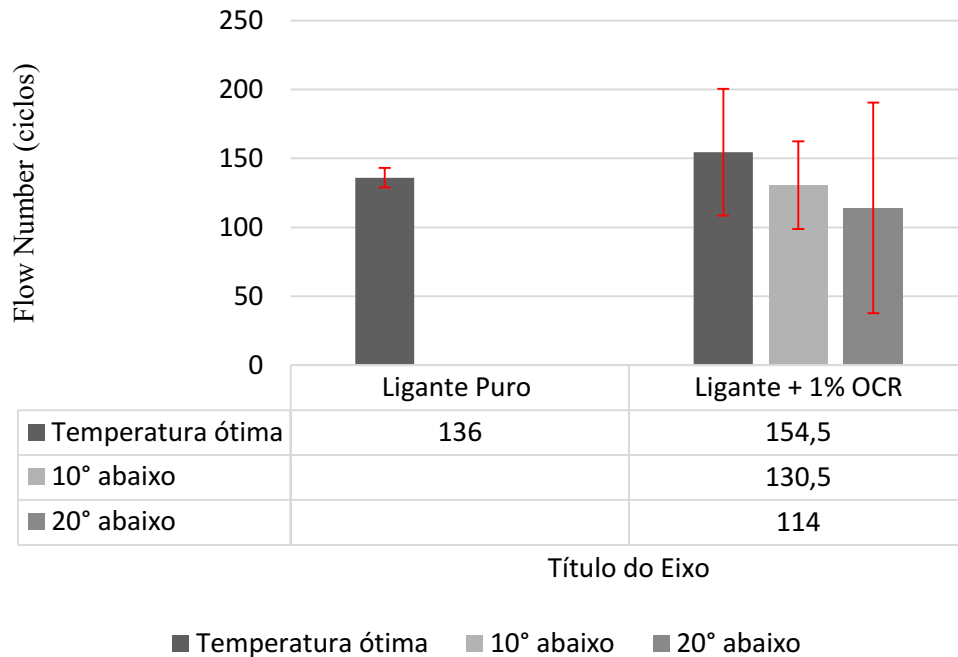
Alguns autores (Ribeiro, 2011; Souza, 2012; Sales, 2015; Cavalcante, 2016; Silvério, 2017; Carvalho, 2018) também obtiveram aumento da RRT a partir da utilização de diferentes aditivos para obtenção de Misturas Asfálticas Mornas, o que sugere que estudos mais aprofundados a fim de verificar se alguns desses podem ser utilizados como agentes melhoradores da adesividade, pois podem proporcionar aumento da lubricidade e contribuir na coesão da mistura asfáltica.

Silvério (2017) encontrou valores de RRT maiores para misturas asfálticas modificadas com óleo de soja residual compactadas 20°C abaixo da temperatura de projeto quando comparou com misturas modificadas com óleo de soja novo e residual na temperatura de projeto e 10°C abaixo desta.

4.4 Flow Number (FN)

A Figura 21 apresenta o resultado do ensaio de Flow number, realizado com dois corpos de prova para cada grupo de misturas asfálticas.

Figura 21 - Valores de Flow Number



Segundo Witczak et al. (2002) quanto maior o FN, menores serão as deformações sofridas pelo pavimento e menor a tendência de formação de trilhas de roda.

A análise dos resultados permite observar que, na temperatura ótima, a mistura asfáltica com ligante modificado apresentou o maior valor de FN, indicando que esse suporta um maior número de ciclos de carregamento até chegar ao ponto de transição da zona com taxa de deformação permanente constante para a zona de ruptura, o que indica uma maior resistência à deformação permanente desta mistura asfáltica.

A diminuição da temperatura de compactação da mistura acarretou em queda no FN, indicando que as misturas compactadas 10°C e 20°C abaixo da temperatura ótima possuem maior potencial de sofrerem deformação permanente. Este comportamento corrobora as observações de Hurley e Prowell (2006), que afirmam que o tipo de ligante influencia diretamente no risco de deformação permanente, seguido pela temperatura de compactação. Quanto à redução nas temperaturas de usinagem e compactação, Wargha Filho (2013) também verifica esta pode resultar em uma menor rigidez inicial da mistura, uma vez que a oxidação nas etapas de produção da mistura asfáltica é menor, podendo resultar em menor resistência à formação de trilha de roda e resistência à tração.

É importante salientar que, com exceção da mistura com ligante puro, as demais misturas apresentaram desvios padrões altos, sendo estes superiores a 30 ciclos. Como a média foi calculada a partir do resultado de duas amostras, é necessário trabalhar com mais

corpos de prova a fim de obter médias mais representativas e possivelmente menores desvio padrões.

Nascimento (2008) correlacionou os valores FN com níveis de tráfego, chegando à classificação apresentada na Tabela . Foi observado que, para este critério, nenhum dos grupos de misturas asfálticas estudadas apresentou valores de FN que pudessem ser classificados como satisfatórios para tráfego médio. Assim, todas as misturas estudadas são consideradas adequadas para emprego em pistas de tráfego leve.

Tabela 6 - Valores mínimos de FN para diferentes níveis de tráfego, conforme Nascimento (2008)

	Tráfego (ESALs)			
	Leve ($<3 \times 10^6$)	Médio ($<3 \times 10^6; 1 \times 10^7$)	Pesado ($<1 \times 10^7; 3 \times 10^7$)	Extremamente pesado ($>3 \times 10^7$)
FN (ciclos)	-	300	750	-

Todavia, Barros (2017), que também conduziu um estudo do Flow Number utilizando uma tensão axial de 204 kPa no ensaio uniaxial de carregamento repetido, sugere que o critério definido por Nascimento (2008) para aplicação das misturas em campo é conservador, por isto mais estudos são necessários para aprimorar as definições de faixas de tráfego estabelecidas pelo autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A presente pesquisa compreendeu o estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com óleo de cozinha residual, usinadas e compactadas na temperatura de projeto determinada a partir do ensaio de viscosidade do ligante asfáltico, bem como a 10 °C e 20 °C abaixo desta.

A análise dos resultados permitiu extrair as seguintes conclusões:

- as misturas estudadas apresentaram RTs acima dos valores estabelecidos pelas normas vigentes, ainda que as diminuições das temperaturas de usinagem e compactação tenham causado queda desse parâmetro;
- os resultados do ensaio de MR indicaram que as misturas modificadas com óleo sofreram queda em torno de 35% dessa propriedade quando comparadas com a não modificada, contudo, dentre as misturas com adição do óleo, o MR permaneceu constante com a diminuição da temperatura;
- a resistência da mistura ao dano por umidade induzida, analisada a partir do ensaio de *Lottman* modificado, indicou que todas as misturas apresentaram valores de RRT superiores aos estabelecidos pela norma DNIT e AASTHO. Apenas a mistura modificada com óleo na temperatura de projeto apresentou RRT menor que a não modificada, as demais apresentam sensibilidade à umidade menor do que aquela com ligante não aditivado, demonstrando que apesar da redução nas temperaturas de usinagem e compactação causar diminuição da evaporação da água na mistura e ocasionar, de forma geral, queda da RRT, as misturas modificadas com óleo em temperaturas menores apresentaram bom desempenho e possível benefício relacionado à lubricidade da mistura.
- no que diz respeito à deformação permanente, a mistura modificada na temperatura de projeto apresentou maior valor de FN comparado com a não aditivada na mesma temperatura. Em temperaturas menores, como já era esperado, as misturas indicaram que suportam menos ciclos de carregamento até chegar ao ponto de transição da zona com taxa de deformação permanente constante para a zona de ruptura.
- ainda que a mistura asfáltica modificada com o óleo residual não possa ser classificada como mistura morna, pois não atingiu temperatura de usinagem inferior a 150°C, pode-se dizer que a adição do óleo tanto na temperatura de projeto como em temperaturas mais baixas proporcionou resultados satisfatórios, indicando que a

modificação foi benéfica do ponto de vista das propriedades mecânicas de misturas asfálticas, bem como do ponto de vista econômico e ambiental, pois este material é obtido a partir do descarte e sua utilização como um aditivo em ligantes asfálticos seria uma forma de diminuir os malefícios causados ao meio ambiente quando o óleo de cozinha residual é descartado de forma incorreta.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Diante dos resultados da presente pesquisa, são propostos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- a) execução de outros ensaios de caracterização mecânica como módulo dinâmico e fadiga;
- b) realizar ensaios que avaliem a capacidade de lubrificação da mistura asfáltica a partir do ligante estudado nesta pesquisa;
- c) analisar o desempenho em campo de misturas aplicadas com o teor de óleo de cozinha residual utilizado nesta pesquisa;
- d) estudar o consumo energético de misturas asfálticas produzidas com esse óleo, no teor estudado, 20°C abaixo da temperatura de projeto.
- e) avaliar o efeito do óleo de cozinha residual como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“**Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de lasostenibilidad**”. Nynas Bitumen Magazine: Performance; 2009.

AASHTO **T 283** - Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C., 2014.

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES, LLC. **A manual for design of hot mix asphalt with commentary, NCHRP Report 673, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C, 2011.**

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO **T 62: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA)**. EUA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4402**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. EUA, 2013.

ASCHENBRENER, T.; SCHIEBEL, B.; WEST, R. **Three-year of the Colorado Department of Transportation’s warm mix Asphalt experimental feature on I-70 in Silverthorne**, National Center of Asphalt Technology. Colorado, EUA, 2011.

ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M. R. **Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder**. Construction and Building Materials. Malasia, 2012.

Asphalt Institute. **The Asphalt Handbook**. Manual Series No. 4 (MS-4). Asphalt Institute. Kentucky, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15235**: Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16505**: Misturas asfálticas – resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Rio de Janeiro, 2016.

AUSTROADS. **Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements by and current usage Austroads members**. Austroads. Sydney, 2012.

AZARI, H.; Mc CUEN, R. H.; STUART, K. D., **Optimum compaction temperature for modified binders**. *Journal of Transportation Engineering*, V.129, nº 5, p. 531- 537, September/October, 2003.

BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração**. São Paulo, Oficina de Texto, 2007.

BARROS, A.G. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do óleo de milho**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BONAQUIST, R. **Evaluation of Flow number (FN) as a discriminating HMA mixture property**. Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-09-01, 2012.

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2018.

CASTELLANELLI, C.; MELLO, C. I.; RUPPENTHAL, J. E.; HOFFMANN, R. **Óleos comestíveis: o rótulo das embalagens como ferramenta informativa**. In: I Encontro de Sustentabilidade em Projeto do Vale do Itajaí. 2007.

CASTELLANELLI, Carlo; MELLO, Carolina Iuva; RUPPENTHAL, Janis Elisa; HOFFMANN, Ronaldo. **Óleos comestíveis: o rótulo das embalagens como ferramenta informativa**. In: I Encontro de Sustentabilidade em Projeto do Vale do Itajaí. 2007. <http://www.ensaus.com.br/1poster/%D3leos%20Comest%EDveis%20%20O%20R%F3tulo%20das%20Embalagens%20como%20Ferramenta%20I.pdf>. Acesso em Junho/2018.

CAVALCANTE, Fabiano Pereira. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CAVALCANTI, L. S., “Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas” dissertação (mestrado em engenharia) Programa de Engenharia Civil COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos; Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2011. 106p.

CERATTI; J. A. P.; **PROJETO DE PESQUISA CONCEPA – LAPAV: Estudo laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas**

asfálticas. ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS “MORNAS” Porto Alegre; dezembro de 2007.

CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

CHEN, M; LENG, B.; WU, S.; SANG, Y. **Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders.** Construction and Building Materials 66, 286–298. 2014.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento.** Levantamento Safra 2016. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em Julho de 2018.
COSTA, L. F. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

D’ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNIT, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt: European Practice. International Technology Scanning Program.** Virginia, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 035:** Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 054:** Equivalente areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 081:** Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 083:** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 084:** Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131:** Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135:** Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136**: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155**: Material asfáltico – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010.

FERNANDES, M. R. S. **Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS**. 2009. 118 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS.

FONSECA, L. F. S. **Análise das Soluções de Pavimentação do Programa CREMA 2ª ETAPA do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Dissertação de mestrado PEC/ COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2007

FRANCO, F.A.C.P. **Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

GAMA, D. A. **Utilização do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2013.

GUERRERO, Y. A. **Avaliação do Desempenho Mecânico e Reológico de Misturas Asfálticas Mornas**. 2013. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado apresentada à universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis.

HANZ, A. J.; BAHIA, H. U. **Asphalt Binder Contribution to Mixture Workability and Application of Asphalt Lubricity Test to Estimate Compactability Temperatures for Warm-Mix Asphalt**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2371, P. 87-95. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2013.

HANZ, A. J.; FAHEEM, A., MAHMOUD, E.; BAHIA, H. U. **Measuring effects of warm mix additives using a newly developed asphalt binder lubricity test for the DSR**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 89., 2010, Washington. Anais... Washington: TBR, 2010.

Highway construction – **FHWA/MT-09-009/8116-38** Final Report. Montana, 2009.

JUNIOR, OSR Pitta et al. **Reciclagem do óleo de cozinha usado: uma contribuição para aumentar a produtividade do processo**. In: INTERNACIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. 2009. p. 1-10.

KAMARUDDIN, N. H. M.; H.; HASSAN, N. A.; ABDULLAH, M. E.; YAACOB, H. **Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil**. Jurnal Teknologi. Malaysia, n. 71:3 p. 93-98, 2014.

LEHNEN, G. T. **Estudo sobre a compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas.** Monografia (Graduação) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, RS, 2015.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LOPES, Roberta Cristina; BALDIN, Nelma. **Educação ambiental para a reutilização do óleo de cozinha na produção de sabão–projeto ecolimpo.** In: EDUCERE-Congresso Nacional de Educação. 2009. p. 2009.

LUCENA, L. C. F. L. - **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

LUZ, P. M. S. G. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com a adição do óleo de milho.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

MAHARAJ, R.; HARRY, V.; MOHAMED, N. **The rheological properties of Trinidad asphaltic materials blended with waste cooking oil.** Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. Trinidad e Tobago, v. 31, n. 4, p. 265-278, 2015.

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.** 201 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2015.

MORAES, T.M.R.P.; **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2018.

MOTTA, L. M. G.e MEDINA, J., **“Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE – Brasil”.** Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, Portugal, n. 26, p.85-97, maio, 2006. Disponível em:<http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/Num26/n_26_pag_85-97.pdf> Acesso em: 11 jul. 2018.

MOTTA, R. S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético.** Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NETO, Pedro R. Costa et al. **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras.** Química nova, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.

NEWCOMB, D. An Introduction to Warm-mix Asphalt. 2006. National Asphalt Pavement Association, Lanhan. Disponível em: <http://www.warmmixasphalt.org/submissions/4_20071125_introduction_to_warmmix_asphalt.pdf> Acesso em: 11 de julho de 2018.

OSMARI, Patrícia Hennig; ARAGÃO, Francisco Thiago Sacramento. **Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenescedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície.** Transportes, v. 24, n. 3, p. 48-54, 2016.

OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas – Verificação da fadiga e do módulo complexo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2009.

PERKINS, S. W. **Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for use in Montana.** PORTUGAL, A.C.X.; **Avaliação Reológica de Cimento Asfáltico de Petróleo modificados com óleo de Cozinha.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125.** Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.

PROWELL, B.D., **Warm Mix Asphalt – The International Technology Scanning Program Summary Report,** FHWA, AASHTO, EUA, 2007.

RABELO, Renata Aparecida; FERREIRA, Osmar Mendes. **Coleta seletiva de óleo residual de fritura para aproveitamento industrial.** Universidade Católica de Goiás, v. 6, 2008.

REIS, M. F. P.; ELLWANGER, R. M.; FLECK, E. **Destinação de óleos de fritura.** 2007.

RIBEIRO, E.A. **O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas.** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

ROSA JÚNIOR, J. M. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com polímeros funcionalizados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

RUBIO, C. R.; MARTINEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. **Warm mix asphalt: an overview.** *Journal of Cleaner Production* 24, 76-84, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>. Acesso em julho de 2018.

SABITA. **Manual 32:** Best practice guideline for warm mix asphalt. ISBN 978-1-8974968-55-1. South Africa.

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

SANTOS, A.T.R. **Estudo de ligantes asfálticos modificados pela adição de óleo de cozinha residual.** XV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

SILVA, G. G. da. **Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

SILVÉRIO, L. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com a adição do óleo de soja.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

SOUZA, J.L.S. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

WARGHA FILHO, N. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas.** Diss. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

WITCZAK, M.W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., EL-BASYOUNY, M., e VONQUINTUS, H., **“Simple Performance Test for SUPERPAVE Mix Design,”** NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.

ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. R. **Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen.** Journal of Hazardous Materials. Malasia, 2012.