



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

**ABLENYA GRANGEIRO DE BARROS**

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

**Campina Grande - PB**

**2018**

**ABLENYA GRANGEIRO DE BARROS**

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

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito para a obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientadora: Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Campina Grande - PB  
2018

**ABLENYA GRANGEIRO DE BARROS**

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

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito para a obtenção do título de bacharel em engenharia civil, sob a orientação da Prof.<sup>a</sup> Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena.

Aprovada em: 09 de fevereiro de 2018

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. DSc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Examinador Interno: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Examinador Externo: Eng. Msc. Jonny Dantas Patrício  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, mas em especial quero agradecer:

Aos meus pais, Abner e Mauridete, motivo maior pelo qual esta etapa foi concluída. A vocês dedico este trabalho e qualquer conquista que vier a concretizar, pois seu apoio, orientação e carinho incondicional é o que me incentivam a trilhar bons caminhos.

Ao meu irmão, Abmar, que, mesmo distante, transmite apoio e incentivo, sendo uma referência de dedicação.

À minha avó, Odete, e aos demais familiares que até aqui me acompanharam e me ofereceram suporte.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Lêda Christiane, que muito contribuiu para o meu aprendizado, mostrando-se sempre paciente e disponível para ajudar. Agradeço pelas oportunidades concedidas e pela confiança depositada.

Aos meus amigos de graduação e de vida, em especial Christian, Hicaro, Paulo, Luã, Karina, Letícia, Rebecca, Laís e Ivna, que comigo dividiram noites de estudos, projetos e trabalhos, tornando estes momentos muito mais leves e alegres. Foram vocês que fizeram desses anos inesquecíveis. Levo-os em meu coração e lhes desejo muito sucesso.

A Rafaela, minha amiga de todas as horas, que, junto com sua família, foi presente ao longo desta caminhada, oferecendo seu carinho e apoio sempre que precisei.

A Daniel Beserra, amigo que pude encontrar no laboratório, agradeço por todas as palavras de incentivo e pela enorme prestatividade, ajudando diretamente na realização deste trabalho. Conte comigo sempre!

A Laiana Ferreira, que me acolheu no PIVIC, agradeço pelo encorajamento, pelos momentos de descontração e por todo conhecimento compartilhado.

Ao amigo Conrado, aos técnicos Jadilson e Josenildo e demais funcionários do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, pelo valioso auxílio durante a execução desta pesquisa, além do companheirismo diário.

Por fim, ao Departamento de Engenharia Civil da UFCG e seus professores, que tornaram possível obter esta formação.

## RESUMO

A busca por processos produtivos mais eficientes na pavimentação asfáltica tem impulsionado estudos com a finalidade de reduzir as temperaturas nas quais as misturas asfálticas são produzidas, sem comprometer o desempenho do pavimento. Neste cenário, a tecnologia das misturas mornas tem se mostrado uma alternativa para atenuar a produção de gases de efeito estufa e reduzir o consumo energético. A incorporação de aditivos oriundos de oleaginosas ao ligante asfáltico se apresenta como um agente viável para diminuir as temperaturas de usinagem e aplicação da massa asfáltica, devido à possibilidade de promover reduções na viscosidade do ligante. O milho ocupa o segundo lugar na produção nacional de grãos, sendo o seu óleo muito utilizado para culinária. No entanto, quando o óleo pós-consumo é descartado, de maneira inadequada, pode resultar em impactos ambientais. Isto posto, estudos acerca de parâmetros reológicos comprovaram a viabilidade da adição do óleo de milho ao ligante asfáltico, em seu estado novo e após uso (residual). O presente trabalho teve o objetivo de avaliar a influência da adição deste óleo no ligante asfáltico modificado por polímero SBS nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Para isto, realizaram-se os ensaios de Resistência a Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Lottman Modificado, Módulo Dinâmico 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 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. No que diz respeito ao dano por umidade induzida, uma das misturas foi considerada insatisfatória, evidenciando o efeito adverso da redução da temperatura de projeto sobre esse aspecto. Não foi verificada interferência do processo de fritura nos aspectos analisados, confirmando o uso do óleo residual e conferindo um descarte ecológico para este resíduo.

Palavras-chave: Misturas mornas, propriedades mecânicas, óleo de milho

## ABSTRACT

The search for more efficient production processes of asphalt paving has led studies to evaluate the capability of reducing the temperature at which hot mix asphalt (HMA) is produced and compacted without compromising the performance of the pavement. In this scenario, the warm-mix asphalt (WMA) technology is an alternative to decrease the production of greenhouse gases besides cutting fuel consumption. Additions of organic additives derived from oilseeds on asphalt binders can change its viscosity-temperature behavior, reaching reductions in temperatures of mixing and compaction of the asphalt mixtures. The corn production is the most significant grain crop in Brazil. Its oil is one of the most widely consumed for cooking purposes. However, when the after-consumption oil is incorrectly discarded, generates environmental impacts. Therefore, the feasibility of inserting new and after-consumption (residual) corn oil in the asphalt binder was analysed and confirmed on rheological aspects. The present study aims to evaluate the effects of incorporating the SBS-modified asphalt binder with new and residual corn oil on mechanical properties of asphalt mixtures. To achieve this objective, the tests of Indirect Tensile Strength, Resilience Modulus, Modified Lottman, Dynamic Modulus and Flow Number were performed. The asphalt mixture samples were produced and compacted at the temperature obtained from the rotational viscosity test, as well as at 10 and 20 °C below it, in order to verify the mechanical response of further reductions on the production temperatures. The results show that the oil additions and the temperature reductions tend to reduce the asphalt mixtures maximum strength, stiffness and resistance to permanent deformation. These values, however, still meet the specifications for quality of the resulting pavement. Nonetheless, a greater care is required on the sensitivity to moisture of the asphalt mixtures studied. No interference of the frying process was observed regarding the analysed aspects, confirming the use of the residual oil, promoting an environmentally friendly dispose of this residue.

Key-words: Warm mix asphalt, mechanical properties, corn oil

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos componentes químicos dos ligantes asfálticos (Marinho Filho, 2017).....	17
Figura 2 – Composição da mistura asfáltica: agregados, filler e ligante asfáltico .....	20
Figura 3 - Esquema de classificação das misturas asfálticas de acordo com a temperatura de usinagem (CAVALCANTE, 2016 - adaptado de FHWA, 2008).....	24
Figura 4 - Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico conforme a variação da temperatura (MERIGHI, 2015).....	27
Figura 5 - Comparação visual entre fumos asfálticos gerados pelas diferentes misturas. Disponível no portal do Grupo Marini Fayat .....	29
Figura 6 – Consumo de energia e produção de gases em função da temperatura de produção de misturas asfálticas (Adaptado de Wargha Filho, 2013) .....	31
Figura 7 – Contribuição por produto na produção nacional de grãos (CONAB, 2016) .	33
Figura 8 - Etapas de realização da presente pesquisa.....	41
Figura 9 – Aspecto do óleo de milho após fritura, decantado e filtrado.....	42
Figura 10 – Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 12,5mm .....	42
Figura 11 - Agregados miúdo e filler: (a) Areia; (b) Pó de pedra; (c) Cal hidratada ....	42
Figura 12 - Misturador mecânico FISATOM, modelo 722D.....	43
Figura 13 - Gráficos de viscosidade x temperatura .....	46
Figura 14 - Curva granulométrica dos agregados.....	48
Figura 15 - Curva Fuller intermediária.....	49
Figura 16 – Aparelhagem utilizada no Rice Test .....	50
Figura 17 – Homogeneização deficiente para a redução de 20 °C .....	50
Figura 18 – Aspecto do corpo de prova após ruptura no ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	52
Figura 19 - Aparelhagem utilizada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	52
Figura 20 - Equipamento utilizado para a execução do ensaio de módulo de resiliência .....	53
Figura 21 - Processo de saturação à vácuo dos corpos de prova condicionados.....	55
Figura 22 – Ensaio de determinação do módulo dinâmico realizado na AMPT.....	56
Figura 23 – Regiões da curva deformação permanente versus número de ciclos aplicados durante o ensaio uniaxial de carga repetida (COSTA, 2017).....	57
Figura 24 – Aspecto do corpo de prova após ensaio uniaxial de carga repetida .....	58
Figura 25 – Realização do ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN na AMPT .....	58
Figura 26 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral ...	61
Figura 27 - Valores do módulo de resiliência.....	63
Figura 28 – Resultados do ensaio de <i>Lottman</i> modificado.....	64
Figura 29 – Curvas mestras das misturas com ligante puro, óleo de milho novo e óleo de milho residual .....	67
Figura 30 - Curvas mestras da mistura com óleo de milho novo, produzidas na temperatura de projeto e a – 10 °C e – 20 °C abaixo desta.....	67

Figura 31- Curvas mestras da mistura com óleo de milho residual, produzidas na temperatura de projeto e a – 10 °C e – 20 °C abaixo desta.....	68
Figura 32 – Valores médios de <i>Flow Number</i> .....	69



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de caracterização dos ligantes asfálticos.....	44
Tabela 2 – Resultados da caracterização dos ligantes asfálticos (Barros, 2017).....	44
Tabela 3 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos e reduções alcançadas.....	47
Tabela 4 - Resultados de massa específica real e aparente, abrasão Los Angeles e equivalente de areia dos agregados .....	48
Tabela 5 - Proporção de agregados encontrada a partir da composição granulométrica	49
Tabela 6 – Parâmetros volumétricos para a mistura com teor ótimo de ligante puro ....	49
Tabela 7 – Tensão de referência para carga de contato a cada temperatura.....	56
Tabela 8 – Calores específico e latente utilizados para o cálculo de consumo energético .....	60
Tabela 9 – Temperatura inicial e final de usinagem e estimativa da energia necessária para produzir 1t de mistura asfáltica.....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Tester</i>
AASTHO	<i>American Association Of State Highway And Transportation Officials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPs	Corpos de provas
DMT	Massa Especifica Teórica das Misturas Asfálticas
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
E	Elastômero
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Etileno-Acetato de Vinila
FN	<i>Flow Number</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
LEA	<i>Low Energy Asphalt</i>
LVTD	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MD	Módulo Dinâmico
MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
RBV	Relação Asfalto Vazios
RT	Resistência à tração
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
RRT	Relação da Resistência à Tração
RTu	Resistência à Tração condicionado
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 <sub>v</sub>	Volume De Vazios
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
c	Calor específico médio
cP	Centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
$\Delta t$	Varição de temperatura
F	Carga de ruptura
H	Altura do corpo de prova
Hz	Hertz
J/kg.°C	Joule por quilo por grau Celsius
kPa	Quilo Pascal
$L_v$	Calor latente
m	Massa do material
MJ	Mega joule
MPa	Mega Pascal
Pa	Pascal
Pa.s	Pascal segundo
$\sigma_t$	Resistência a tração
Q	Quantidade de energia

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral .....	16
1.1.2	Objetivos específicos .....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Ligantes asfálticos.....	17
2.1.1	Ligantes asfálticos modificados e o polímero SBS .....	18
2.2	Misturas asfálticas.....	19
2.3	Dosagem SUPERPAVE .....	20
2.4	Classificação das misturas asfálticas conforme temperatura de produção .....	23
2.5	Misturas asfálticas mornas .....	24
2.5.1	Tecnologias utilizadas na produção das misturas mornas .....	25
2.5.2	Benefícios das misturas mornas .....	28
2.5.3	Possíveis desvantagens das misturas mornas .....	31
2.6	O óleo de milho e seu resíduo.....	32
2.7	Utilização de óleo de cozinha em misturas asfálticas.....	34
2.8	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas .....	35
2.8.1	Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.....	37
2.9	Pesquisas com oleaginosas adicionadas ao ligante asfáltico .....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
3.1	Materiais .....	41
3.2	Métodos .....	43
3.2.1	Produção da mistura do ligante asfáltico com a adição dos óleos.....	43
3.2.2	Caracterização dos ligantes asfálticos .....	43
3.2.3	Caracterização dos agregados.....	47
3.2.4	Dosagem SUPERPAVE .....	48
3.2.5	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas.....	50
3.3	Estimativa da economia energética.....	59
4	RESULTADOS .....	61
4.1	Resistência à tração (RT) por compressão diametral.....	61
4.2	Módulo de resiliência.....	62
4.3	Dano por umidade induzida – <i>Lottman</i> modificado .....	64
4.4	Módulo dinâmico .....	66
4.5	<i>Flow Number</i> .....	68

4.6	Estimativa da economia energética.....	70
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	72
5.1	Sugestões para pesquisas futuras .....	73
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74

## 1 INTRODUÇÃO

A inserção de premissas de sustentabilidade à área de infraestrutura de transportes pode garantir um desenvolvimento equilibrado especialmente ao setor rodoviário, responsável por mais de 60% da movimentação total de produtos no Brasil (CAVALCANTE, 2016). A pavimentação asfáltica de rodovias tem como finalidade proporcionar uma superfície de rolamento que atenda a requisitos de conforto e segurança para o tráfego, dentro das velocidades operacionais da via. Entretanto, durante sua execução ocorre elevado consumo energético e emissões de gases de efeito estufa no meio ambiente (LUCENA et al., 2016).

Isto ocorre pois, para produção das misturas asfálticas, é necessário submeter o ligante asfáltico a temperaturas que promovam a viscosidade necessária para que este recubra os materiais granulares. Para ligantes asfálticos convencionais, isto é, não modificados, a temperatura apropriada de usinagem é aquela na qual o ligante asfáltico apresenta uma viscosidade de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s, enquanto que a temperatura de compactação é aquela em que o ligante apresenta uma viscosidade de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s. Devido a isto, no processo de usinagem à quente normalmente são utilizadas temperaturas entre 150 °C e 180 °C. Estas temperaturas podem ocasionar oxidação e envelhecimento precoce ao ligante, visto que suas propriedades são alteradas, causando uma elevação em sua consistência e consequente aumento da rigidez da mistura asfáltica (MELLO, 2014 apud CAVALCANTE, 2016).

Segundo Costa et al. (2015) a adição de polímeros como modificadores do ligante asfáltico ocorre comercialmente, sendo o polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) o mais utilizado para este fim. A adição do SBS proporciona melhorias físicas, químicas e reológicas ao asfalto convencional, conferindo-lhe características elásticas e elevada resistência à oxidação. Em contrapartida, a adição do polímero eleva a viscosidade do ligante convencional, aumentando sua temperatura de trabalhabilidade.

Tais fatos, aliados à necessidade de um desenvolvimento sustentável e uma maior eficiência energética na área da pavimentação, têm impulsionado a busca por temperaturas de usinagem e aplicação das misturas asfálticas inferiores às convencionalmente utilizadas (CAPITÃO et al., 2012). As misturas mornas, expressão usada no Brasil para designar o termo *Warm Mix Asphalt* (WMA), correspondem a tecnologias que permitem atingir reduções na temperatura de trabalho da massa asfáltica entre 30°C e 50°C em relação às misturas usinadas à quente. A partir da utilização de misturas WMA, entre outras vantagens, pode-se reduzir a oxidação do ligante, a

emissão de fumos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, aumenta-se a distância de transporte de massa asfáltica como também se reduz o consumo de combustível da usina e é possível a utilização de uma quantidade maior de material fresado na mistura.

Conforme o relatório NCHRP 691 – *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*, que em 2011 formalizou e generalizou métodos para dosagem e avaliação de diferentes processos de misturas mornas, este tipo de mistura deve apresentar características de resistência, durabilidade e desempenho similar às misturas convencionais (WARGHA FILHO, 2013). No entanto, é destacada a existência de possíveis problemas relacionados ao seu uso, como a sensibilidade à umidade e menor resistência à deformação permanente.

Budny (2012) afirma que a introdução de aditivos orgânicos no ligante asfáltico é um dos processos usados na obtenção de reduções das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas devido à diminuição de viscosidade promovida ao ligante. Aditivos oleicos com origem em oleaginosas se apresentam como agentes viáveis neste sentido. Além disso, sua incorporação ao asfalto modificado por polímeros também pode ser útil, visto que a adição dos óleos age contrabalanceando o aumento de viscosidade do ligante asfáltico causada pela adição de polímeros, mas ainda sim mantendo suas características elásticas e de resistência à oxidação.

De acordo com a CONAB (2016) o milho ocupa segundo lugar na produção nacional de grãos, correspondendo a 39,63% desta. Os óleos extraídos desses grãos, geram uma quantidade significativa de resíduos que, se descartados de forma irregular, geram impactos ambientais. Desta forma, a utilização do óleo de milho residual nas misturas asfálticas o caracteriza como um “aditivo verde”, pois promove um descarte ecológico a este insumo.

A presente pesquisa baseia-se nos resultados obtidos por Portugal (2016) em seu estudo sobre a incorporação ao ligante asfáltico do óleo de soja e de milho nas condições novo e pós-uso (residual). Analisando o aspecto reológico de ligantes asfálticos modificados por uma série de teores de adição destes óleos, encontrou-se os teores ótimos nos quais o desempenho do ligante não é comprometido, sendo estes 1% e 2% para o óleo de milho residual e novo, respectivamente.

Desta forma, esta pesquisa visou avaliar o efeito da adição do óleo de milho novo e residual ao ligante modificado por polímero SBS nas propriedades mecânicas

das misturas asfálticas compactadas na temperatura de projeto determinada no ensaio de viscosidade rotacional, bem como a 10 °C e 20 °C abaixo destas.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo geral*

Avaliar o efeito da adição do óleo de milho, novo e residual, em adição ao ligante asfáltico E 55/75 por meio das propriedades mecânicas de misturas asfálticas.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- Caracterizar as propriedades físicas do ligante modificado (E 55/75) em adições de 2% e 1% do óleo de milho novo e residual, respectivamente;
- Realizar ensaios mecânicos para avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas aditivadas com óleo de milho novo e residual, produzidas nas temperaturas determinadas no ensaio de viscosidade do ligante;
- Realizar ensaios mecânicos para verificar o desempenho das misturas asfálticas aditivadas com óleo de milho novo e residual, produzidas em temperaturas de 10 °C e 20 °C abaixo da temperatura de projeto;
- Analisar se o processo de cozedura dos óleos interfere no comportamento mecânico das misturas asfálticas.
- Propor uma alternativa ecologicamente correta para o destino final do óleo de milho residual;
- Contribuir para o desenvolvimento sustentável na área da pavimentação asfáltica.



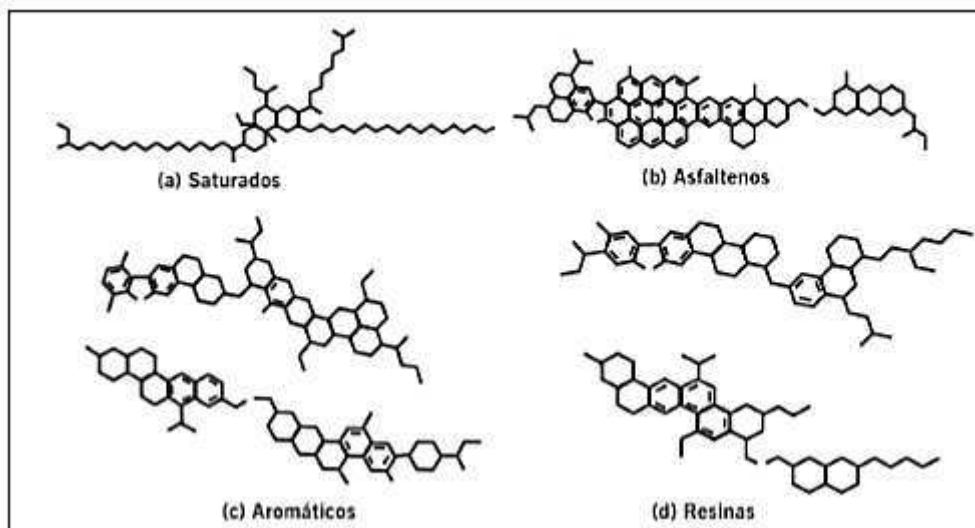
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligantes asfálticos

Denomina-se “ligante asfáltico” a mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, contendo ainda heteroátomos em menores proporções (oxigênio, nitrogênio, enxofre, vanádio, entre outros). A obtenção destes pode ser realizada diretamente da natureza em lagos naturais, rochas asfálticas ou por meio do processo da refinação do petróleo (BERNUCCI et al., 2008).

Quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos. 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. A Figura 1 apresenta uma ilustração esquemática dos componentes químicos dos ligantes asfálticos.

Figura 1 - Esquema dos componentes químicos dos ligantes asfálticos (Marinho Filho, 2017)



Segundo Bernucci et al. (2008) quando o asfalto se enquadra em uma determinada classificação particular, geralmente baseada em propriedades físicas

estabelecidas para o desempenho deste material na pavimentação, ele é denominado Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP.

O CAP se apresenta como o material viável na elaboração de revestimentos de pavimentos devido principalmente às propriedades de insolubilidade em água; resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, e por ser um adesivo termoplástico, proporcionando forte união dos agregados. O CAP é semissólido a temperaturas baixas, viscoelásticoplástico à temperatura ambiente e a altas temperaturas comporta-se como um fluido viscoso. A característica termoviscoplastica do CAP faz com que seu comportamento mecânico seja suscetível à velocidade, tempo e à intensidade de aplicação do carregamento e à temperatura de serviço.

### *2.1.1 Ligantes asfálticos modificados e o polímero SBS*

Ligantes asfálticos modificados têm sua origem a partir da necessidade de melhorias na qualidade dos materiais utilizados para a construção de revestimentos asfálticos. Segundo Bernucci et al. (2008) em condições de elevado volume de tráfego e de carga por eixo e em regiões que sofrem grandes diferenças térmicas ao longo do ano, o pavimento constituído por CAP pode apresentar deficiências de desempenho e defeitos como trincas por fadiga e deformações permanentes em trilhas de rodas, sendo necessário então estruturas mais resistentes e duráveis. A substituição do CAP por ligantes asfálticos modificados tem sido uma solução para amenizar esta problemática.

O CAP modificado é aquele que recebeu a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica.

Greco (2004) afirma que a adição de modificadores ao asfalto é uma prática que foi primeiramente patenteada em 1823 pelo inglês T. Hancock, utilizando a adição de borracha natural para a fabricação de material impermeabilizante para embarcações de madeira. O primeiro uso patenteado do material betuminoso com borracha natural para construção de estradas ocorreu em 1844 por E.E Cassell. Após a Segunda Guerra Mundial deu-se início também ao uso de polímeros sintéticos como modificadores de asfalto.

Segundo Cavalcante (2016) a modificação dos ligantes asfálticos pela adição de polímeros permite que, por meio da inclusão de pequenas quantidades ao ligante original, possam ser alcançadas algumas características diferenciadas e fundamentais em relação à dos ligantes tradicionais, como a maior resistência ao envelhecimento, tanto no laboratório como em campo, um incremento à espessura de película sobre o

agregado devido a maior viscosidade do ligante modificado e menor susceptibilidade térmica. Tais propriedades aumentam a resistência da mistura ao trincamento por fadiga e afundamento permanente de trilhas de rodas.

No caso do asfalto modificado por polímero, o custo é relacionado com a quantidade de polímero adicionado e a escolha do teor de polímero geralmente tem uma influência importante sobre o grau de desempenho do pavimento. Os polímeros precisam atender a uma longa lista de requisitos, incluindo boas propriedades mecânicas, economia, estabilidade a estocagem e temperaturas de compactação compatíveis com os processos e máquinas de construção de pavimentos (GAMA, 2016).

Atualmente, os principais polímeros utilizados podem ser classificados de acordo com sua importância em três categorias: (i) elastômeros termoplásticos – que correspondem a 75% dos modificadores; (ii) termoplásticos – que corresponde a 15%; e os 10% restantes que envolvem, entre outros modificadores, (iii) polímeros reativos (POLACCO et al., 2015 apud GAMA, 2016). Segundo Marinho Filho (2017) a primeira categoria é capaz de promover um melhoramento de propriedades elásticas, como exemplo os modificados com adição de SBS (estireno-butadieno-estireno). As demais categorias de polímeros podem conferir maior rigidez e redução de deformações da mistura quando submetida a cargas, como exemplo a incorporação de EVA (etilenoacetato de vinila).

O copolímero SBS é um dos mais empregados para modificar o asfalto. Este possui características dos elastômeros termoplásticos, ou seja, são materiais que escoam livremente quando aquecidos, mas que apresentam resistência mecânica elevada e propriedade de resiliência quando em temperatura ambiente. Essas propriedades conferem recuperação elástica e resistência à tração por compressão diametral superior aos ligantes convencionais. Em contrapartida, a elevação de sua rigidez em relação a ligantes não modificados faz com que seja necessária a utilização de temperaturas mais elevadas no processo de usinagem para oferecer a trabalhabilidade adequada ao ligante asfáltico.

## **2.2 Misturas asfálticas**

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e

resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade (BERNUCCI et al., 2008).

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se revestimento com misturas asfálticas, o qual se for processado de forma adequada, proporciona impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto em projeto (BRUXEL, 2015).

Segundo Bruxel (2015) a mistura asfáltica é uma mistura de materiais granulares, material de enchimento e ligante asfáltico (Figura 2) derivado do petróleo ou alcatrão em proporções pré-definidas, onde o ligante asfáltico atua como agente aglutinante entre os agregados, de forma a fornecer rigidez, resistência e impermeabilidade à mistura de agregados. Na prática, podem ser utilizadas nas estruturas dos pavimentos tanto como camada de rolamento quanto na forma de camada de ligação entre a superfície e as camadas subjacentes de suporte.

Diversos fatores podem afetar o desempenho das misturas asfálticas, como o projeto de mistura, as práticas de execução, as propriedades dos materiais e o uso de aditivos (ROHDE, 2007).

Figura 2 – Composição da mistura asfáltica: agregados, fíler e ligante asfáltico



### 2.3 Dosagem SUPERPAVE

O projeto de uma mistura asfáltica para pavimentação constitui um estudo de seleção e dosagem dos materiais constituintes com a finalidade de enquadrá-los economicamente nas especificações estabelecidas. Para que a mistura asfáltica seja

considerada satisfatória, deve possuir a melhor combinação possível de características de estabilidade (resistência à ação do tráfego sem sofrer distorções e/ou deslocamentos); durabilidade (resistência à desagregação pela ação do tráfego e intemperismo); flexibilidade (resistência à flexão sob ação de carga repetida, sem ocorrência de fissuras); impermeabilidade (resistência à penetração e à percolação de água) e resistência ao atrito.

Dada uma faixa granulométrica predefinida, o procedimento de dosagem consiste em encontrar um teor ótimo de ligante asfáltico em razão de estudos das propriedades de estado da mistura asfáltica (volumetria), a partir de corpos de prova compactados em temperaturas controladas. Estas temperaturas que serão utilizadas durante o processo construtivo em campo. Todavia, o teor ótimo de projeto do ligante asfáltico varia, entre outros fatores, de acordo com o método de dosagem.

A dosagem Marshall, usada na maior parte dos projetos de misturas asfálticas do Brasil, foi desenvolvida nos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial. Esta é baseada em valores empíricos para a estabilidade e fluência, e em propriedades volumétricas da mistura. Neste método, o agregado e o asfalto são aquecidos separadamente e misturados para que seja então realizada a compactação da massa asfáltica, feita por impacto.

Durante de década de 1980, no entanto, rodovias norte-americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas (BERNUCCI et al., 2008). Este fato evidenciou a limitação do método Marshall que, por possuir pouca representatividade do processo de compactação em relação ao campo, conduz a escolha de um teor de ligante muito elevado.

Estudos desenvolvidos pela *Strategic Highway Research Program* (SHRP) resultaram em um novo procedimento de dosagem, denominando SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*). Esta é uma metodologia atualmente usada nas universidades e Departamento de Estradas dos Estados Unidos. No Brasil, este tipo de dosagem tem sido feita em centros de pesquisas e em algumas universidades, mas obras federais já foram realizadas com este procedimento (CAVALCANTI, 2010). O uso desse método ainda se faz limitado até o momento devido ao alto custo para compra de equipamentos.

A metodologia SUPERPAVE considera requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e clima além de facilitar a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregado

e a necessidade de algum modificante para alcançar o nível requerido de desempenho do pavimento. Esta metodologia inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios. Além disto, a aplicação do sistema SUPERPAVE depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia (BRUXEL, 2015).

A maior diferença entre o método SUPERPAVE e Marshall, no entanto, consiste na forma de compactação, onde o primeiro é realizado por amassamento, utilizando um compactador giratório. Este tipo de compactador giratório é adotado por compactar a amostra de mistura asfáltica de forma mais próxima àquela feita em campo.

Além disso, na escolha da granulometria da mistura dos agregados, a metodologia SUPERPAVE utiliza os conceitos de zona de restrição (que considera a linha de densidade máxima e nas peneiras intermediárias, onde a curva granulométrica não deve passar) e pontos de controle, que garantem uma graduação de densidade correta para que a mistura asfáltica possua um espaço de vazios tal que o volume suficiente de ligante seja incorporado.

Conforme descrito por Bernucci et al. (2008) o primeiro passo do procedimento SUPERPAVE consiste na escolha de três composições granulométricas com os materiais à disposição. O procedimento SUPERPAVE faculta ao projetista escolher qual das misturas testadas, entre as três composições granulométricas, melhor atende às exigências volumétricas especificadas para o projeto. Para o projeto de misturas SUPERPAVE Nível 1, a seleção do teor de ligante é baseada nos parâmetros volumétricos de percentagem de vazios ( $V_v$ ), que quantifica os vazios de ar na mistura asfáltica compactada e deve corresponder a 4%, os vazios do agregado mineral (VAM), que é a soma dos vazios preenchidos pelo ar e pelo cimento asfáltico efetivo (não absorvido) na amostra compactada e deve ser maior que 11%, e ainda a relação betume-vazios (RBV), dada pela razão Asfalto Efetivo/VAM, mantida entre 65% e 75%. Além dos requisitos tradicionais mencionados, verifica-se também a relação pó/asfalto, que corresponde à razão entre o teor de material passante na peneira N° 200 e o teor de ligante, parâmetro que deve estar entre 0,6 e 1,2.

Tendo este fixado, a etapa seguinte da metodologia SUPERPAVE consiste na seleção do teor de ligante asfáltico de projeto. Para isto são compactados corpos-de-prova no teor de ligante estimado e no número de giros de projeto ( $N_{projeto}$ ), obtido por meio de estimativas usando-se a massa específica efetiva dos agregados. Outros corpos-de-prova devem ser confeccionados considerando outros três teores de ligante asfáltico:

o teor estimado  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$ . O teor final de projeto é aquele que corresponde a um  $V_v = 4\%$ .

#### **2.4 Classificação das misturas asfálticas conforme temperatura de produção**

A mistura de agregados e ligantes é realizada em usina estacionária e transportada posteriormente por caminhão para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado, denominado vibroacabadora. Em seguida é compactada, até atingir um grau de compressão tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, tanto às deformações permanentes quanto às deformações elásticas repetidas da passagem do tráfego (BERNUCCI et al., 2008).

Os diferentes tipos de misturas asfálticas de usina podem ser classificados de acordo com a temperatura empregada em sua produção, podendo ser divididos basicamente em quatro grupos: misturas à quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas à frio (MOTTA, 2011).

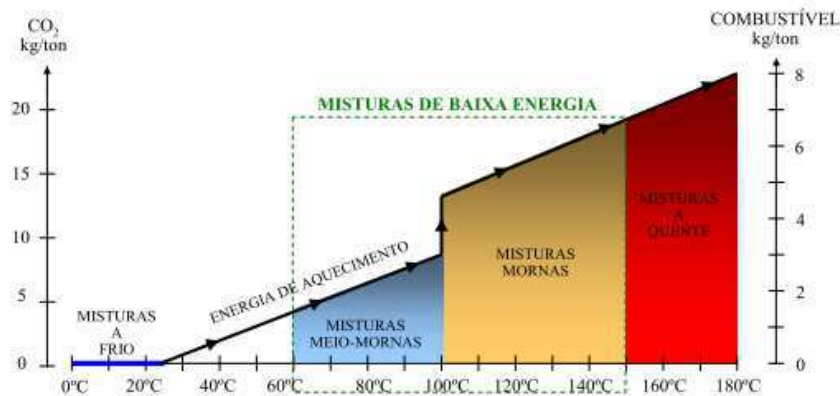
As misturas à quente são aquelas em que a temperatura de usinagem varia entre  $150^{\circ}\text{C}$  e  $180^{\circ}\text{C}$ , dependendo especialmente do tipo de ligante usado, sendo o tipo de mistura mais utilizado nos serviços de pavimentação.

Conforme Motta (2011) as misturas à frio são produzidas à temperatura ambiente com emulsões asfálticas sem aquecimento dos agregados pétreos e normalmente são destinadas a revestimentos de pavimentos de baixo ou médio volume de tráfego ou a camadas intermediárias. Este tipo de mistura, estruturalmente, não é tão resistente quanto as misturas à quente para serem utilizadas em camadas de revestimento de vias de tráfego elevado.

As misturas mornas e semimornas são fabricadas em temperaturas intermediárias às das misturas à quente e a frio, por meio do aquecimento parcial dos agregados. As misturas mornas e semimornas diferenciam-se pela sua temperatura final após a usinagem, onde a última é produzida a uma temperatura menor ou igual a  $100^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 3 ilustra a classificação das misturas usinadas de acordo com a temperatura e a quantidade de combustível utilizada em sua produção.

Figura 3 - Esquema de classificação das misturas asfálticas de acordo com a temperatura de usinagem (CAVALCANTE, 2016 - adaptado de FHWA, 2008)



## 2.5 Misturas asfálticas mornas

Para produção das misturas asfálticas é necessário submeter o ligante asfáltico a temperaturas que promovam a viscosidade necessária para que este recubra os materiais granulares. No processo de usinagem à quente são utilizadas temperaturas entre 150 °C e 180 °C. Estas temperaturas podem ocasionar oxidação e envelhecimento precoce do ligante, visto que suas propriedades são alteradas, causando uma elevação em sua consistência e consequente aumento da rigidez da mistura asfáltica (MELLO, 2014 apud CAVALCANTE, 2016). Este fato, aliado à necessidade de um desenvolvimento sustentável e uma maior eficiência energética na área da pavimentação tem impulsionado a busca por temperaturas de usinagem e aplicação das misturas asfálticas inferiores às convencionalmente utilizadas (CAPITÃO et al, 2012).

As misturas mornas, correspondem a um conjunto de tecnologias que permitem atingir reduções na temperatura em que as misturas asfálticas são produzidas e/ou aplicadas. Na Europa, a Alemanha e a Noruega foram os países pioneiros na pesquisa e execução de pavimentos com misturas mornas, desde 1995, utilizando diferentes tecnologias. Posteriormente, o tema foi introduzido nos Estados Unidos em 2002 (MOTTA, 2011).

Alguns dos principais benefícios verificados ao se produzir este tipo de mistura estão ligados à redução do consumo de energia, a redução nas emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da saúde dos trabalhadores envolvidos no processo (PROWELL, 2007 apud WARGHA FILHO, 2013).

O objetivo do processo de produção das misturas asfálticas mornas é garantir a redução das altas temperaturas, aos quais tradicionalmente as misturas asfálticas são produzidas e compactadas, sem afetar adversamente suas propriedades. Como descrito



no relatório NCHRP 691 – *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*, que em 2011 formalizou e generalizou métodos para dosagem e avaliação de diferentes processos de misturas mornas, este tipo de mistura deve apresentar características de resistência, durabilidade e desempenho similar às misturas convencionais.

Segundo Wargha Filho (2013) pesquisas estão sendo aprofundadas, tanto a nível laboratorial, como em análises de trechos já executados, principalmente na Europa e nos Estados Unidos. Com base nessas pesquisas verifica-se que a avaliação mecânica em laboratório e o desempenho em campo das misturas mornas estão se mostrando similares e em algumas vezes superiores, quando comparadas às misturas convencionais, produzidas a temperaturas usualmente mais elevadas.

De acordo com Otto (2009) o processo de produção das misturas mornas não exige grandes modificações em relação ao processo de produção da mistura à quente convencionalmente utilizado. Segundo o relatório NCHRP 691, que se baseou na especificação SUPERPAVE para propor revisões sobre áreas onde misturas quentes e mornas diferiam de forma substancial, os parâmetros volumétricos entre estas misturas são bastante similares. Sendo assim, suporta-se a prática de utilização das mesmas dosagens das misturas convencionais nas misturas mornas, diferenciando-se apenas o aditivo que proporcionaria a redução da temperatura. Tendo em vista a similaridade das propriedades é possível que o desempenho dos pavimentos construídos com misturas mornas possa ser realizado através do método empírico-mecânico (MEPDG – *Mechanistic-Empiristic Pavement Design Guide*) elaborado nos Estados Unidos.

### *2.5.1 Tecnologias utilizadas na produção das misturas mornas*

Quanto aos processos envolvidos na obtenção das misturas mornas, existem diversos produtos disponíveis no mercado que derivam de tipos de tecnologias diferentes. A escolha do aditivo para a mistura morna depende de fatores como a quantidade de mistura produzida, a redução de temperatura esperada no projeto e o custo do aditivo, pois alguns produtos possuem custo inicial elevado (MERIGHI, 2015). A depender do tipo escolhido, pode haver a necessidade de transformações ou adaptações na usina de asfalto.

Conforme apontado em Cavalcante (2016) o emprego de elevadas temperaturas na usinagem e compactação de misturas asfálticas a quente tem como objetivos: i) retirar a água contida nos agregados antes da usinagem, visto que esta pode ficar retida nos agregados quando o ligante os recobre, criando uma área com potencial para haver

descolamento entre o filme asfáltico e o material pétreo (efeito *stripping*), gerando desagregação do pavimento e ii) reduzir a viscosidade do ligante para sua melhor trabalhabilidade, devendo a viscosidade do asfalto ser tal que este possa ser bombeado em usina e possa recobrir os agregados de maneira adequada.

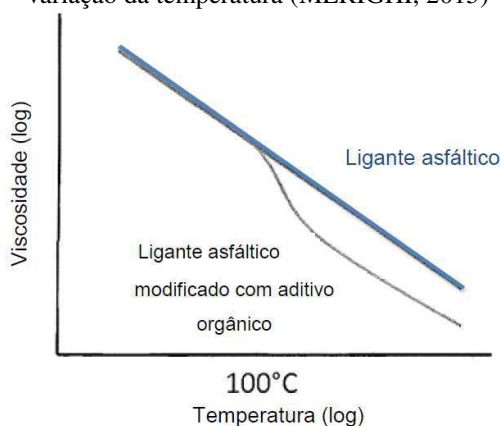
Tendo isso em vista, as misturas mornas atualmente apresentam três tecnologias distintas: i) empregar aditivos químicos que melhoram o recobrimento e a adesividade na mistura asfáltica; ii) empregar aditivos orgânicos que alteram a viscosidade do asfalto e iii) produzir uma espuma com o asfalto aquecido pela inserção de água e/ou aditivos com água em sua composição.

Os aditivos orgânicos foram um dos primeiros tipos de aditivos para a mistura asfáltica morna desenvolvida na Europa (BONAQUIST, 2012). Segundo Motta (2011) estes aditivos podem ser introduzidos previamente no ligante ou juntamente com este durante a usinagem, possuindo a capacidade de modificar suas propriedades reológicas resultando principalmente na redução de sua viscosidade, possibilitando reduções de temperatura de mistura em cerca de 30°C a 40°C. Com o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos se cristalizam de modo disperso no ligante, aumentando a rigidez deste asfalto e, por consequência, da mistura como um todo.

O uso de aditivos orgânicos em forma de cera em misturas asfálticas têm bons resultados em programas experimentais e aplicações de campo em diversos locais (WARGHA FILHO, 2013). Estes aditivos permitem a produção e a compactação de misturas asfálticas a temperaturas reduzidas, sendo conhecidos como fíleres inteligentes, pois promovem uma redução da viscosidade do ligante asfáltico na temperatura de produção e compactação das misturas asfálticas (Figura 4) e um aumento desta viscosidade na temperatura de serviço do revestimento.

Um dos produtos desta tecnologia mais conhecidos no mercado é o aditivo Sasobit® (cera sintética). O CAP é modificado com este aditivo em uma taxa que varia de 0,8 a 3,0%.

Figura 4 - Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico conforme a variação da temperatura (MERIGHI, 2015)



Ao contrário do que ocorre em outras técnicas de produção de misturas mornas, a utilização de aditivos surfactantes, de forma geral, não está relacionada com a alteração da viscosidade do ligante. Em vez disso, eles incluem geralmente uma combinação de agentes de emulsificação, agentes tensoativos, polímeros e aditivos para melhorar o recobrimento, trabalhabilidade e compactação, bem como agentes promotores de adesão mesmo a baixas temperaturas. Estes aditivos são mais conhecidos como agentes ativos de superfície e têm a característica de reagir simultaneamente com o ligante e com o agregado. Os surfactantes são compostos químicos com uma cabeça polar e uma longa cauda não polar. O ligante, que tem uma característica predominantemente não polar, atrai para si e será atraído pela parte não polar do elemento surfactante, enquanto que o agregado que tem uma característica mais polar será ligado à parte também polar do aditivo. Com esta reação é estabelecida uma forte interação entre o ligante e o agregado (WARGHA FILHO, 2013). Estes tipos de aditivos agem, portanto, melhorando a lubrificidade dos asfaltos. Deste modo, acredita-se que a viscosidade não deve ser o único parâmetro avaliado no contexto de misturas mornas, devendo a lubrificidade ser estudada de maneira mais aprofundada.

Segundo Motta (2011) a incorporação do aditivo surfactante no ligante pode ser feita previamente à usinagem, mantendo a mistura do aditivo e ligante sob agitação, ou ainda em linha de usina. Em geral, a produção de misturas mornas com estas técnicas é relativamente simples e pode ser viabilizada sem a necessidade de alteração na usina.

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

Segundo Merighi (2015) a técnica de espumejo do asfalto envolve a adição de uma pequena quantidade de água no asfalto quente, adição de material hidrófilo como

as zeólitas ou agregado úmido. Quando esta água se dispersa no asfalto aquecido e se torna vapor, ocorre expansão do ligante, resultando em diminuição da viscosidade da mistura. Este tipo de tecnologia, entretanto, requer adaptações significativas na usina de asfalto, como a instalação de equipamentos para a injeção de água, câmaras de expansão ou alimentadores. Além disso, projeto da mistura asfáltica precisa ser revisado.

Neste procedimento, o asfalto quente em contato com a água em temperatura ambiente faz com que esta se torne vapor e expanda significativamente, a um fator de 1,673. É por este motivo que a temperatura de 100 °C é o limiar entre uma mistura morna e semimorna, já que este é o ponto de vaporização da água (PAVIA SYSTEMS e NAPA, 2010 apud MOTTA, 2011).

Segundo Portugal (2016) é a espuma de asfalto que irá auxiliar no recobrimento do agregado e favorecer a trabalhabilidade da massa asfáltica, uma vez que a reação ligante/água altera a viscosidade do asfalto, permitindo a redução da temperatura de usinagem e facilitando a compactação.

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

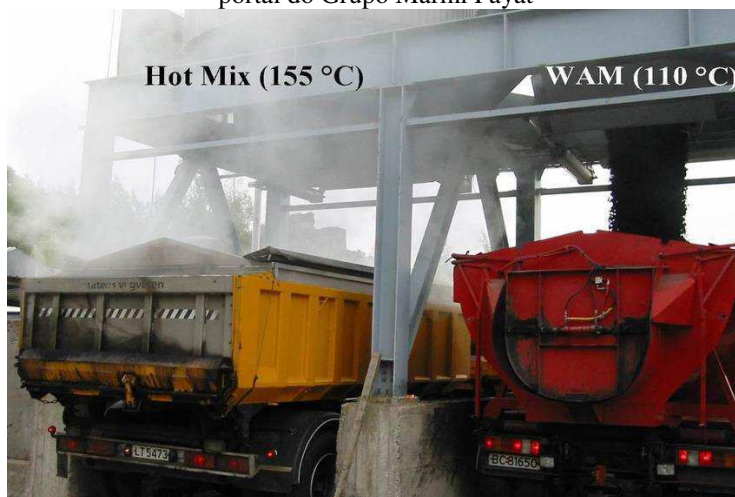
### 2.5.2 *Benefícios das misturas mornas*

Algumas vantagens na utilização de misturas asfálticas mornas quando comparadas à mistura asfáltica à quente são listadas abaixo, conforme exposto em Motta (2011), Budny (2012) e Merighi (2015).

- redução do envelhecimento do asfalto por oxidação, visto que este é submetido a temperaturas menores durante o processo de usinagem, o qual é responsável pela maior contribuição no envelhecimento do ligante. A diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico preserva a resposta elástica da mistura asfáltica, o que retarda o surgimento de trincas térmicas e resulta também em melhoria na resistência à fadiga da mistura;
- melhoria da trabalhabilidade da mistura asfáltica e facilidade/otimização da compactação, dado que os aditivos de mistura morna reduzem a fricção interna no ligante asfáltico. Além disso, permite a coesão em misturas mais rígidas, como aquelas que envolvem a incorporação de material reciclado;
- redução da exposição dos trabalhadores aos fumos (fumaça causada devido à alta temperatura da mistura) e odores tanto na usina como na aplicação: alcança-se reduções de 30 - 50% na exposição aos fumos do asfalto em comparação com a mistura

a quente, o que beneficia a saúde e segurança do trabalhador, reduzindo o risco de acidentes relacionados à temperatura e promovendo ganhos de conforto (Figura 5);

Figura 5 - Comparação visual entre fumos asfálticos gerados pelas diferentes misturas. Disponível no portal do Grupo Marini Fayat



- possibilidade da aplicação em climas frios, dado que a temperaturas muito baixas não é possível aplicar a mistura a quente, além de que, com as misturas mornas, obtém-se melhor densificação da massa com menos passadas do rolo compressor. A utilização de misturas asfálticas mornas para prolongar o período de pavimentação em estações frias é comumente observada, sendo estas, por exemplo, adotadas pelo Departamento de Transportes do Colorado, para pavimentar as estradas localizadas em montanhas, pois o alto tráfego impossibilitava a pavimentação durante o dia, e à noite as temperaturas eram muito baixas;

- aumento da distância de transporte de massa asfáltica entre a usina e o trecho de aplicação devido à taxa reduzida de esfriamento, além da possibilidade da execução de remendos e aplicação de camadas mais delgadas com melhor qualidade, mantendo a trabalhabilidade e compactação satisfatória;

- possibilidade de utilização de um volume maior de material de fresagem à mistura asfáltica: mesmo que a utilização de material reciclado deixe a mistura menos trabalhável, a tecnologia da mistura morna, por utilizar temperaturas de usinagem menores, acarreta menor envelhecimento do ligante, neutralizando a rigidez do ligante asfáltico oriundo do material reciclado e aumentando o tempo de serviço do pavimento. Além disso, a inclusão de material fresado na mistura morna reduz seu custo de produção devido ao reaproveitamento de material e a redução da quantidade de agregados virgens. Uma mistura morna com 50% de reciclados e 50% de material

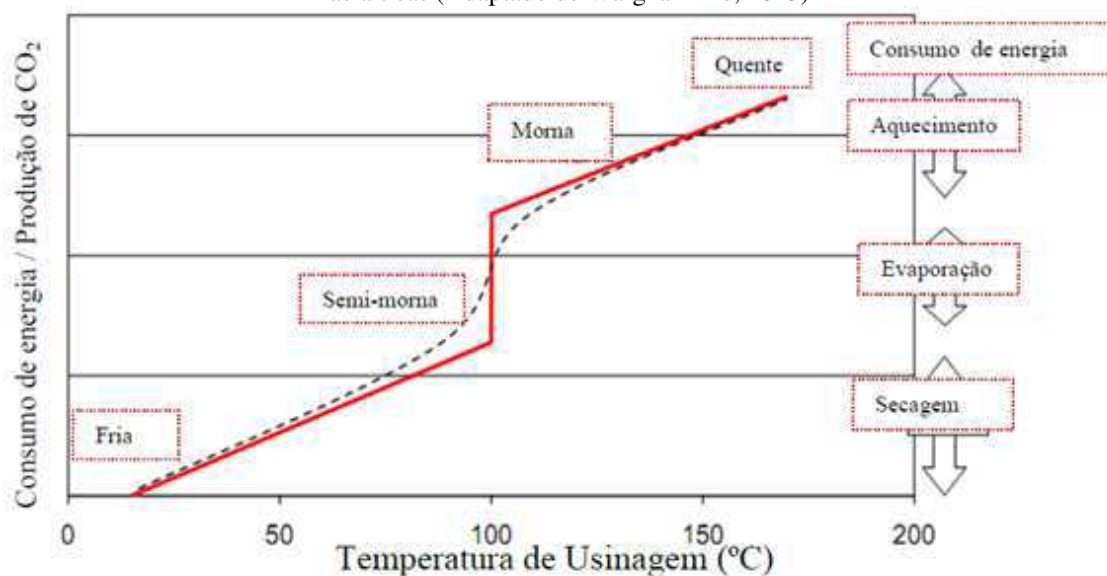
virgem custaria o equivalente a U\$ 45,63 por tonelada, enquanto o gasto com uma mistura tradicional com 100% de agregados virgens seria em torno de U\$ 60,25. Ou seja, uma economia de cerca de 24%;

- redução do consumo de combustível: sendo o petróleo a principal fonte energética no processo produtivo da pavimentação e mediante o aumento dos preços deste produto, a redução do consumo energético de faz de grande interesse. 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. Projetos com misturas mornas já indicaram economias de energia entre 20 e 35%, mas esta redução depende da tecnologia utilizada. A redução do custo com combustível, como benefício isolado, é uma justificativa para o uso das misturas mornas apenas em casos onde o combustível tem um custo elevado ou no uso de tecnologias onde é possível alcançar reduções de custo com combustível na ordem de 50%. Além disso, para se produzir as misturas mornas é necessário, algumas vezes, despesas específicas, como as geradas por possíveis modificações na usina e para se adquirir o aditivo. Um das vantagens de se utilizar óleos vegetais, neste sentido, é o baixo custo para sua aquisição ou até mesmo um custo nulo, como poder vir a ser o caso do uso de óleos residuais.

A Figura 6 ilustra o consumo de energia e emissão de gases durante a produção de mistura asfálticas, onde a linha sólida representa o consumo teórico de combustível e a linha pontilhada refere-se ao consumo real de energia;

- diminuição significativa da emissão de gases: ao serem aquecidos, os produtos asfálticos emitem vapores que em contato com o ar mais frio se condensam, tornando-se fumos asfálticos. A composição destes fumos é variável, mas sabe-se que contêm poluentes na forma de material particulado e de gases. Dado o fato de que as emissões na usina e no campo são diretamente dependentes da temperatura da mistura, nas misturas mornas há redução de emissões, pois a mistura não chega a temperaturas que são responsáveis pela maior emissão de gases. Investigações realizadas em 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 através do método de materiais solúveis em benzeno, foi reduzido para 72% a 81% quando comparado a uma mistura de referência a quente.

Figura 6 – Consumo de energia e produção de gases em função da temperatura de produção de misturas asfálticas (Adaptado de Wargha Filho, 2013)



### 2.5.3 Possíveis desvantagens das misturas mornas

Apesar dos benefícios proporcionados pelas misturas mornas, Zaumanis (2010) apud Budny (2012) aponta que não se deve generaliza-los, visto que existem diversos processos e produtos por meio dos quais pode-se obter as misturas mornas, o que gera desempenhos diferentes das misturas asfálticas.

De acordo com Bonaquist (2011) apud Merighi (2015) a maior parte da indústria de asfalto nos Estados Unidos define a tecnologia das misturas mornas como um material que tem a mesma mistura volumétrica básica e propriedades de desempenho que as misturas convencionais à quente, diferenciando-se por ser produzida sob temperaturas menores.

Todavia, dado que o aquecimento no processo de usinagem de misturas à quente tem como principais objetivos a secagem dos agregados pétreos, a manutenção da temperatura da mistura asfáltica e a redução da viscosidade do asfalto, é destacada a existência de possíveis problemas relacionados ao seu uso.

Conforme Merighi (2015) as características das misturas mornas são vulneráveis a diversos fatores, como a utilização de diferentes tipos de aditivos, que pode afetar as propriedades mecânicas da mistura morna, e a temperatura para a secagem do agregado, que pode afetar a resistência a danos causados por umidade. A variação de temperaturas na mistura do ligante asfáltico pode influenciar na durabilidade do pavimento em longo prazo e também seu desempenho. Além disso, algumas tecnologias como, por exemplo,

a espuma asfalto, necessitam de modificação nas especificações da usina de asfalto, o que contribui para o aumento do custo de produção da mistura asfáltica.

Segundo Wargha Filho (2013) e Budny (2012) existe a preocupação de que a redução da temperatura de produção possa contribuir para a diminuição da evaporação da água presente nos agregados, elevando o potencial ao dano na mistura por umidade retida, o que causa deficiência na interface entre o agregado e o ligante, prejudicando o potencial adesivo do ligante na mistura asfáltica. Esta presença de umidade residual pode levar ao trincamento precoce.

Merighi (2015) aponta que segundo pesquisa realizada no *National Center for Asphalt Technology*, discurrida por Aschenbrener, Schiebel e West (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 conclui-se 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, um mistura menos rígida pode melhorar a resistência à fadiga, aumentando o tempo de vida de projeto.

Wargha Filho (2013) afirma que, apesar da mistura apresentar maior trabalhabilidade, facilitando a compactação, este fato pode provocar uma redução da resistência à deformação permanente da mesma. Desta forma, é primordial, que após a compactação, a mistura obtenha uma rigidez inicial suficiente com o intuito de resistir à deformação provocada pelo carregamento.

Budny (2012) também destaca que alguns aditivos que fazem uso de ceras em sua composição não apresentam um comportamento satisfatório a temperaturas atmosféricas muito baixas. Isto é explicado pela cristalização das ceras, que tendem a aumentar a viscosidade e a rigidez do ligante.

Por fim, existem incertezas sobre a real redução de custos, sendo necessário verificar se o consumo reduzido de energia é suficiente para diminuir os custos globais de produção (BUDNY, 2012).

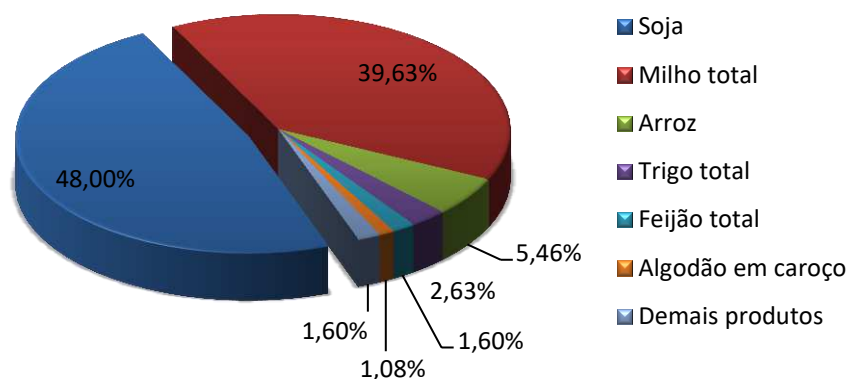
## **2.6 O óleo de milho e seu resíduo**

A produção de milho, juntamente com a de soja, equivale a aproximadamente com 86% da produção de grãos no país, sendo o milho contribuinte com 39,63% desta



(Figura 7). Atualmente, o Brasil está em terceiro lugar no ranking mundial de produção de milho, atrás apenas dos Estados Unidos e China (USDA, 2014 apud LOPES, 2015).

Figura 7 – Contribuição por produto na produção nacional de grãos (CONAB, 2016)



De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, o milho tem sua produção voltada para o abastecimento interno, sendo utilizado em torno de 77% para fabricação de rações, 10,4% para consumo industrial, e apenas em torno 2% para consumo humano (LOPES, 2015). Este cereal não é, no entanto, cultivado por seu conteúdo em óleo, o qual representa de 6 a 7,5% do peso do grão para milhos considerados de alto teor de óleo.

O processo de fritura, normalmente relacionado ao preparo de alimentos de consumo imediato, tem contribuído para o aumento do consumo de óleos vegetais, visto que é um processo culinário de grande aceitação. Durante o processo de fritura, por imersão, os óleos são continuamente expostos a umidade, oxigênio e elevadas temperaturas, fatores que levam a uma grande diversidade de reações químicas. Eles podem hidrolisar, formando ácidos graxos livres, monoacilglicerol e diacilglicerol, e/ou oxidar, formando peróxidos, hidroperóxidos, dienos conjugados, epóxidos, hidróxidos. O nível de alteração depende, portanto, das características do alimento, da absorção de ar e da temperatura utilizada e, como consequência, a degradação será tanto maior quanto mais prolongado for o período de utilização do óleo e quanto maior sua instauração (JORGE et al., 2005).

Segundo a Associação Brasileira das Industrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2012) apenas no Brasil, entre os anos de 2003 e 2013, houve um aumento de 33,84% na

produção de óleo vegetal, paralelamente o consumo doméstico, que, no mesmo período, aumentou em 92,62%.

Com o aumento do consumo de óleos vegetais cresceu também os problemas relacionados ao descarte do seu resíduo. Por não existir um modelo ideal ou normas específicas para o descarte, o produto das frituras é comumente destinado às tubulações de esgoto, recebendo como destino final o solo e corpos d'água. Por consequência, além da obstrução das tubulações de esgoto, o resíduo do óleo pode causar impermeabilização do solo e dificuldades na entrada de luz e na oxigenação dos corpos hídricos.

## **2.7 Utilização de óleo de cozinha em misturas asfálticas**

A necessidade de promover uma destinação correta ao óleo de milho residual, somada à busca por processos de pavimentação asfáltica mais eficientes e menos nocivos ao meio ambiente, resultaram em pesquisas desenvolvidas com emprego de óleos vegetais para produção de misturas asfálticas mornas, bem como o rejuvenescimento do asfalto envelhecido, com a finalidade principal de reaproveitamento do óleo de cozinha residual.

Segundo Chen et al. (2014) apud Portugal (2016) o óleo de cozinha se apresenta como agente viável para incorporação ao ligante asfáltico por apresentar ponto de fulgor acima de 220°C, sendo, portanto, seguro às temperaturas de aplicação das misturas asfálticas. Além disso, pelo fato de que o óleo de cozinha residual já fora submetido a altas temperaturas durante o processo de fritura, quando aquecido novamente, terá reduzida a volatilização de componentes como gases tóxicos.

Portugal (2016) avaliou o efeito da substituição parcial ao ligante asfáltico do óleo de soja e de milho, novo e residual, acerca de propriedades físicas e reológicas. 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 destes aditivos, visto que contribuem de forma positiva para a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, com consequente diminuição da temperatura de usinagem e compactação das misturas estudadas.

Os teores ótimos a serem empregados nas misturas para o óleo de milho residual e novo foram determinados pelo autor em 1% e 2%, respectivamente, e estes não devem

comprometer o desempenho mecânico das misturas asfálticas quando empregadas em campo. Além disso, Portugal (2016) afirma que, além das reduções efetivas de temperatura obtidas por meio do ensaio de viscosidade rotacional, é possível alcançar temperaturas de usinagem e compactação ainda menores visto que os óleos agem na interface agregado-ligante, permitindo melhorias no cobrimento do agregado pelo filme de asfalto e promovendo uma melhor lubrificação da mistura, acarretando acréscimo de trabalhabilidade em temperaturas inferiores.

## **2.8 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas**

Durante as primeiras décadas do século XX, os projetos de pavimentos eram tidos como um segmento de menor expressão da mecânica dos solos e marcado por um caráter empírico. No entanto, com o crescimento do volume e peso do carregamento, houve a necessidade de melhorar o desempenho do pavimento, o que levou a um crescimento no entendimento da resposta do solo e dos materiais do pavimento frente ao carregamento repetido, possibilitando o surgimento da mecânica dos pavimentos como uma disciplina (SPADA, 2003).

De acordo com Bernucci et al. (2008) a caracterização de materiais de pavimentação é uma tarefa complexa visto que as propriedades desses materiais dependem de fatores como o meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas oriundas do tráfego e o estado de tensões. Esta caracterização se torna mais complexa em misturas asfálticas devido ao envelhecimento gradativo causado pela oxidação do ligante asfáltico. Desta forma, observa-se uma maior utilização de métodos de dimensionamento de pavimentos que buscam compatibilizar as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais por meio da análise estrutural de sistemas em camadas.

A tendência mundial é o estabelecimento de métodos de dimensionamento mecânicos tanto para pavimentos flexíveis e rígidos, novos ou restaurados. Estes utilizam as ferramentas de análise estrutural no cálculo de tensões e deformações e determinam os mecanismos de fadiga e de deformabilidade (MEDINA E MOTTA, 2005 apud CEZARO JUNIOR, 2008).

Segundo Cezaro Junior (2008) o dimensionamento de um pavimento por um método mecânico deve levar em consideração parâmetros de entrada como a deformabilidade dos materiais, fatores ambientais, tráfego e critérios de aceitação (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda). Dessa forma, a caracterização mecânica dos

materiais é indispensável para que o pavimento tenha o desempenho desejado ao longo de sua vida de serviço.

Na abordagem mecanística, os resultados da análise estrutural dos pavimentos – tensões, deformações e deslocamentos – são comparados com critérios de dimensionamento predefinidos de modo a evitar a degradação de pavimentos devido aos principais tipos de defeitos, entre eles: as deformações permanentes excessivas, trincas por fadiga e de retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes (SPECHT, 2004 apud BUDNY, 2012).

De acordo com Portela et al. (2008) nos procedimentos de dimensionamento de elementos estruturais, geralmente, considera-se que os materiais têm comportamento elástico linear, como é o caso do modelo comumente utilizado na análise estrutural de pavimentos asfálticos. Esta consideração é justificada porque, para pequenas deformações, grande parte dos materiais obedece à Lei de Hooke. Contudo, praticamente todos os materiais apresentam comportamento dependente do tempo e da taxa de carregamento. Este é o caso dos pavimentos asfálticos, uma vez que a resposta dependente do tempo apresentada pelos materiais betuminosos ocorre na mesma escala de tempo que as cargas dos veículos (PORTELA et al., 2008). Devido ao comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, a resposta do pavimento é diferente para carregamentos estáticos e dinâmicos. Materiais que apresentam comportamento elástico linear podem ser caracterizados por dois parâmetros: módulo de Young e coeficiente de Poisson. Embora apresentem comportamento reconhecidamente viscoelástico, as misturas asfálticas podem ser consideradas elásticas se a carga aplicada for pequena em relação à resistência do material, e o carregamento for repetido em ciclos suficientemente longos. Admitir a hipótese do comportamento elástico das misturas asfálticas seja elástico linear possibilita a análise simplificada do sistema de camadas do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

Todavia, a importância da consideração dos efeitos viscoelásticos das misturas asfálticas vem sendo cada vez mais ressaltada tanto em literatura nacional como internacional (SOUZA e SOARES, 2003) na simulação do comportamento de pavimentos asfálticos.

Conforme Bruxel (2015) os ensaios mecânicos são utilizados para análise dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas. São comumente utilizados em

laboratório e estabelecidos com o objetivo de reproduzir as condições de campo, embora impliquem às vezes na utilização de elevadores fatores de ajuste campo-laboratório.

Os ensaios mecânicos dividem-se entre os ensaios que avaliam a resistência e os ensaios que verificam a deformabilidade das misturas.

### *2.8.1 Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas*

Segundo Bernucci et al. (2009) apud Motta (2011) para que a compactação de uma mistura asfáltica ocorra de maneira eficiente, a temperatura adequada deste material é um aspecto fundamental no momento da usinagem e compactação. Se a temperatura for muito baixa, o ligante se torna plástico e viscoso, dificultando a compressão da mistura e obtenção de um estado mais denso. Pelo fato de que a produção e a compactação de misturas mornas ocorrem em temperaturas mais baixas que o usual, é necessário maior controle sobre esse parâmetro para que a mistura seja densificada corretamente.

Segundo Grave (2016) a temperatura da mistura tem grande importância na compactação da mistura asfáltica, pois a resistência à compactação é um efeito combinado do agregado e do ligante. De maneira geral, quanto mais viscoso estiver o ligante no momento da compactação maior será a resistência oferecida à compactação. Nas camadas asfálticas, a compactação em campo tem por finalidade aumentar a densidade da massa asfáltica fazendo com que ela alcance os valores previstos no projeto e ofereça uma superfície de rolamento suave ao usuário. Segundo o Asphalt Institute (1989) apud Grave (2016) a importância da compactação no desempenho dos pavimentos deve-se ao aumento do contato entre agregados, promovendo maior fricção interna e resultando em uma mistura com maior estabilidade; à diminuição do volume de vazios, que produz um pavimento quase impermeável, reduzindo a penetração da água e do ar, resultando em maior resistência ao envelhecimento por oxidação e maior proteção da base, além de uma menor pós-compactação devido ao tráfego, que ocorrerá principalmente nas trilhas de roda resultando em deformação permanente.

Sendo um dos parâmetros afetados pela variação da temperatura de produção, o volume de vazios de uma mistura asfáltica é, possivelmente, o fator que mais influencia o desempenho de um pavimento ao longo de sua vida de serviço, pois se relaciona diretamente com algumas características requeridas para a textura e durabilidade da camada asfáltica, como a resistência ao dano por umidade, fadiga e deformação

permanente. Desta forma, o maior volume de vazios pode acarretar maiores deformações e menores resistências (MOTTA, 2011).

Lehnen (2015) apresenta um estudo sobre a influência da temperatura de compactação de misturas asfálticas em relação ao seu desempenho, simulando a aplicação destas misturas fora da sua temperatura ideal. Utilizando-se a análise da influência da temperatura, a autora concluiu que as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas sofrem incidência direta da temperatura de compactação das mesmas. Isto porque a elevação da temperatura proporciona uma melhor compactação da mistura, aumentando sua densidade, grau de compactação e conseqüentemente, reduzindo o seu volume de vazios. Além disso, o aumento da temperatura resulta em uma maior resistência à tração e um maior módulo de resiliência da mistura asfáltica. A temperatura de compactação também reflete diretamente sobre a vida útil do pavimento, proporcionando reduções de até 90% no seu valor quando as misturas são compactadas abaixo da temperatura ideal.

## **2.9 Pesquisas com oleaginosas adicionadas ao ligante asfáltico**

Como a modificação de ligantes asfálticos por aditivos advindos de oleaginosas vem indicando uma grande potencialidade para redução de temperaturas de produção de misturas asfálticas, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas referentes a misturas mornas e semimornas obtidas por meio do uso destes modificadores. As pesquisas descritas a seguir foram realizadas na Universidade Federal de Campina Grande.

- Souza (2012) realizou estudo utilizando o óleo de Mamona como aditivo ao ligante asfáltico CAP 50/70. Em síntese, o autor obteve uma redução de aproximadamente 8,1 °C nos processos de usinagem e compactação da mistura asfáltica, devido à adição de 5% de óleo de mamona, o que proporcionou uma mistura satisfatória em termos volumétricos e mecânicos, indicando que o óleo de mamona se mostra como um aditivo promissor para as misturas asfálticas usinadas a quente.

- A adição do óleo de moringa ao CAP foi estudada por Lucena et al. (2016). Os autores verificaram a mudança das propriedades de consistência e a variação das temperaturas de usinagem e compactação com a adição ao CAP de teores de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% e 3%. Os ligantes foram analisados por meio dos da viscosidade rotacional, Penetração, Ponto de Amolecimento e o envelhecimento à curto prazo RTFO. Estes parâmetros permitiram verificar que o óleo de Moringa Oleífera Lam é capaz de diminuir significativamente as temperaturas de usinagem e

compactação, sem comprometer o desempenho do CAP, no intervalo compreendido entre 0,5% a 1% de adição.

- Silva (2016) estudou a incorporação ao CAP de 4 aditivos: CCBit, Cera de carnaúba, óleo de girassol e óleo de moringa. A partir das propriedades físicas do ligante asfáltico (Penetração, Ponto de Amolecimento e Viscosidade Rotacional) e de ensaios envolvendo as propriedades reológicas especiais (PG, MSCR, Curva Mestre), o autor concluiu que se deve considerar o teor de 1,0% de adição para os óleos, pois apresentam uma redução considerável na temperatura de usinagem e compactação sem comprometer o seu desempenho. No caso da cera de carnaúba o teor de 2,0% seria o ideal, pois além de apresentar uma melhor trabalhabilidade apresentando uma redução média de 8,5°C nas temperaturas de usinagem e compactação, ele também aumentou a resistência do CAP ao envelhecimento.

- Cavalcante (2016) observou o comportamento reológico dos ligantes convencional (CAP 50/70) e modificado (AMP 55/75) considerando percentuais de 4%, 5% e 6% de óleo de mamona e linhaça, bem como as propriedades mecânicas das misturas asfálticas dosadas pelos procedimentos Marshall e SUPERPAVE. Para as misturas asfálticas estudadas foram obtidas uma melhor adesividade e coesão, com conseqüente maior resistência à ação deletéria da água quando os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de dano por umidade induzida (*Lottman* modificado) e ao ensaio de desgaste Cântabro, cujos resultados foram significativamente superiores aos das misturas compostas pelos ligantes asfálticos na condição natural.

- Martins (2017) avaliou o efeito da adição do óleo de soja ao CAP 50/70, nas formas novas e residuais, sobre as propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas compactadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade rotacional, como também em temperaturas de 10°C e 20°C inferiores. Utilizando os teores de adição de 1% e 2% do óleo de soja novo e residual, respectivamente, foram realizados os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico, *Lottman* Modificado e *Flow Number*, que permitiram confirmar 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.

- Luz (2017) estudou a utilização do óleo de milho novo e residual como aditivo ao CAP 50/70, nos teores de adição de 2% e 1%, respectivamente. As misturas asfálticas foram produzidas na temperatura de projeto e a 10 e 20°C abaixo desta. Realizando os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de

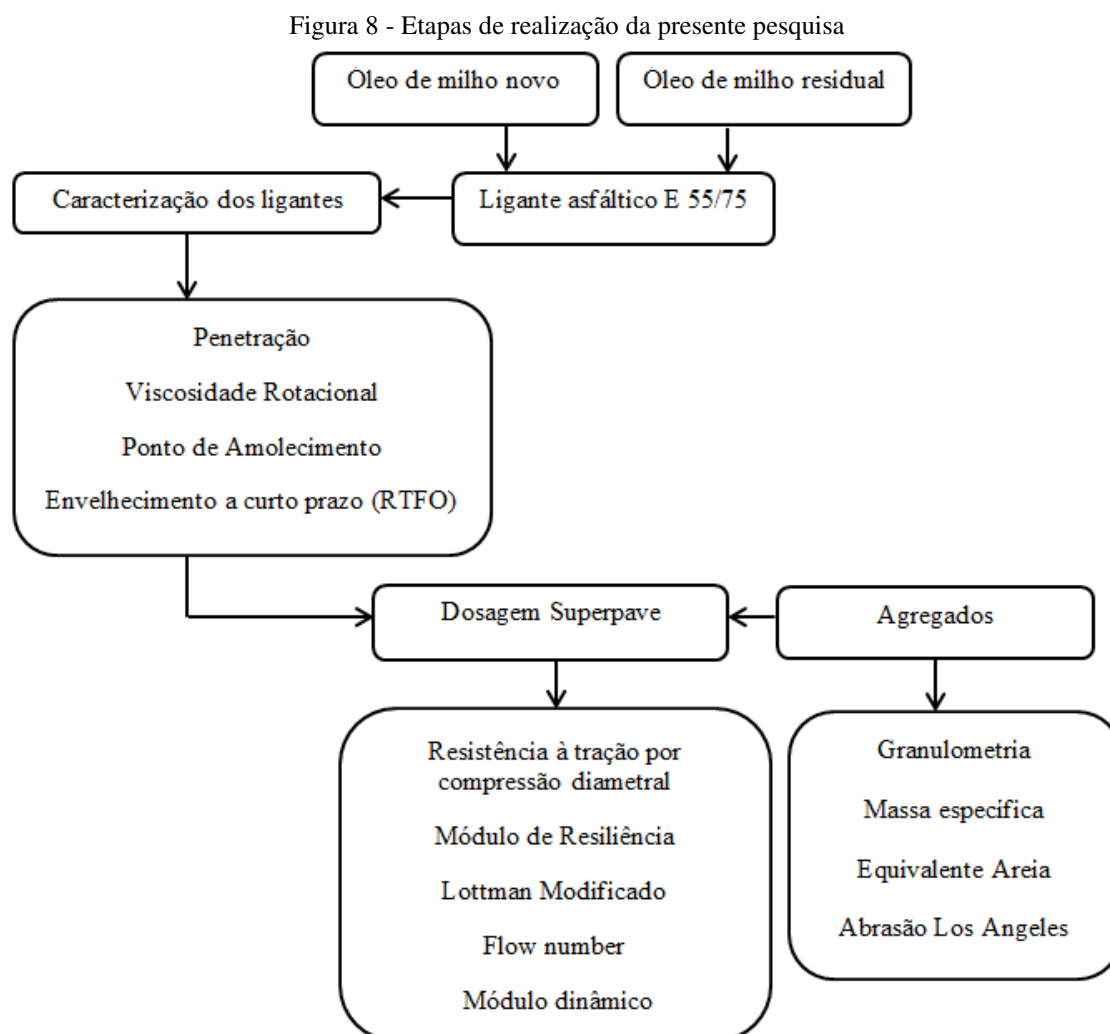
Resiliência, Módulo Dinâmico, Lottman Modificado e *Flow Number*, a autora verificou que a adição dos óleos, assim como as reduções nas temperaturas de usinagem e compactação tendem a reduzir parâmetros de resistência, rigidez e elevam o potencial à deformação permanente das misturas estudadas. No entanto, o óleo de milho mostrou-se como um aditivo viável para misturas mornas compactadas com uma temperatura de até 10°C abaixo da temperatura de projeto.

- Silvério (2017) avaliou o efeito da adição de 1% e 2% de óleo de soja novo e residual, respectivamente, ao AMP 55/75. Por meio de parâmetros mecânicos obtidos pelos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico, *Flow Number* e *Lottman* Modificado, a autora verificou o resultado de reduções de temperatura durante a produção das misturas asfálticas e concluiu que reduções de até 16°C não comprometeram o desempenho destas.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como forma de alcançar os objetivos propostos foram realizados ensaios laboratoriais no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O fluxograma da Figura 8 apresenta a seqüência de atividades desenvolvidas nesta pesquisa.



#### 3.1 Materiais

Para a preparação das misturas com o ligante asfáltico e os óleos, utilizou-se como materiais o ligante modificado pelo polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) e o óleo de milho, em seu estado novo e residual.

O ligante modificado pelo SBS foi obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A). O óleo de milho novo foi adquirido no comércio da cidade de Campina Grande-PB, da marca “Liza”. Como forma de obter a quantidade necessária de óleo residual para a realização da pesquisa, foram coletados óleos

resultantes de frituras domésticas após três reutilizações, os quais foram submetidos a decantação e posterior filtragem com de filtro de papel (Figura 9).

Figura 9 – Aspecto do óleo de milho após fritura, decantado e filtrado



Os agregados utilizados para confecção das misturas asfálticas foram a brita 19 mm, brita 12,5 mm e o pó de pedra (de origem granítica e provenientes da mineradora do Grupo Rocha Cavalcante), além de areia de leito de rio. Como fíler, utilizou-se a cal hidratada da marca MegaO (Figuras 10 e 11).

Figura 10 – Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 12,5mm

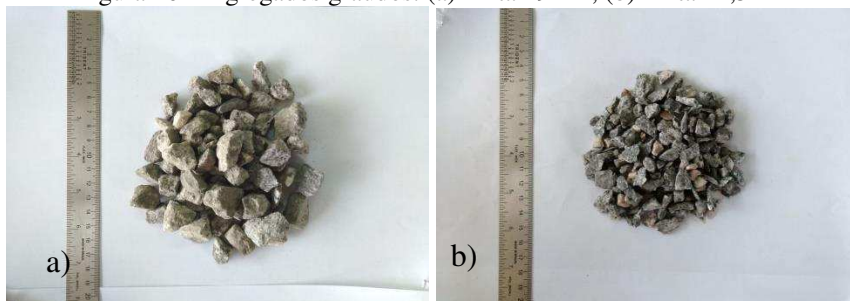


Figura 11 - Agregados miúdo e filler: (a) Areia; (b) Pó de pedra; (c) Cal hidratada



## 3.2 Métodos

### 3.2.1 *Produção da mistura do ligante asfáltico com a adição dos óleos*

As misturas do ligante com o óleo de milho novo e residual foram realizadas em um agitador mecânico de baixo cisalhamento da marca FISATOM, modelo 722D (Figura 12), de acordo com procedimentos estabelecidos em Faxina (2006) e Souza (2012). O ligante puro (AMP 55/75) foi aquecido em estufa a uma temperatura de 120°C durante aproximadamente uma hora e meia, como forma de garantir a fluidez do material. Depois de colocado em um béquer, o ligante foi inserido na manta do misturador até que fosse atingida a temperatura de estabilização da mistura, de 135°C. Em seguida, os teores ótimos dos óleos foram adicionados em proporção ao peso do ligante puro. Utilizando a rotação pré-estabelecida em 406 rpm, contabilizou-se um período de 20 minutos para a homogeneização da mistura. Finalizado esse procedimento, armazenou-se a mistura em recipientes adequados, para posterior utilização.

Figura 12 - Misturador mecânico FISATOM, modelo 722D



### 3.2.2 *Caracterização dos ligantes asfálticos*

A fim de caracterizar os ligantes asfálticos foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo, seguindo a metodologia apresentada na Tabela 1, cujos resultados estão apresentados na Tabela 2. Estes valores foram obtidos de Barros (2017).

Procedimento	Metodologia
Penetração	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME
Viscosidade Rotacional	ASTM D 4402
Envelhecimento a curto prazo	ASTM D2872/13 e ABNT 15235/09

Característica	Ligante puro (AMP 55/75)	+ 2% milho novo	+ 1% milho residual
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	63,8	86,7	70,7
Ponto de amolecimento, °C	52,0	52,5	53,5
Viscosidade Rotacional a 135°C, cP	978,50	810	863,7
Viscosidade Rotacional a 150°C, cP	464	395,5	421,5
Viscosidade Rotacional a 177°C, cP	159,50	141,0	148
Viscosidade Rotacional a 135°C, cP (pós RTFOT)	1428,8	1077,5	1216,3
Viscosidade Rotacional a 150°C, cP (pós RTFOT)	650,5	506,5	560
Viscosidade Rotacional a 177°C, cP (pós RTFOT)	208,5	171,2	186,25
Penetração retida, %	69,8	70,8	83,2
Perda de massa, %	0,046	0,062	0,027
Varição do ponto de amolecimento, °C	3,75	2,8	5,3

Observa-se que as amostras se enquadraram no exigido pela norma DNIT - ME 129/2011 que determina especificações para cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímero elastomérico.

Esses resultados apontam que a adição dos óleos de cozinha promoveu um aumento na penetração do ligante puro, o que indica uma diminuição da rigidez à temperatura de 25°C. Não foi possível verificar uma diferença significativa entre a penetração do ligante aditivado com o óleo novo e residual, uma vez que o aumento da porcentagem adicionada de óleo acarretou sucessivo aumento nos valores de penetração.

A penetração retida mede a capacidade que um ligante tem de manter sua característica de penetração após o procedimento de envelhecimento em estufa RTFO.

Quanto mais próximo de 100%, menor é a alteração do valor de penetração no envelhecimento a curto prazo. As adições de óleo resultaram em um aumento na penetração retida, o que reflete uma maior resistência ao envelhecimento desses.

As alterações nos valores de ponto de amolecimento dos ligantes aditivados com os óleos continuaram satisfazendo os requisitos da norma ABNT NBR 15235/09 (Determinação do Efeito do Calor e do Ar em uma Película Delgada Rotacional), que fixa um aumento máximo de 7 °C e redução máxima de 5 °C no ponto de amolecimento. A quantidade de adição dos óleos ao ligante asfáltico, no entanto, não demonstrou um comportamento proporcional às temperaturas de amolecimento.

A perda de massa observada no procedimento de envelhecimento a curto prazo na estufa RTFO, conforme Cavalcante (2016), está relacionada a uma volatilização e oxidação dos óleos adicionados, pois esses são mais voláteis e permissíveis à oxidação que os componentes do ligante. Verifica-se que as amostras ensaiadas se enquadraram nas especificações da norma ABNT NBR 15235/09, que preconiza a perda de massa máxima em 1%.

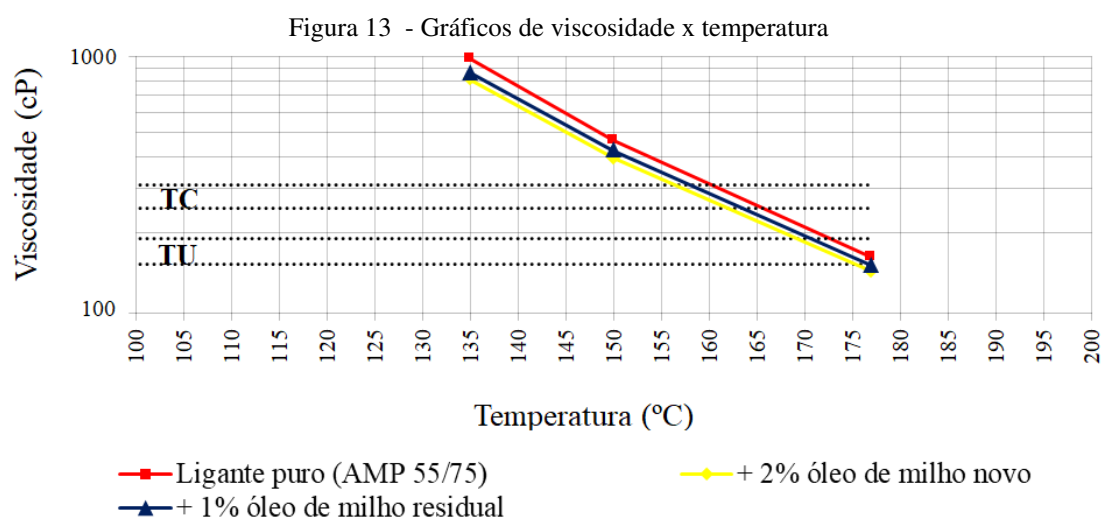
O ensaio de viscosidade rotacional executado no viscosímetro rotacional permitiu a constatação de que as adições dos óleos de milho promoveram uma diminuição na viscosidade do ligante asfáltico, de forma proporcional à porcentagem dos aditivos.

De acordo com o manual de projeto de misturas asfálticas do SUPERPAVE, a temperatura apropriada de usinagem é aquela na qual o ligante asfáltico convencional apresenta uma viscosidade de  $170 \pm 20$  cP, enquanto a viscosidade adequada para a temperatura de compactação é de  $280 \pm 30$  cP. Domingos et al. (2012) apontam, entretanto, que os ligantes asfálticos puros são fluídos cuja viscosidade independe da taxa de cisalhamento, enquanto que nos modificados por polímero a viscosidade depende não apenas da temperatura, mas também da taxa de cisalhamento. Desta maneira, estabelecer uma relação entre viscosidade e temperatura para ligantes modificados pode não ser tão exato quanto a aplicação deste procedimento para cimentos asfálticos puros, levando à obtenção de temperaturas de usinagem e compactação superiores às necessárias para garantir o recobrimento dos agregados.

Conforme Lucena (2005) alguns métodos utilizados para determinação das TUs e TCs para os ligantes asfálticos modificados incluem a determinação da viscosidade a cisalhamento zero (ZSV) e o uso reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). No caso dos materiais modificados com polímeros, a especificação da norma 385/1999 do DNIT

menciona que a temperatura conveniente para aquecimento do material é de 150°C acrescida de 3°C para cada 1% de polímero adicionado, até um limite máximo de 180°C, enquanto que a temperatura recomendável para a compactação é de 140°C acrescida de 3°C para cada 1% de polímero.

Mesmo sendo usualmente aplicada apenas para CAPs, nos casos em que se dispõe apenas da viscosidade obtida por meio do viscosímetro rotacional, a utilização das faixas de viscosidade tradicionais é uma simplificação que tem sido utilizada também na determinação das temperaturas de usinagem e de compactação dos materiais modificados (DOMINGOS et al., 2012). Além disto, a falta de dados sobre o teor de modificação do ligante asfáltico com polímero SBS, utilizado nesta pesquisa, levou à escolha da determinação das TUs e TCs a partir do ensaio de viscosidade rotacional, como apresentado da Figura 13.



A viscosidade utilizada para determinação das temperaturas de usinagem e compactação da mistura com ligante puro foi obtida a partir do valor médio entre as faixas de viscosidade propostas pela metodologia SUPERPAVE. Já para a determinação das TUs e TCs das misturas aditivadas com os óleos de milho, novo e residual, utilizou-se o limite superior da faixa de viscosidade, como forma de obter as maiores reduções de temperatura possíveis causadas pela adição dos óleos. Na tabela 3 são apresentadas as TUs e TCs de todas as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa, assim como as reduções obtidas em relação à mistura com ligante puro.

Tabela 3 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos e reduções alcançadas

Amostra	Temperatura de usinagem (°C)	Redução (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Redução (°C)
Ligante puro	175	-	162,5	-
+ 2% óleo milho novo	168	7	157,5	5
+ 1% óleo milho residual	168,8	6,2	158,5	4
+ 2% óleo milho novo -10 °C	158	17	147,5	15
+ 2% óleo milho novo -20 °C	148	27	137,5	25
+ 1% óleo milho residual -10°C	158,8	16,2	148,5	14
+ 1% óleo milho residual -20 °C	148,8	26,2	138,5	24

Apesar de que as reduções de temperatura observadas não possibilitaram o enquadramento das misturas como misturas mornas, acredita-se ser possível obter reduções maiores do que as apresentadas pelo resultado do ensaio de viscosidade rotacional. Segundo Portugal (2016), ao se tratar de aditivos orgânicos e surfactantes, a redução das temperaturas de usinagem e compactação deve considerar não apenas os resultados dos ensaios de viscosidade, como também incluir estudos sobre a lubrificação da mistura. Como os óleos agem na interface agregado-ligante, contribuem no correto cobrimento do agregado pela película de asfalto, promovendo uma melhor lubrificação da mistura, o que acarreta em um acréscimo de trabalhabilidade a temperaturas inferiores. Portanto, faz-se necessário a realização de ensaios físicos e mecânicos com misturas asfálticas incorporadas com estes óleos em temperaturas inferiores às determinadas no ensaio de viscosidade.

### 3.2.3 Caracterização dos agregados

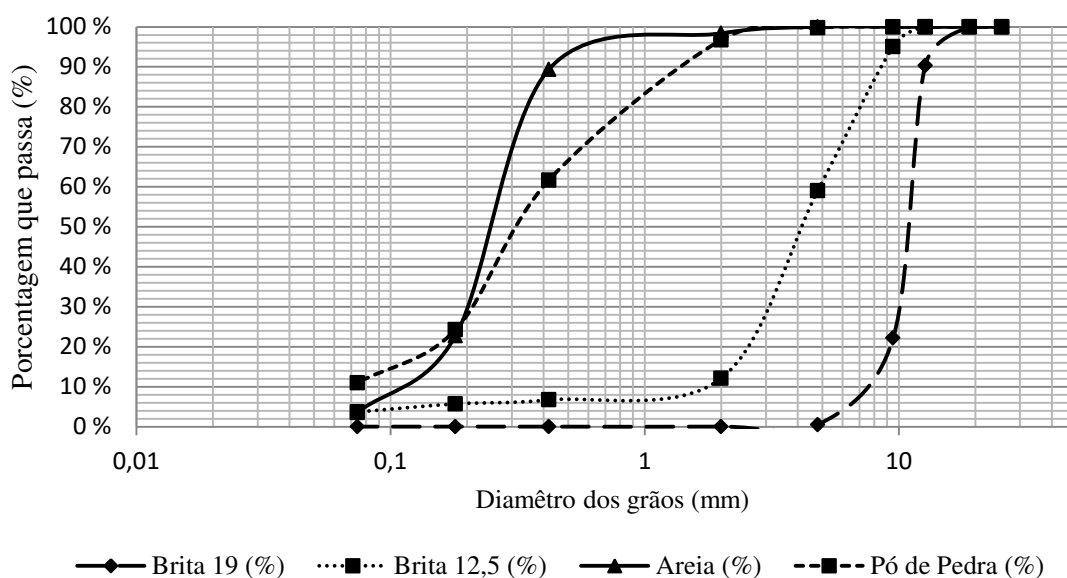
A caracterização dos agregados foi realizada por meio dos ensaios de massa específica do agregado graúdo e miúdo (DNIT-ME 081/98 e DNIT-ME 084/95, respectivamente); abrasão Los Angeles (DNIT 035/98 - ME); equivalente areia (DNIT 054/97 - ME), cujos resultados estão apresentados na Tabela 4, e granulometria dos agregados graúdos e miúdos (DNIT-ME 083/98), expressas na Figura 14.

Em função dos bons resultados obtidos por Luz (2016) e utilização de agregados advindos de mesma origem, utilizou-se a composição granulométrica por esta pré-definida, a partir dos valores de massa específica real e aparente dos agregados.

Tabela 4 - Resultados de massa específica real e aparente, abrasão Los Angeles e equivalente de areia dos agregados

Característica	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de pedra
Massa específica Real, g/cm <sup>3</sup>	2,49	2,76	2,60	2,58
Abrasão Los Angeles, %	17,4	25,4	-	-
Equivalente de Areia, %	-	-	87	60
Massa específica Aparente, g/cm <sup>3</sup>	2,48	2,74	2,38	2,56

Figura 14 - Curva granulométrica dos agregados



### 3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

Para a moldagem dos corpos de prova realizou-se primeiramente a dosagem das misturas asfálticas, com o objetivo de obter o teor ótimo de ligante. Nesta etapa, utilizou-se o ligante E 55/75 puro, pois o teor de ótimo de ligante poderia ser alterado pela adição dos óleos, parâmetro o qual se desejou manter fixo em todos os corpos de prova para melhor comparação dos resultados dos ensaios mecânicos.

A partir da granulometria dos agregados, enquadrada na faixa granulométrica “B” estabelecida pelo DNIT, e obedecendo aos critérios de pontos de controle e zona de restrição da metodologia SUPERPAVE apresentados na curva Fuller intermediária (Figura 15), foram obtidas as proporções de agregados apresentadas na Tabela 5.



Figura 15 - Curva Fuller intermediária

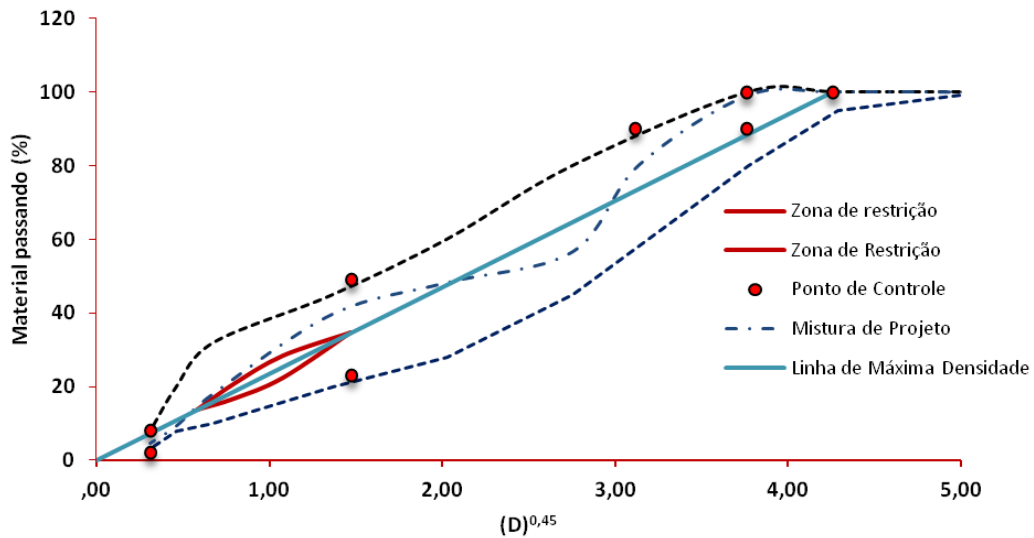


Tabela 5 - Proporção de agregados encontrada a partir da composição granulométrica

Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de pedra	Fíller
30%	23%	15%	30%	2%

A premissa inicial do projeto de misturas asfálticas é atingir um volume de vazios de 4% para o número de giros de projeto. Para isso, utilizando o compactador giratório Servopac, foram moldados corpos de prova no teor de ligante inicial de 4,5%, estimado para a mistura, bem como nos teores de  $\pm 0,5\%$  e  $+ 1\%$  em relação ao teor inicial, com um número de giros igual a 100. Realizou-se também o Rice Test (Figura 16), segundo a norma americana ASTM D2041/11, para determinar a densidade máxima teórica da mistura nos teores de tentativa do ligante e, a partir de parâmetros volumétricos dos corpos de prova, encontrar o teor ótimo de ligante para o volume de vazios de 4%. Os parâmetros volumétricos para o teor ótimo de ligante estão apresentados na Tabela 6, o qual foi encontrado a 4,87%.

Tabela 6 – Parâmetros volumétricos para a mistura com teos ótimo de ligante puro

Teor de Ligante	%Gmm	%Vvp	%Vam	%RBV
4,87%	95,96	4,04	15,27	73,80

Figura 16 – Aparelhagem utilizada no Rice Test



### 3.2.5 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Os corpos de prova (CPs) foram moldados utilizando a mesma composição granulométrica e mesmo teor de asfalto, alterando-se apenas o tipo de ligante e as temperaturas de usinagem e compactação.

Durante a mistura manual dos componentes das misturas asfálticas, verificou-se que a redução na temperatura de usinagem resultou em deficiências de homogeneização, principalmente nas reduções de 20 °C em relação às temperaturas de projeto (Figura 17). Como ressaltado em Ceratti et al. (2007) apud Grave (2016), a densidade aparente da mistura asfáltica é influenciada principalmente pela temperatura de produção desta, sendo a compactação fora dos limites de temperaturas estabelecidos em projeto um dos principais problemas na execução dos pavimentos.

Figura 17 – Homogeneização deficiente para a redução de 20 °C



Os corpos de prova foram moldados utilizando a mesma composição granulométrica e mesmo teor de asfalto, alterando-se apenas o ligante utilizado e as temperaturas de usinagem e compactação. Desta forma, esperou-se que os resultados observados nos ensaios mecânicos pudessem refletir o efeito da adição do óleo de milho, assim como a interferência da temperatura no desempenho mecânico das misturas asfálticas.

Os parâmetros de comparação foram estabelecidos por meio da realização dos ensaios mecânicos em sete diferentes grupos de corpos de prova:

- o grupo de controle, em que se utilizou o ligante modificado pelo polímero SBS, porém não aditivado pelos óleos, aqui referido como “puro”;
- os grupos em que as misturas asfálticas foram confeccionadas com o ligante modificado pelo polímero SBS e aditivado com o óleo de milho novo, usinadas e compactadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade rotacional, como também a 10 °C e 20° C abaixo desta;
- os grupos nos quais as misturas asfálticas foram produzidas com o ligante modificado pelo polímero SBS e pelo óleo de milho residual, usinadas e compactadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade rotacional, bem como a 10 °C e 20° C abaixo desta;

#### 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 (Figura 18), 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, gerando tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. A carga foi aplicada por meio de uma prensa mecânica (Figura 19), 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 Equação 1.

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

Equação 1

Onde:

$\sigma_t$  = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova

Figura 18 – Aspecto do corpo de prova após ruptura no ensaio de resistência a tração por compressão diametral



Figura 19 - Aparelhagem utilizada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral



### 3.2.5.2 Módulo de resiliência (MR)

Segundo Gama (2016) para se efetuar a análise de deformabilidade da estrutura de um pavimento é necessário conhecer as relações tensão-deformação dos materiais

que compõem suas camadas, sendo o módulo de resiliência o parâmetro considerado chave para a compreensão desse comportamento.

A deformação elástica ou recuperável das camadas de pavimentos submetidos a carregamentos repetidos é chamada de deformação resiliente. Para se efetuar a análise de deformabilidade de uma estrutura de pavimento é necessário conhecer as relações tensão-deformação ou os módulos de resiliência dos materiais que irão compor as camadas da mesma (BEZERRA NETO, 2004 apud COSTA, 2017).

A norma da ABNT 16018/2011 estabelece a medição das deformações reversíveis instantâneas provocadas por condições cíclicas de carregamento e descarregamento nos corpos de prova. O princípio do ensaio é baseado na aplicação de uma carga compressiva em formato de onda pulsante (haversine) 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.

Este 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 20). O procedimento consistiu na aplicação, em compressão diametral, de 100 ciclos de uma carga de ondas quadradas, com valor igual a 10% da força da RT, 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 20 - Equipamento utilizado para a execução do ensaio de módulo de resiliência



### 3.2.5.3 Dano por umidade induzida (*Lottman* modificado)

O ensaio *Lottman* modificado é amplamente usado para avaliar o dano por umidade em misturas asfálticas, a partir da verificação do potencial de deslocamento de sua película de asfalto sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo. Este é, portanto, um medidor de adesividade que considera o efeito deletério da água quanto a propriedades mecânicas.

Conforme Furlan (2006) apud Cavalcante (2016) a constatação dos efeitos deletérios da água nas misturas se faz importante, tendo em vista que a causa de defeitos como a desagregação e o deslocamento (*stripping*) em revestimentos asfálticos se dá por problemas relacionados à má adesividade na interface agregado-ligante que, quando submetidas às ações do tráfego e da água, tendem a maximizar danos no pavimento, ocasionando o aparecimento de patologias, como buracos e panelas.

O ensaio seguiu métodos especificados na AASHTO T283. Primeiramente, moldou-se corpos de prova (CPs) com 1200g de mistura asfáltica, apresentando volume de vazios de  $7\% \pm 1\%$ . Para tal, foi necessário alterar a quantidade de giros durante a compactação no compactador giratório em relação ao número de giros de projeto, sendo então utilizados 25 giros. Os CPs foram divididos em dois grupos: um com condicionamento e outro sem. O processo de condicionamento consiste 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 21). Em seguida, acondicionam-se os CPs saturados em sacos plásticos com aproximadamente 10 mL de água para leva-los à refrigeração à temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ , por um período mínimo de 16 horas. Posterior ao congelamento, os CPs seguem para um ciclo de aquecimento, onde são imersos em um banho em água destilada com temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , por um período de 24 horas. Por fim, submete-se os corpos de prova a outro banho em água destilada com temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  por um período de 2 horas, com o intuito de estabilizar sua temperatura e, por fim, rompê-los por meio do ensaio de resistência a tração por compressão diametral. O grupo não condicionado teve apenas sua temperatura regularizada num banho a  $25^{\circ}\text{C}$  e posteriormente foram também submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, assim como descrito no item 3.2.5.1.

A análise é feita pela razão entre as resistências à tração das amostras previamente condicionadas (RTu) e das amostras sem condicionamento (RT). Este valor, dado em porcentagem, é denominado Resistência Retida à Tração (RRT).



Figura 21 - Processo de saturação à vácuo dos corpos de prova condicionados



#### 3.2.5.4 Módulo Dinâmico (MD)

Segundo Ponte et al. (2014) apud Gama (2016) tanto o módulo dinâmico quanto o módulo resiliência medem a rigidez da mistura asfáltica. O segundo não permite uma modelagem apropriada dos fenômenos comumente associados aos pavimentos por não considerar suas deformações não elásticas.

O MR e MD diferem-se também na maneira de aplicação do carregamento. Enquanto que o teste de MD usa aplicação de carregamento senoidal, o MR usa carregamentos reversíveis com períodos de descanso. O ensaio de módulo dinâmico pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material. O MR é o parâmetro de rigidez mais difundido no Brasil devido tanto à cultura de utilização desse parâmetro quanto ao alto valor de aquisição de equipamentos para obtenção do Módulo Dinâmico (GAMA, 2016).

O ensaio realizado na AMPT - *Asphalt Mixture Performance Tester* (Figura 22) seguindo o método da AASHTO TP-62/2009, foi conduzido sob carregamento uniaxial de compressão senoidal em corpos de prova de 100mm de diâmetro por 150mm de altura. A deformação axial recuperável resultante da amostra, oriunda da tensão aplicada, é medida com LVDTs e usada para o cálculo do módulo dinâmico. O procedimento é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento com o intuito de se construir uma curva mestra que incorpore os efeitos das duas variáveis citadas, tempo e temperatura. O ensaio foi realizado em três temperaturas (4,4°C; 21,1°C e 37,8 °C) e em seis frequências de carregamento (0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz) para cada temperatura.

Figura 22 – Ensaio de determinação do módulo dinâmico realizado na AMPT



Para cada temperatura foi aplicada uma carga de contato diferente, igual a 5% de um valor típico de carga dinâmica, geralmente verificada em cada temperatura, conforme mostra Tabela 7.

Tabela 7 – Tensão de referência para carga de contato a cada temperatura

Temperatura, °C	Tensão, kPa
4,4	700
21,1	350
37,8	140

Pôde-se, então, estabelecer comparações entre as curvas mestras obtidas de todas as misturas avaliadas, de acordo com suas inclinações. Maiores inclinações ocorrem para materiais mais elásticos (COSTA, 2017).

#### 3.2.5.5 *Flow Number (FN)*

O ensaio de deformação pelo critério diametral é um teste de medida de deformação permanente de misturas asfálticas.

Para Budny (2012) os ensaios de aplicação de cargas estáticas não representam bem as deformações permanentes verificadas em campo. Desta forma, as aplicações de cargas repetidas são mais indicadas para simular o efeito da passagem contínua de veículos pesados sobre a estrutura do pavimento. Para tanto, este ensaio simula a



condução de um veículo pesado repetidamente sobre a estrutura do pavimento e oferece como resposta o *Flow Number* (FN), que é o número de ciclos de carga que o pavimento pode tolerar antes que ocorra a fluência, isto é, onde se começa a verificar o cisalhamento a volume constante (COSTA, 2017).

Conforme descrito em Costa (2017) o resultado deste ensaio é apresentado em forma de um gráfico que relaciona deformação permanente e o número de ciclos aplicados. Como ilustrado na Figura 23, a curva gerada pode ser subdividida em três zonas: a região primária (côncava para baixo), onde a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada, a região secundária (reta), em que a taxa de deformação é praticamente constante, e a região terciária (côncava para cima), onde a deformação cresce exponencialmente, indicando rompimento da amostra (Figura 24). O número de ciclos onde ocorre a transição entre as zonas secundárias e terciárias é definido como *Flow Number*.

Figura 23 – Regiões da curva deformação permanente versus número de ciclos aplicados durante o ensaio uniaxial de carga repetida (COSTA, 2017)

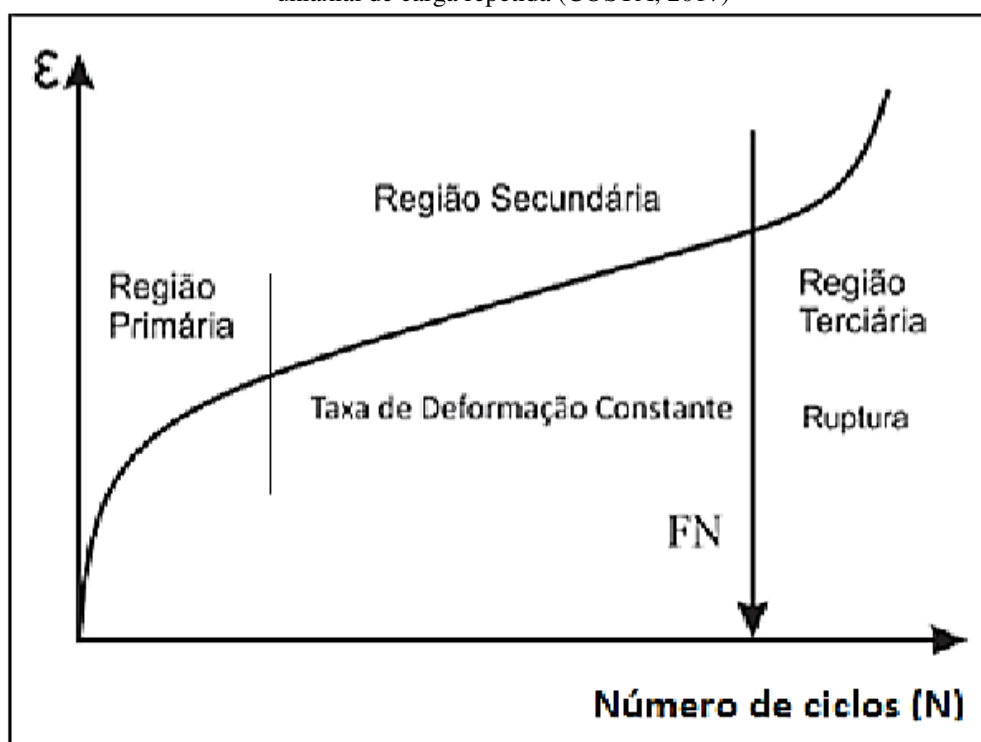


Figura 24 – Aspecto do corpo de prova após ensaio uniaxial de carga repetida



Os corpos de prova utilizados na realização deste ensaio mediam em torno de 150 mm de altura, diâmetro de 100 mm e volume de vazios de  $7\% \pm 0,5$ . O ensaio, realizado na AMPT (Figura 25), seguiu o procedimento descrito na norma brasileira (NBR 16505/2016) consistiu na 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.

Figura 25 – Realização do ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN na AMPT



### 3.3 Estimativa da economia energética

Neste item buscou-se, de maneira sucinta, estimar a economia de energia proporcionada pela utilização das oleaginosas e pelas as reduções nas temperaturas de usinagem propostas na produção das misturas asfálticas. Neste trabalho, dá-se enfoque à secagem e ao aquecimento dos agregados e do ligante asfáltico em usina, pois esta é uma etapa que demanda grande consumo energético na produção de misturas asfálticas aquecidas (MOTTA, 2011).

Ressalta-se que não foram consideradas possíveis alterações da usina ou quaisquer outras alterações necessárias para controle de inserção do aditivo, visto que se considera que estes materiais já teriam sido misturados ao ligante asfáltico previamente à usinagem.

Além disto, como verificado nos resultados dos ensaios mecânicos apresentados nos itens anteriores, uma vez que não foi verificada interferência do processo de fritura do óleo de milho no desempenho da mistura asfáltica, confirma-se o uso do óleo residual. Desta forma, o uso do óleo de milho residual como aditivo faz-se de maior interesse tanto pelo aspecto ambiental como também pelo custo nulo de sua aquisição.

A quantidade de energia requerida foi calculada para aquecer os agregados, o ligante asfáltico e o óleo de milho residual a partir da temperatura ambiente (25 °C) até a temperatura de usinagem. Além disto, considerou-se um teor de umidade de 3% nos agregados (MOTTA, 2011), sendo então também necessário estimar a energia exigida para evaporar a água presente nos agregados. Para tanto, utilizou-se as equações 2 e 3 provenientes da calorimetria.

$$Q = m c \Delta t \quad \text{Equação 2}$$

$$Q = m L_v \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

m - massa do material

c - calor específico médio

$\Delta t$  - variação da temperatura

$L_v$  - calor latente

Apesar de que o calor específico dos materiais é uma propriedade que varia em função da temperatura, estudos como Motta (2011) e Wargha Filho (2013) utilizaram valores médios de calores específicos para cálculos semelhantes. Estes valores estão apresentados na Tabela 8.

É importante salientar que, por falta de dados mais específicos, o valor do calor específico do óleo milho aqui considerado equivale ao seu estado novo, apesar de que, segundo Bannwart et al. (2006), o processo de fritura pode modificar a estrutura do óleo, alterando este parâmetro. Além disto, o calor específico do ligante asfáltico proposto por Wargha Filho (2013) considera o asfalto puro, o que difere do ligante asfáltico modificado por SBS utilizado nesta pesquisa. Todavia, o objetivo desta análise é comparar as diferentes misturas em termos de consumos energéticos, o que torna estas suposições aceitáveis, uma vez que estes mesmos parâmetros foram utilizadas para o cálculo da energia de produção de todas as misturas asfálticas estudadas.

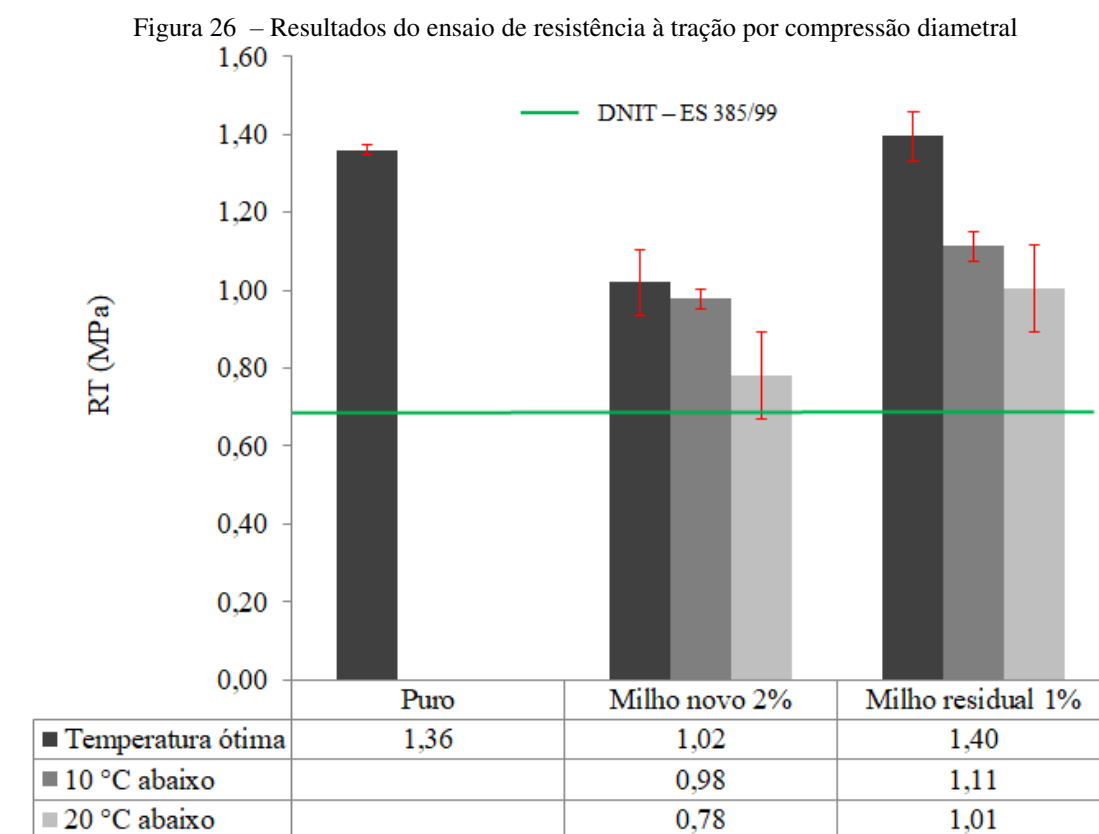
Tabela 8 – Calores específico e latente utilizados para o cálculo de consumo energético

Parâmetro	Valor
Calor específico dos agregados	850 J/kg.°C
Calor específico da água	420 J/kg.°C
Calor latente de vaporização da água	2250 kJ/kg.°C
Calor específico do ligante asfáltico	920 J/kg.°C
Calor específico do óleo de milho	1670 J/kg.°C

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resistência à tração (RT) por compressão diametral

Os valores apresentados na Figura 26 foram obtidos a partir das médias resultantes da realização deste ensaio em três corpos de prova para cada grupo de misturas asfálticas. Nela também constam os desvios padrões e indica-se o valor mínimo de RT estabelecida na norma DNIT-ES 385/1999.



Verifica-se que em todas as situações os valores da RT atendem à tensão mínima de 0,70 MPa a 25 °C, estabelecida na norma DNIT-ES 385/1999 para misturas asfálticas com asfalto polímero do tipo SBS.

Quando se compara as misturas produzidas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade, aqui referida como “temperatura ótima”, pode-se observar que a resistência da mistura com óleo de milho residual (1%) não apresentou alterações significativas em relação àquela com ligante puro. 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. Desta forma, espera-se que a RT da mistura modificada com óleo de milho residual seja menor que àquela com ligante

puro, dada a menor viscosidade do ligante. Todavia, o que pode ter causado esse comportamento foi um melhor envolvimento desse ligante aos demais componentes da mistura asfáltica, em virtude do óleo e sua característica lubrificante.

Para a mistura modificada com óleo de milho novo, na qual foi empregado um maior teor do aditivo (2%), verificou-se uma queda na RT de 25%, que pode dever-se à menor viscosidade do ligante utilizado, como esperado.

Não se verifica influência do processo de fritura do óleo quanto a esta propriedade nas misturas asfálticas analisadas.

Em relação à diminuição das temperaturas de usinagem e compactação, é possível notar a tendência de queda nos valores da RT. As misturas usinadas e compactadas a menos 10 °C em relação à temperatura de projeto apresentaram RT menores em 5% e 15% para as misturas aditivadas com óleo de milho novo e residual, respectivamente. Esta diferença ganha maiores proporções quando se diminui 20 °C, onde a RT reduziu em torno de 25% para ambas as misturas. Motta (2011) menciona que 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.

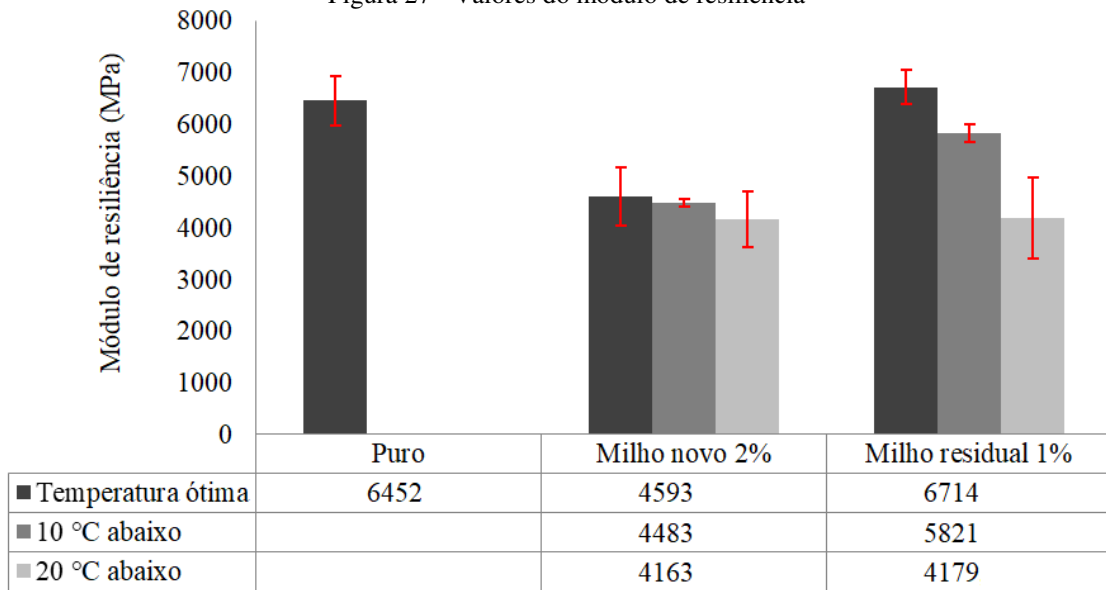
Deste modo, os dados apresentados comprovam que a temperatura de compactação de uma mistura asfáltica é um fator determinante para a resistência à tração que esta mistura irá apresentar.

#### **4.2 Módulo de resiliência**

Na Figura 27 constam os resultados médios obtidos a partir de três corpos de prova e seus respectivos desvios-padrões.

Alguns dos fatores que influenciam na estimativa do módulo de resiliência são o tipo de mistura, a faixa granulométrica (sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada), o tipo de ligante (sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), a temperatura e a energia de compactação, as propriedades volumétricas, entre outras variáveis (COSTA, 2017).

Figura 27 - Valores do módulo de resiliência



Comparando-se as misturas produzidas na temperatura de projeto, observa-se que, assim como nos resultados da RT, as misturas com óleo de milho residual (1%) apresentaram valores de MR similares aos da mistura com ligante puro (AMP 55/75), enquanto aquelas com óleo de milho novo (2% do aditivo) apresentaram uma queda significativa no módulo. Bernucci et al. (2008) mencionam que há uma boa correlação entre o MR e a resistência à tração dentro de famílias de misturas asfálticas de mesma composição granulométrica e tipo de ligante, cuja relação permanece constante com o passar do tempo, isto é, com o envelhecimento (MOTTA, 2011). Conclui-se, portanto, que a adição de 2% do óleo promove redução da rigidez da mistura, o que pode ser ocasionado pela menor viscosidade do ligante utilizado.

No que diz respeito às reduções na temperatura de produção, para as misturas com óleo de milho novo, houve um queda no MR de 2,4% e 9,4% quando se reduziu 10 °C e 20 °C, respectivamente. Estas reduções são, entretanto, pouco significativas e podem dever-se à pequena amostragem.

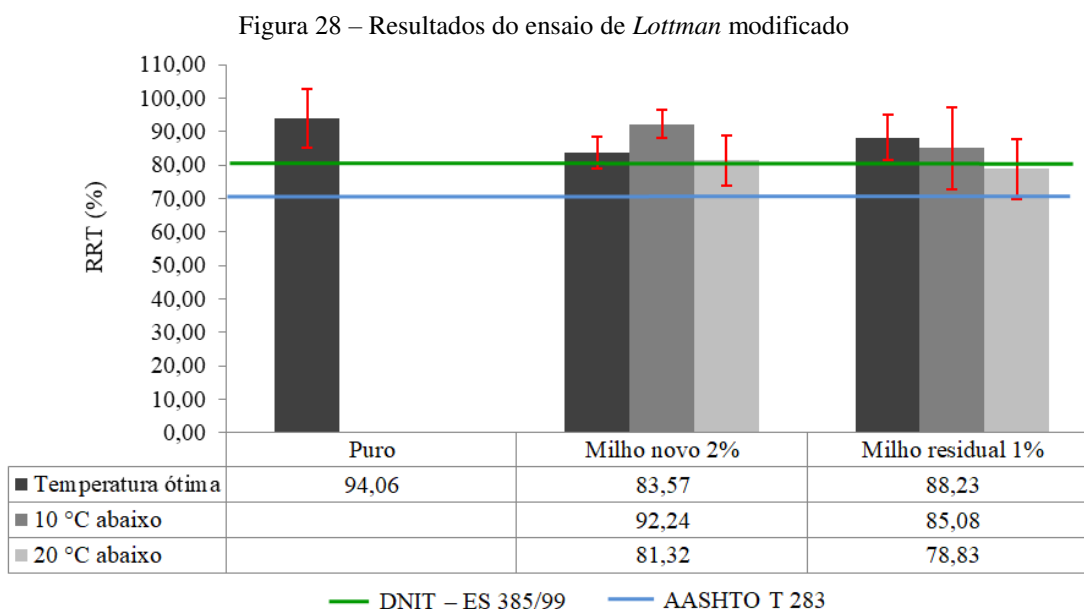
Para as misturas com óleo de milho residual, o MR apresentou uma tendência de queda mais acentuada, sendo estas de 13,3% e 37,7% quando se reduziu 10 °C e 20 °C, respectivamente, em relação à temperatura ótima.

Conforme apresentado em estudo realizado por Wargha Filho (2013), as diminuições do MR verificadas nas reduções de 10 °C e 20 °C podem ocorrer em virtude da menor temperatura utilizada na usinagem e na compactação, a qual leva a um menor envelhecimento da mistura, o que a torna menos rígida, acarretando menores valores de MR.

Elevados valores de MR indicam que, para uma dada carga, houve baixa deformação da mistura (GAMA, 2016). MR altos, entretanto, 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 (SOUZA, 2012). Sendo uma mistura 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 observada por meio 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). Na Figura 28 são apresentados os valores médios obtidos a partir de quatro 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 dois CPs condicionados e dois não condicionados para cada grupo de misturas.



Os fatores determinantes no desempenho quanto ao dano por umidade induzida verificados pelo ensaio *Lottman* modificado foram o grau de saturação, o ligante asfáltico e a temperatura de usinagem e compactação, visto que as demais condicionantes foram mantidas constantes.



De acordo com a AASHTO T 283 (1999), para a metodologia SUPERPAVE o valor de RRT mínimo para que a mistura seja considerada não susceptível à ação deletéria da água é 80%. Para esta especificação, apenas a mistura com óleo de milho residual produzida a menos 20 °C em relação à temperatura de projeto apresentou-se insatisfatória. A norma DNIT-ME 031/2006, entretanto, preconiza a RRT mínima de 70%. Para esta norma, todas as misturas atenderam ao mínimo estabelecido.

Todas as amostras modificadas apresentaram sensibilidade à umidade maior do que aquela com ligante não aditivado, demonstrando a interferência destes aditivos quanto à manutenção do comportamento adesivo das misturas asfálticas.

Conforme a redução nas temperaturas de usinagem e compactação também é possível observar, de forma geral, uma tendência de queda da RRT. Isto pode estar relacionado às menores temperaturas de trabalhabilidade, que podem indicar que a água não foi completamente expulsa da mistura, pois a evaporação da água nos agregados é comprometida. Além disto, o efeito deletério da água é completamente dependente da estrutura interna da amostra, tais como o grau de conectividade e o tamanho dos vazios (RIBEIRO, 2011). O fato de ter-se utilizado temperaturas menores para produção destas misturas pode ter ocasionado vazios mais conectados nos corpos de prova, facilitando a entrada da água, assim como o deslocamento da película de ligante nas misturas asfálticas analisadas.

Apesar da tendência de queda da RRT em função da temperatura, para a mistura com óleo de milho novo produzida a menos 10 °C observou-se um valor de RRT maior que aquele para a mistura com o mesmo óleo, mas usinada e compactada na temperatura de projeto. Isto, possivelmente, ocorreu devido à variabilidade do próprio ensaio de RT, associado a fatores como a faixa de variação do volume de vazios (6 a 8%) e do grau de saturação (70 a 80%), além do processo de compactação, pois não há como saber como os vazios estão distribuídos, apenas se tem conhecimento a respeito da quantidade total destes na mistura.

Vale salientar que apesar de que os valores médios de RRT permitam inferir uma tendência sobre os resultados do dano à umidade induzida, os elevados desvios padrões, aliados ao grau de empirismo deste ensaio (como heterogeneidade dos CPs e desvios de execução), pode não caracterizar necessariamente uma susceptibilidade ao dano proporcional à redução de temperatura, sendo necessários então dados mais representativos.

#### 4.4 Módulo dinâmico

Costa (2017) descreve que as curvas mestras são representadas por meio de uma curva contínua ( $\log |E^*|$  versus  $\log f$ ) elaboradas a partir do processo de superposição tempo-temperatura na temperatura de referência de 21°C. Esta representação gráfica, obtida a partir dos valores médios de dois CPs, fornece informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. Uma curva mestra cujos valores formam uma linha horizontal caracterizaria uma mistura com comportamento puramente elástico. Já uma curva próxima do vertical corresponderia a um concreto asfáltico muito susceptível às variações de frequência e de temperatura (OTTO, 2009).

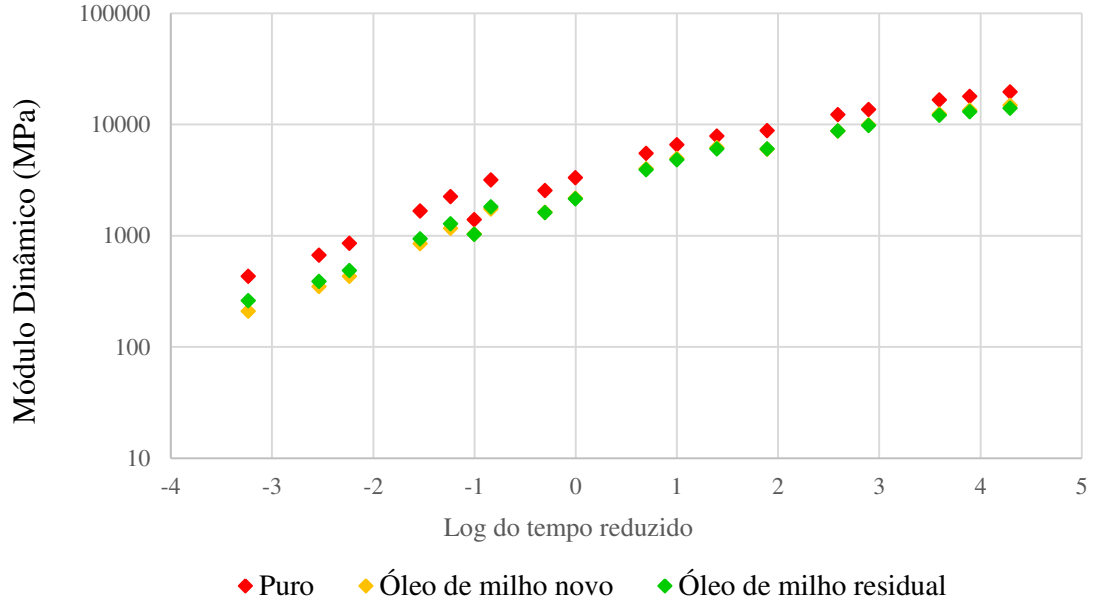
Para melhor visualização e comparação das características de rigidez das misturas estudadas, representou-se a reunião das curvas mestras da mistura com ligante puro (AMP 55/75), óleo de milho novo e óleo de milho residual usinadas e compactadas na temperatura de projeto (Figura 29), das misturas aditivadas com óleo de milho novo, produzidas na temperatura de projeto, bem como a 10 °C e 20 °C abaixo desta (Figura 30) e das misturas modificadas com óleo de milho residual, produzidas na temperatura de projeto e a 10 °C e 20 °C abaixo desta (Figura 31).

Em uma visão geral, é possível verificar que todas as curvas mestras das misturas estudadas apresentaram comportamentos semelhantes quanto à queda da rigidez conforme o aumento da temperatura. Isto é esperado, pois o módulo dinâmico, por ser uma medida de rigidez assim como o MR, também é influenciado pela temperatura de execução do ensaio (COSTA, 2017). A rigidez de todas as misturas também caiu com a diminuição da frequência de aplicação de carga. Sabe-se também que, nesta representação, uma curva mais horizontal indica um material de comportamento muito elástico. Logo, é evidente que todas as curvas representam um material viscoelástico, pois apresentam uma suave inclinação.

Na Figura 29, observa-se que a mistura com ligante puro apresentou rigidez maior do que aquelas aditivadas com os óleos de milhos, principalmente na temperatura mais alta (37,8 °C), referente à parte inicial da curva.

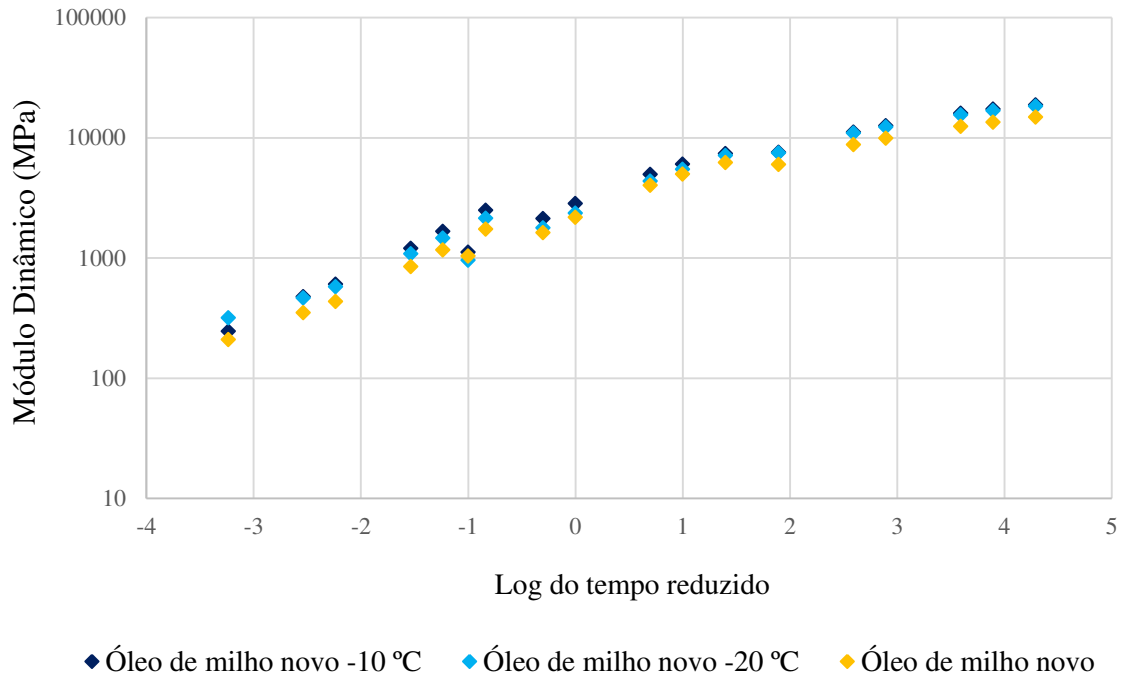
No que diz respeito à inclinação das curvas, as três misturas se comportam de maneira semelhante, indicando que apresentam parcelas viscosas e elásticas similares.

Figura 29 – Curvas mestras das misturas com ligante puro, óleo de milho novo e óleo de milho residual



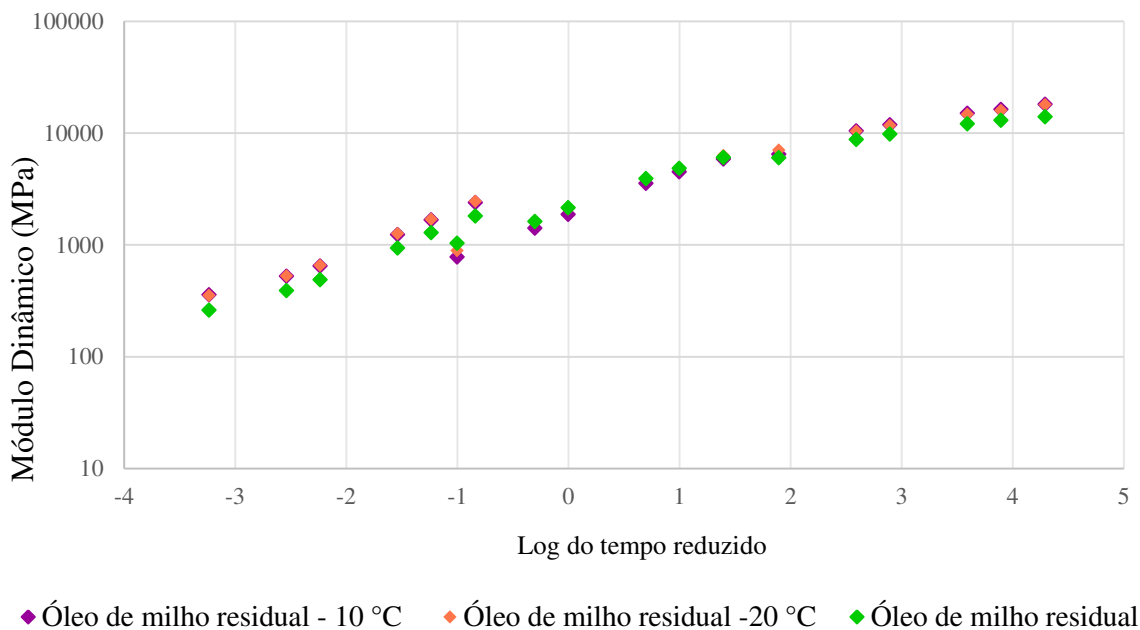
A partir da Figura 30 observa-se que as misturas aditivadas com óleo de milho novo, usinadas e compactadas a menos 10 °C e 20°C possuem rigidez maior do que aquela da mistura produzida na temperatura de projeto. Além disto, são mais sensíveis ao efeito da variação de frequência e temperatura, pois apresentam uma taxa de crescimento maior.

Figura 30 - Curvas mestras da mistura com óleo de milho novo, produzidas na temperatura de projeto e a - 10 °C e - 20 °C abaixo desta



Analisando as três curvas mestras das misturas aditivadas com óleo de milho residual, usinadas e compactadas na temperatura de projeto e a menos 10 °C e 20°C desta (Figura 31), pode-se notar que as misturas que tiveram sua temperatura de usinagem e compactação reduzidas apresentaram, de forma geral, rigidez maior do que aquela da mistura produzida na temperatura de projeto. Suas curvas mestras demonstram, também, um comportamento mais viscoso, devido a uma maior inclinação, enquanto a mistura produzida na temperatura de projeto, cuja curva mestra é menos inclinada, indica um comportamento mais elástico.

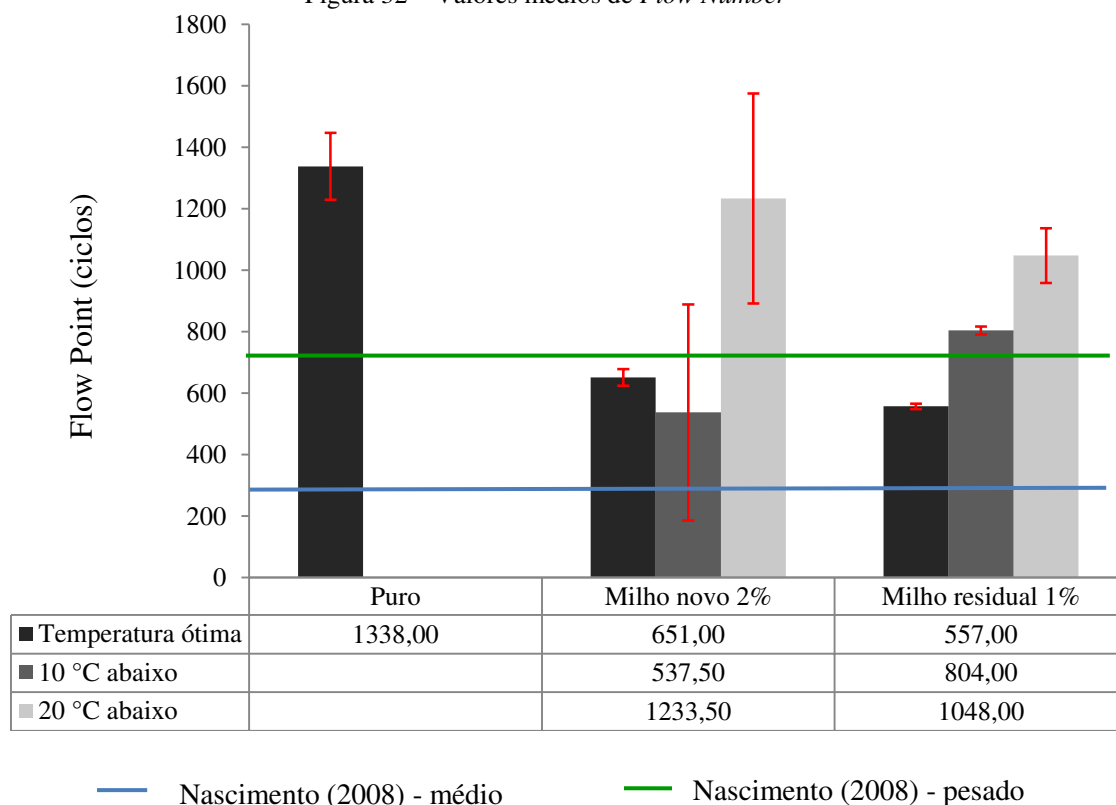
Figura 31- Curvas mestras da mistura com óleo de milho residual, produzidas na temperatura de projeto e a – 10 °C e – 20 °C abaixo desta



#### 4.5 Flow Number

Os valores apresentados na Figura 32 foram obtidos a partir das médias resultantes da realização deste ensaio em dois corpos de prova para cada grupo de misturas asfálticas. Nela constam também os desvios padrões e indica-se os valores mínimos de *Flow Number* propostos por Nascimento (2008) para vias de tráfego médio e para vias de tráfego pesado.

Figura 32 – Valores médios de *Flow Number*



Percebe-se que a mistura composta por ligante não aditivado apresentou os maiores valores do *Flow Number* (FN), suportando, portanto, 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.

Pode-se inferir que as misturas com adição do óleo produzidas na temperatura de projeto teriam um maior potencial à deformação permanente, dado a queda dos valores do FN de 51% e 58% para a mistura com óleo de milho novo e residual, respectivamente, em comparação à mistura de controle.

Conforme Hurley e Prowell (2006) o tipo de ligante influencia diretamente no risco de deformação permanente, seguido pela temperatura de compactação. A resistência à deformação permanente é uma das grandes preocupações no que se refere a misturas mornas, visto que as menores temperaturas de usinagem e compactação resultariam também em uma menor rigidez inicial da mistura (WARGHA FILHO, 2013). No entanto, observou-se que, salvo a diminuição de 10 °C na mistura de óleo de milho novo, a redução das temperaturas de usinagem e compactação ocasionou aumentos nos valores de FN. Este resultado mostra-se inusitado, visto que, conforme estudos de Wargha Filho (2013), Barros (2017) e Onofre (2012), verifica-se uma menor

resistência à deformação permanente em amostras produzidas em menores temperaturas. Estima-se, no entanto, que uma das principais fontes de variação nos resultados deste ensaio possa ser a disposição dos agregados na massa asfáltica.

A maioria das misturas apresentou um desvio padrão baixo, com exceção das misturas com óleo de milho novo, usinadas e compactadas a 10°C e 20°C abaixo da temperatura ótima, em que o desvio foi superior a 300. Como a média é calculada a partir do FN de duas amostras, faz-se necessário trabalhar com mais amostras para obter-se maior representatividade e um desvio padrão mais confiável.

Conforme descrito em Barros (2017) o Ensaio Uniaxial de Carregamento Repetido (EUCR) é cada vez mais utilizado como critério de avaliação das misturas asfálticas quanto à deformação permanente. A partir da realização do EUCR à 60 °C e tensão de 204 kPa, assim como neste trabalho, Nascimento (2008) correlacionou valores de FN com níveis de tráfego recomendados. O autor estipulou os valores de 300 para tráfego médio e 750 para tráfego pesado.

Desta forma, percebe-se que mesmo com a adição dos óleos e subsequente redução nas temperaturas de produção das misturas asfálticas, o número de ciclos até a fluência de todas as amostras alcançam o valor recomendado por Nascimento (2008) para rodovias de tráfego médio. Já para rodovias de tráfego pesado, enquadram-se a mistura modificada pelo óleo de milho residual produzida a menos 20 °C, a mistura modificada com óleo de milho novo produzida a menos 10 e 20 °C e a mistura de controle.

Desta forma, quanto à deformação permanente, o desempenho das misturas asfálticas estudadas pode ser considerado satisfatório.

#### **4.6 Estimativa da economia energética**

De posse das temperaturas de usinagem dos materiais utilizados, calculou-se a quantidade de energia necessária para produção de uma tonelada de cada mistura asfálticas estudada, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Temperatura inicial e final de usinagem e estimativa da energia necessária para produzir 1t de mistura asfáltica

Tipo de mistura	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)		Energia de usinagem (MJ)
		Ligante asfáltico	Agregados	
Puro (AMP 55/75)	25	175	177	191.036
Milho residual	25	168,8	177	190.809
Milho residual -10 °C	25	158,8	173,8	187.846
Milho residual -20 °C	25	148,8	163,8	179.550

Constata-se que a mistura incorporada com óleo de milho residual usinada na temperatura de projeto apresentou consumo energético 0,12% menor do que aquela com o ligante modificado pelo SBS. A redução de 10 °C promoveu uma diminuição de 1,67%, enquanto a redução de 20 °C apresentou um consumo 6,02% inferior ao necessário para usinagem da mistura de controle. A partir destes dados cabe salientar, portanto, que a economia energética talvez não seja um dos maiores ganhos com as misturas estudadas, devendo-se levar em consideração outros aspectos positivos relacionados às reduções de temperatura de usinagem e compactação.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta pesquisa abrangeu o estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com óleo de milho novo e pós-uso, usinadas e compactadas na temperatura determinada a partir do ensaio de viscosidade do ligante asfáltico, como também a 10 °C e 20 °C abaixo desta.

Por meio da análise dos resultados obtidos nessa pesquisa, conclui-se que:

- todas as misturas estudadas apresentaram RTs mínimas acima dos valores estabelecidos pelas normas vigentes e MR aceitáveis, mesmo havendo um decréscimo destes parâmetros à medida que se reduz as temperaturas de usinagem e compactação;
- no que diz respeito ao dano por umidade induzida, medido por meio do ensaio de *Lottman* modificado, todas as amostras modificadas apresentam sensibilidade à umidade maior do que aquela com ligante não aditivado, demonstrando a interferência da adição do óleo de milho quanto à manutenção do comportamento adesivo das misturas asfálticas. Além disto, conforme a redução nas temperaturas de usinagem e compactação também é possível observar, de forma geral, uma tendência de queda da RRT. Isto pode estar relacionado às menores temperaturas de trabalhabilidade, que podem acarretar umidade não completamente expulsa das misturas. Neste ensaio, a mistura de óleo de milho residual produzida a menos 20 °C em relação à temperatura de projeto apresentou-se insatisfatória segundo especificações AASHTO. Por isto, cuidados são exigidos no que diz respeito a grandes reduções de temperatura de produção quanto à sensibilidade à umidade das misturas asfálticas estudadas;
- a partir dos valores de módulo dinâmico, observou-se que, em relação às propriedades viscoelásticas, as misturas apresentaram tendências similares de queda de rigidez conforme o aumento da temperatura e diminuição da frequência de aplicação de carga. Entretanto, as misturas produzidas a menos 10°C e 20°C são mais sensíveis ao efeito da variação de frequência e temperatura, pois apresentam curvas mestres em geral mais inclinadas que aquelas das misturas produzidas na temperatura de projeto;
- quanto à resistência à deformação permanente, houve uma queda dos valores de FN para as misturas modificadas com os óleos de milho novo e residual.



Quando reduziu-se as temperaturas de usinagem e compactação, entretanto, as misturas apresentaram um incremento no valor do FN, sendo este um resultado inesperado, visto que a resistência à deformação permanente é uma das grandes preocupações no que se refere a misturas mornas.

- tendo em vista que o processo de fritura não foi refletido nos resultados, destaca-se o uso do óleo residual por apresentar maiores benefícios ambientais, sendo um aditivo viável para incorporação no ligante asfáltico, além de promover um descarte ecológico para este insumo.

### **5.1 Sugestões para pesquisas futuras**

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, são sugeridos os seguintes tópicos para estudos futuros:

a) realizar dosagens distintas para cada ligante asfáltico estudado, a fim de verificar se as características de lubricidade do AMP E 55/75 incorporado com os óleos de milho pode reduzir o teor de ligante utilizado nas misturas;

b) avaliar as propriedades volumétricas das misturas asfálticas usinadas e compactadas a menos 10 °C e 20°C em relação à temperatura de projeto, visto que estas temperaturas podem ter impedido uma compactação adequada, ocasionando um volume de vazios maior do que o previsto;

c) realizar o ensaio de fadiga como forma de prever a deformação permanente das misturas asfálticas estudadas;

d) executar trechos experimentais com as misturas asfálticas avaliadas neste trabalho para monitoramento e criação de banco de dados relacionado ao desempenho obtido com estes tipos de misturas em escala real;

e) fazer levantamentos mais aprofundados sobre as reais economias energéticas e financeiras, bem como a reduções de emissão de gases poluentes durante o processo produtivo das misturas estudadas;

f) ampliar a amostragem e aprofundar o tratamento estatístico para obter-se dados mais relevantes e confirmar tendências e correlações observadas neste trabalho;

g) avaliar o uso dos ligantes asfálticos aqui estudados em misturas asfálticas compostas por outras faixas granulométricas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. EUA, 2007.

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.

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 16018**: Materiais asfálticos - Materiais asfálticos - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. São Paulo, 2011.

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

BANNWART, E., OLIVEIRA R., PEDROCHI F., CONSTANTINO R., RÉ P., JORGE N. Estudo da degradação de óleos vegetais com a técnica de lente terminada e métodos convencionais. In: **Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC**. Anais... Florianópolis – SC, 2006.

BARROS, A. G. **Avaliação da adição de óleo de cozinha em propriedades mecânicas de misturas asfálticas** - Pró-reitoria de pesquisa e extensão. Programa institucional de bolsas de iniciação científica. Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

BARROS, L. M. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho conforme critério de flow number de misturas quentes e mornas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 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.

CAPITÃO, S.D.; PICADO-SANTOS, S.G.; MARTINHO, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. **Construction and Building Materials**, vol 36, pg 1016–1024, 2012.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus asitattissimom nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese de doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

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.

COELHO JÚNIOR, M. L. P.; ROCHA, P. H. T. (2013) **Estudo preliminar de misturas asfálticas à quente utilizadas em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia**. Projeto de Pesquisa apresentado ao Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 2013.

COSTA, D. B.; CAVALCANTE, F. B.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. N. G. D.; LIRA, Y. C. Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo. **44ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação**. 2015.

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.

CONAB. **Observatório Agrícola – Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, DF, 2016. <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em 20 fevereiro 2017.

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 054:** Equivalente areia. Rio de Janeiro, 1997.

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 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 ES 385:** Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNIT 031:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro, 2006.

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 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNIT 129:** Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

DOMINGOS, M.; PAMPLONA, T.; FAXINA, A.; GIGANTE, A. Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. **Revista Transportes**, v. 20, n. 2, p. 15–22, 2012.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** Tese de doutorado - Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, 2006.

GAMA, D. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos.** Tese de doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

GRAVE, L. E. **Efeito da temperatura de compactação nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.** Monografia (Graduação) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, RS, 2016.

GRECO, J. A. S. **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos.** Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – UFSCAR, São Carlos, SP, 2004.

JORGE, N. et al. Medidas da estabilidade oxidativa e compostos polares totais do óleo de soja refinado e da gordura vegetal hidrogenada em frituras. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, artigo 64(2), pp. 162-166, 2015.

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

LOPES, B. F. R. **Dinâmica da logística do milho brasileiro: uma aplicação de um modelo de equilíbrio espacial.** Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2015.

LUCENA, L. C. F. L.; SILVEIRA I. V.; COSTA, D. B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**. artigo 11681, pp.65-75, 2016.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros.** Tese (Doutorado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2005.

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.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

MARTINS, S. **Estudo das misturas asfálticas modificadas com adição de óleo de soja.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

MARINI FAYAT GROUP, 2001. Disponível em <http://marini.co.in/2011/06/warm-asphalt-mixes/>. Data de acesso: 24 de janeiro de 2018

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.** Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

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.

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

PORTELA, E. L. et al. (2008) Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos pelo método dos elementos finitos. In: **Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. Anais...** Fortaleza: ANPET, p. 1-12, 2008.

PORTUGAL, A.C. **Estudo do Emprego do Óleo Vegetal como Ligante no Cimento Asfáltico De Petróleo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2016.

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 Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2011.

ROHDE, L. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2007.

SILVA, G. G. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 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, F. V., SOARES J. B. Efeito da consideração do comportamento viscoelástico linear do revestimento no cálculo de tensões e deslocamentos em pavimentos asfálticos. In: **Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes Anais, 27., 2003.** Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ANPET, 2003.

**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.

**SPADA, J. L. G. Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

**WARGHA FILHO, N. Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2013.