



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

**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM ÓLEO DE GIRASSOL**

**REBECCA MAGNO DE ANDRADE**

**Campina Grande - PB**

**Fevereiro de 2018**

REBECCA MAGNO DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO NA  
FABRICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS**

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.

Área de concentração: Geotecnia  
Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena  
Co-orientador: MSc. Daniel Beserra Costa

Campina Grande - PB  
2018

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

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO NA  
FABRICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

---

Orientanda: Rebecca Magno de Andrade

---

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. D. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

---

Co-orientador: MSc. Daniel Beserra Costa

---

Examinador interno: MSc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho

---

Examinador externo: MSc. Jonny Dantas Patrício

NOTA: \_\_\_\_\_

Campina Grande - PB  
2018

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser o grande renovador de forças e me permitir concluir mais uma etapa da minha vida com êxito, mesmo diante de muitas adversidades.

Aos meus pais, Roberto e Lucélia, a quem eu devo minha maior gratidão. Sem o apoio e amor de vocês, nestes 5 anos, nada teria se concretizado. Vocês acreditaram e permitiram que o meu sonho de virar engenheira civil existisse.

À minha irmã Rafaella, que mesmo de longe esteve me apoiando e torcendo pelo meu sucesso, acreditou em mim quando nem eu mesma tinha certeza. Meu cunhado Ícaro também me apoiou e se fez presente nessa caminhada.

À minha avó Alzira Andrade, meu anjo da guarda, que representa o espelho de pessoa que luto para ser todos os dias, quem eu mais admiro e sempre se fez presente.

À minha família, que me apoiou nos momentos difíceis, enquanto não pude estar perto, mas sempre me emanaram boas energias para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

À UFCG, unidade de ensino que me permitiu possibilidade de horizontes a seguir e foi ambiente de muito aprendizado, onde me construí como profissional e conheci mestres, parceiros de profissão e amigos que guardarei comigo por essa caminhada.

Ao meu orientador Adriano Elísio, que me auxiliou e me transmitiu muitos conhecimentos desde o PIVIC e acreditou no meu potencial, além de ter sido meu professor na graduação, o que me inspirou em buscar esse segmento da engenharia.

Ao meu co-orientador e amigo Daniel Beserra, quem me ajudou pacientemente nesta luta diária no LEP e acreditou em mim, como profissional e como pessoa.

Aos meus amigos Ablenya, Christian, Daniel, Ivna, Hícaro e Laís, que foram responsáveis por permitir que o último ano do meu curso tivesse o melhor aproveitamento possível. Amigos de profissão e da vida.

Á minha irmã Elissandra a qual sempre torceu pelo meu sucesso profissional e pessoal, participando mesmo à distância desse luta diária.

Às minhas amigas de coração Karol, Ranny e Raiza que Campina Grande me permitiu ter e sou muito grata por isso.

## RESUMO

Nos últimos anos, a preocupação com o meio ambiente se intensificou e a pavimentação asfáltica tornou-se enfoque na busca da preservação ambiental. As misturas asfálticas mornas surgiram como alternativa às misturas asfálticas convencionais a fim de diminuir a emissão de gases poluentes à atmosfera e melhorar as condições de trabalho dos operadores. O uso de aditivos oleicos na mistura se mostrou promissor para redução da temperatura de usinagem e compactação. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas modificadas com a adição do óleo de girassol, bem como verificar a influência da redução em 10 e 20°C na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade rotacional. Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à tração, módulo de resiliência, Lottman modificado e Flow Number. Os resultados indicaram que as misturas asfálticas com adição de óleo de Girassol usinadas e compactadas à 10°C abaixo da temperatura ótima obtiveram melhor desempenho mecânico nos ensaios. Estas atenderam as exigências normativas em todos os ensaios e apresentaram um desempenho de qualidade superior as misturas com ligante puro. Os resultados apresentam-se relevantes por também promoverem um menor impacto sobre o meio ambiente com a menor emissão de poluentes, devido à redução de suas temperaturas de usinagem e compactação, além da economia de no custo de sua fabricação.

**Palavras chaves:** Misturas mornas; aditivos verdes; óleo de girassol.

## ABSTRACT

In recent years, concerns about the environment have intensified and the asphalt paving industry has become a focus in the pursuit of environmental preservation. The Warm Mix Asphalt is an alternative to the conventional asphalt mixtures as it can reduce the emission of polluting gases into the atmosphere and improve the working conditions. The use of oleic additives in the mixture has shown to be promising for the reduction of the mixing and compaction temperatures. The present study had the objective of evaluating the addition of the sunflower oil into the asphalt binder as well as to verify the influence of the reduction in 10 °C and 20 °C of the temperature determined by the rotational viscosity test on the mechanical properties of the asphalt mixtures. The mechanical tests of Indirect Tensile Strength, Resilience Modulus, Modified Lottman and Flow Number were performed. The results show that, among the studied mixtures, those that presented the best mechanical response were the mixtures produced at 10 °C below the optimum temperature. These mixtures have met the specifications for quality of the resulting pavement and have shown even better results than the mixture produced with the non-modified asphalt binder. The results are relevant as they also promote a lower impact on the environment with the lower emission of pollutants, due to the reduction of mixing and compaction temperatures, besides the energy savings.

Key-words: Warm mix asphalt, green additives, sunflower oil

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de Esforços / aplicação.....	13
Figura 2 - Representação de curvas granulométricas .....	16
Figura 3 - Corpo de prova com as camadas de revestimento utilizadas.....	16
Figura 4 - Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem adaptado de (FHWA, 2008).....	17
Figura 5 - Curva viscosidade versus temperatura.....	21
Figura 6 - Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento .....	23
Figura 7 – Fluxograma do programa experimental. ....	29
Figura 8 – Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70 .....	29
Figura 9 – Agregados graúdo (a) brita 19mm; (b) brita 12,5mm .....	30
Figura 10 – Agregados miúdos (a) pó de pedra; (b) cal hidratada .....	30
Figura 11 – Óleo de girassol.....	30
Figura 12 - Agitador mecânico FISATOM .....	31
Figura 13 - Adição do óleo no agitador mecânico.....	32
Figura 14 - Curva Granulométrica dos agregados.....	33
Figura 15 - Curva de viscosidade (a) CAP puro e (b) CAP + 2% óleo de girassol.....	34
Figura 16 – Fluxograma de dosagem Superpave.....	35
Figura 17 – Curva Fuller intermediária faixa B. ....	36
Figura 18 – Etapas Rice Test: (a) bandeja com agregados+CAP soltos; (b) aparelho de Rice.....	37
Figura 19 – Seleção do teor do ligante de projeto .....	38
Figura 20 – Equipamento para ensaio RT – Prensa mecânica .....	39
Figura 21 - Equipamento utilizado no ensaio MR - UTM-25 .....	40
Figura 22 - Asphalt Mixture Performance Tester AMPT.....	42
Figura 23 - Resultados do ensaio RT.....	44
Figura 24 – Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (MR).....	45
Figura 25 – Resultado do ensaio de Lottman .....	47
Figura 26 – Resultado do ensaio FN .....	48

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Valores de viscosidade medidos para os diferentes óleos vegetais em função da temperatura .....	28
Tabela 2 - Características do CAP puro e com óleo .....	32
Tabela 3 - Características dos agregados.....	33
Tabela 4 - Temperaturas de compactação e usinagem do ligante asfáltico puro e com óleo .....	34
Tabela 5-Proporção de agregados a partir da composição granulométrica .....	36
Tabela 6 - Valores de VAM e Vv para os teores de CAP .....	38
Tabela 7 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral .....	43
Tabela 8 - Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) .....	45
Tabela 9 – Valores do ensaio de Resistência à tração .....	46
Tabela 10 – Valores de ensaio de FN .....	48



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAF	Areia Asfalto a Frio
AASTHO	American Association Of State Highway And Transportation Officials
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ASTM	American Society for Testing and Material
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional de Trânsito
CPA	Cimento Poroso de Atrito
CPs	Corpos de provas
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
GEE	Gases do Efeito Estufa
HMA	Hot Mix Asphalt
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
MRAF	Microrrevestimento a frio
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira Registrada
Pa.s	Pascal Segundo
PMF	Pré-misturado a frio
RT	Resistência à tração
RTu	Resistência à Tração condicionado
SC	Solo Cimento
SGC	Superpave Giratory Compactor
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TC	Temperatura de Compactação
TU	Temperatura de Usinagem
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
Vv	Volume de Vazios
WMA	Warm-mix asphalt

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo Geral.....	12
2.2 Objetivos específicos .....	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
3.1 Pavimentos flexíveis .....	13
3.2 Misturas Usinadas .....	15
3.3 Misturas mornas.....	18
3.3.1 Breve histórico.....	18
3.3.2 Vantagens atribuídas às misturas mornas.....	19
3.3.3 Desvantagens atribuídas às misturas mornas .....	19
3.3.4 Influências da temperatura em misturas mornas .....	20
3.3.4.1 Temperaturas de usinagem e compactação .....	20
3.3.4.2 Efeitos negativos da temperatura .....	22
3.3.5 Aditivos utilizados na produção de misturas asfálticas mornas .....	24
3.3.5.1 Asfalto espumado.....	25
3.3.5.2 Aditivos surfactantes.....	25
3.3.5.3 Aditivos orgânicos.....	26
3.3.5.4 Óleo de girassol.....	27
4. METODOLOGIA .....	29
4.1 Materiais .....	29
4.2 Métodos .....	31
4.2.1 Produção do ligante asfáltico modificado com óleo de Girassol .....	31
4.2.2 Caracterização do ligante asfáltico.....	32
4.2.3 Caracterização dos agregados.....	33
4.2.4 Temperatura ótima de usinagem e compactação.....	33
4.2.5 Dosagem superpave.....	34
4.2.6 Caracterização mecânica das misturas asfálticas.....	38
4.2.6.1 Resistência à tração por compressão diametral – RT.....	39

4.2.6.2	Módulo de Resiliência – MR .....	40
4.2.6.3	Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado) .....	41
4.2.6.4	Flow Number.....	41
5.	Resultados e discussões.....	43
5.1	Resistência a Tração (RT).....	43
5.2	Módulo de Resiliência (MR) .....	45
5.3	Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado).....	46
5.4	Flow Number .....	48
6.	CONCLUSÕES.....	50
7.	Referências Bibliográficas .....	52

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, diante de sua grande extensão territorial, apresenta um alto potencial para pavimentação, pois, além de ser responsável por uma parcela significativa de fluxo de cargas e pessoas, apenas alguns trechos de sua malha rodoviária são pavimentados. Segundo a Confederação Nacional de Transporte, CNT (2017), são aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional.

Os pavimentos flexíveis são umas das soluções mais tradicionais utilizadas na construção e recuperação de vias urbanas, vicinais e de rodovias. Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda), mais de 90% das estradas pavimentadas nacionais são de revestimento asfáltico. Estes apresentam em sua composição, basicamente, agregados graúdos, agregados miúdos, filler e ligantes. O uso intensivo de revestimentos asfálticos se dá pelo seu baixo custo, se comparado a outros revestimentos. Bernucci et al (2008), justifica o uso intensivo do revestimento asfáltico pelas vantagens inerentes ao ligante asfáltico. As principais vantagens do ligante asfáltico são: o seu alto poder de adesão aos agregados, promovendo à mistura resistência, durabilidade e impermeabilidade, além de também resistir a ações de ácidos, álcalis e sais.

Em misturas asfálticas convencionais, o ligante asfáltico necessita ser incorporado aos agregados a temperaturas elevadas, para proporcionar o melhor envolvimento das partículas. Porém temperaturas acima de 150 °C proporcionam a emissão de gases nocivos, causando danos, não só a saúde do trabalhador, quanto ao meio ambiente. Como essa modalidade de revestimento é uma grande emissora de gases de efeito estufa (GEE) e diante da adoção do Protocolo de Kyoto, a preocupação com o meio ambiente se tornou enfoque também no setor rodoviário. Segundo Kotlinski (2010), as atividades desenvolvidas pelas diversas áreas da engenharia civil podem gerar grandes impactos ambientais. Além disso, representam uma participação econômica significativa, o que as posicionam, em caráter mundial, como um dos setores estratégicos para incentivar mudanças efetivas que diminuam seu impacto na degradação do planeta.

Em um mundo globalizado, onde a sustentabilidade é assunto de alta relevância, a preocupação com o meio ambiente incentivou o desenvolvimento de pesquisas por materiais alternativos que possam ser usados na pavimentação asfáltica. Diante deste cenário, incentivos vêm sendo feitos na infra-estrutura de transportes a fim de ampliar e recuperar a

malha rodoviária para obtenção de um escoamento de veículos mais eficiente, econômico e que gere menor impacto ambiental.

Dentro deste contexto, surgiram as misturas asfálticas mornas (Warm Mix(es) Asphalt – WMA), que possibilitam a redução de emissões de poluentes e do consumo energético (MOTTA, 2011). As misturas mornas se referem a um grupo de tecnologias que vêm sendo desenvolvidas desde a década de 90, com o intuito de diminuir a temperatura de produção e aplicação em cerca de 30°C ou mais, em relação ao concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), mantendo-se o mesmo comportamento, em termos de resistência, destas últimas (PROWELL e HURLEY, 2007).

Esta pesquisa propõe a fabricação de misturas asfálticas mornas com aditivo oléico (óleo de girassol), com o objetivo de obter uma alternativa de pavimentos flexíveis que apresentem viabilidade técnica e econômica para a sua utilização em camadas de revestimento com menor degradação ambiental.

O óleo de girassol mostra-se promissor para reduzir a viscosidade dos ligantes asfálticos devido as suas características antioxidantes e propriedades tensoativas, reduzindo gastos no processo de usinagem e proporcionando melhores condições de trabalho para os operários. Seguindo esta linha de raciocínio, esta pesquisa busca avaliar dosagem realizada com a redução das temperaturas de usinagem e compactação em 10°C e 20°C da temperatura ótima, com o intuito de compará-las em termos de propriedades mecânicas.

## **2. OBJETIVOS**

Neste tópico serão apresentados os objetivos que se pretende atingir na pesquisa em estudo.

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar os efeitos da redução da temperatura de compactação e usinagem em misturas asfálticas produzidas com adição do óleo de girassol.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a influência da adição do óleo de girassol no CAP 50/70 nas temperaturas de usinagem e compactação;
- Avaliar a influência nas propriedades mecânicas das misturas modificadas, com o óleo de girassol, em temperaturas 10°C e 20°C abaixo da temperatura de referência;
- Verificar a contribuição para o desenvolvimento sustentável na área de pavimentação asfáltica.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

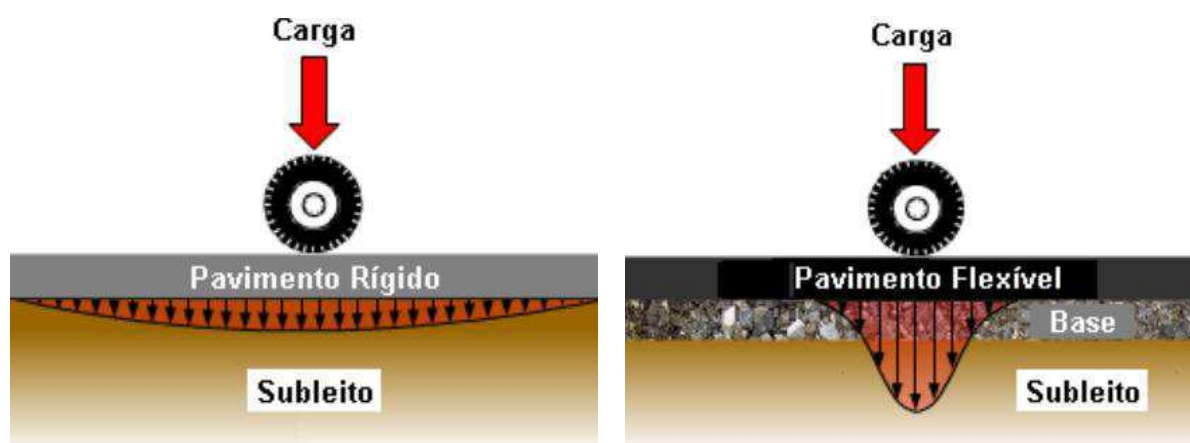
#### 3.1 Pavimentos flexíveis

O pavimento é considerado um espaço semi-infinito composto por diversas camadas delgadas as quais irão suportar as cargas nelas aplicadas durante o tráfego de veículos. Tradicionalmente, os pavimentos rodoviários são classificados em dois tipos: o pavimento rígido e o pavimento flexível.

Pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores, apresentando pouca ou nenhuma deformação com a aplicação de carregamentos. Segundo Balbo (2007), os pavimentos rígidos apresentam a característica de que a camada de revestimento absorve grande parcela dos esforços horizontais solicitantes, causando redução nas pressões verticais, sendo essas bem distribuídas nas camadas inferiores, como mostra a Figura 1 (a).

Já nos pavimentos flexíveis toda a estrutura sofre deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalente entre as camadas, como mostrado na Figura 1 (b). Balbo (2007) demonstra que, os esforços são dissipados entre as várias camadas, apresentando tensões verticais em camadas inferiores, concentradas na região próxima de onde a carga foi aplicada. A estrutura de um pavimento flexível é formada por quatro camadas principais: revestimento de base asfáltica, base, sub-base e reforço do subleito.

Figura 1 - Distribuição de Esforços / aplicação.



(a) Pavimento rígido

(b) Pavimento flexível

As camadas que podem constituir o pavimento são:

- Subleito – É o solo local de fundação do pavimento, muitas vezes nem sendo referenciado como uma camada do pavimento.
- Leito – Camada ligeiramente tratada de solo local, geralmente compactada e regularizada através do serviço de terraplanagem;
- Camada de reforço do subleito – Camada imediatamente acima do leito. Sendo uma camada de solo local reforçada com a adição de algum material de qualidade superior ou agente modificador. Essa camada se torna necessária em casos onde o subleito apresenta baixa qualidade, ou seja, apresenta baixa resistência ao carregamento a que será atribuído;
- Camada de sub-base – Camada diretamente acima do leito ou da camada de reforço do subleito. Essa camada é geralmente atribuída em caso onde a camada de base seria demasiadamente espessa ou onerosa. Sendo utilizada para reduzir a espessura da camada de base, diminuindo assim os gastos com esta camada. Por ser constituída por materiais de menor qualidade, se comparado a camada de base, se torna um ardil econômico eficaz;
- Camada de base – Camada imediatamente abaixo a camada de revestimento, podendo estar sobre as demais camadas já descritas. A camada de base possui uma maior função estrutural que as demais subjacentes a ela, sendo ela responsável por receber o carregamento excedente da camada de rolamento e transmitindo as demais camadas. Em geral, os materiais utilizados nessa camada apresentam melhor qualidade se comparado aos materiais utilizados nas camadas inferiores, sendo comum a utilização de materiais granulares com melhor desempenho e resistência. Podem ser citados como exemplos tipos usados nessa camada a brita graduada simples (BGS), brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo cimento (SC), entre outros;
- Camada de revestimento ou de rolamento – camada superficial do pavimento e impermeável. Sendo ela responsável por receber diretamente o carregamento, assimilando a maior parte da carga e distribuindo para as camadas inferiores o excedente.

Vale a observação que o pavimento pode ser composto por todas as camadas citadas ou uma variação delas, tudo dependendo da funcionalidade do pavimento.

O presente trabalho apresenta suas análises voltadas para a camada de revestimento do pavimento, sendo avaliados os pavimentos flexíveis. Tal especificidade se torna necessária



devido a malha rodoviária pavimentada brasileira ser constituída, em sua grande maioria, por pavimentos flexíveis.

### 3.2 Misturas Usinadas

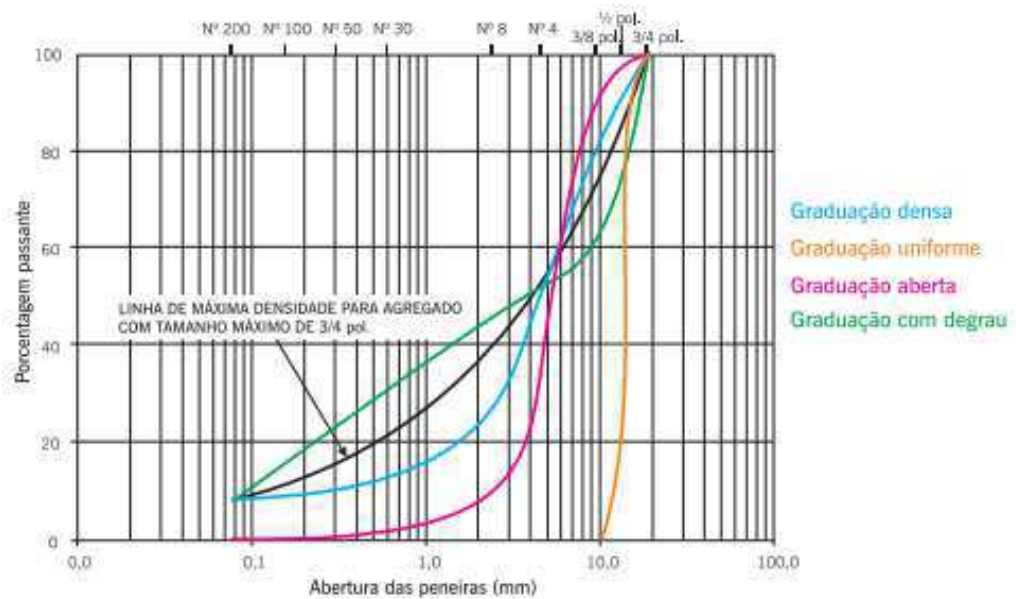
As misturas usinadas são compostas por agregados minerais uniformemente revestidos com cimento de asfalto, asfalto emulsionado ou asfalto reduzido (ASPHALT HANDBOOK, 2000). Estas proporcionam à pista de rolamento “[...] impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego do local” (BERNUCCI, 2008).

As misturas usinadas podem ser classificadas quanto à distribuição granulométrica em:

- Graduação densa: apresenta uma curva granulométrica contínua e bem graduada, com a grande parte de espaços vazios preenchidos por grãos de pequenas dimensões, tendo como exemplo o concreto asfáltico;
- Graduação uniforme: trata-se de uma faixa estreita na curva granulométrica que é bastante íngreme, onde os grãos apresentam dimensões uniformes;
- Graduação aberta: por não apresentar quantidade considerável de agregado miúdo, fíler e ligante para preencher os espaços vazios e ter uma granulometria uniforme. Estas misturas apresentam cavidades cheias de ar entre os grãos, os quais funcionam como áreas drenantes, facilitando a percolação da água. Um exemplo a ser citado é o revestimento asfáltico drenante (CPA);
- Graduação com degrau: os grãos de maiores dimensões apresentam-se em quantidade dominante, dando maior resistência à deformação permanente devido ao maior contato entre os grãos graúdos. Por apresentar espaços vazios sem preenchimento de material, têm-se uma microdrenagem. Exemplo: Stone matrix asphalt (SMA).

As Figuras 2 e 3 representam as curvas granulométricas de agregados utilizados em misturas asfálticas e a composição de um corpo de prova com as camadas de revestimento utilizadas, respectivamente.

Figura 2 - Representação de curvas granulométricas



Fonte: Bernucci et. al., 2008

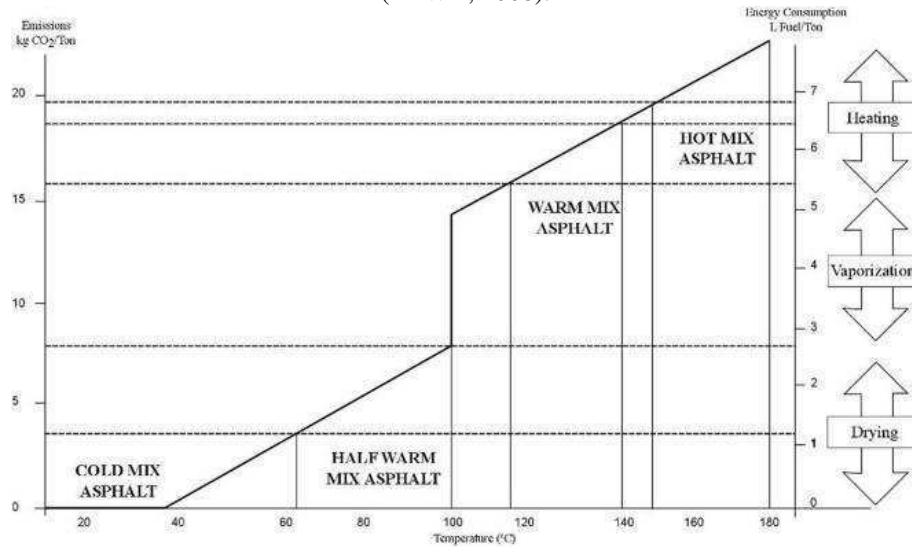
Figura 3 - Corpo de prova com as camadas de revestimento utilizadas



Fonte: Bernucci et. al., 2008

Os diferentes tipos de misturas asfálticas também 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). Na Figura 4 consta ilustração esquemática das misturas de acordo com a temperatura de produção.

Figura 4 - Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem adaptado de (FHWA, 2008).



Fonte: Costa e Benta, 2016.

As misturas asfálticas a frio são executadas em baixas temperaturas, entre 20 e 50°C, porém possuem uma qualidade inferior às misturas a quente, em termos de desempenho mecânico. Normalmente se restringem aos revestimentos de pavimentos de baixo ou médio volume de tráfego ou às camadas intermediárias (BERNUCCI et al., 2008; ASPHALT INSTITUTE, 2007), podendo ser utilizados também para recapeamento, operações de conservação e manutenção. Exemplos de misturas a frio são o pré-misturado a frio (PMF), microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF), areia asfalto a frio (AAF), tratamentos superficiais, entre outros.

As misturas asfálticas convencionais à quente são produzidas através da associação de materiais granulares com ligantes asfálticos, em temperaturas em torno de 150°C a 180°C. Entre a temperatura de produção de misturas a quente e a temperatura utilizada nas misturas a frio são produzidas as misturas mornas e semimornas. A diferença entre estas duas misturas é que esta última é produzida a temperatura menor ou igual a 100°C (NELSON FILHO, 2013).

As misturas à quente são bastante utilizadas nos serviços de pavimentação de tráfego pesado por possuírem uma alta resistência e durabilidade adquiridas no processo de mistura, que permite um arranjo ideal entre partículas e englobamento com o ligante asfáltico. Nakahara (2010) justifica a utilização de temperaturas elevadas devido à necessidade de secagem dos agregados, permitindo que a mistura alcance as condições de trabalhabilidade necessária, além de fornecer tempo suficiente para a compactação desta mistura em campo.

Sabe-se que as altas temperaturas têm efeito negativo sobre o asfalto e são capazes de causar alterações reológicas substanciais no ligante, levando a um aumento de sua rigidez

(MOTTA, 2011). Quando o ligante é mantido em temperaturas acima de 150°C, mesmo que por tempos relativamente curtos (menores que um minuto, como ocorre na usinagem), pode sofrer envelhecimento significativo com a exposição ao ar e a perda de voláteis.

Diante desse entrave, nas últimas décadas, foram desenvolvidas, tanto na Europa quanto nos EUA, pesquisas buscando tecnologias que obtivessem temperaturas intermediárias para produção de misturas asfálticas sem comprometer as características técnicas do pavimento para as condições de tráfego exigidas. As misturas mornas apresentam grande potencial para alcançar este objetivo.

### **3.3 Misturas mornas**

As misturas asfálticas mornas são produzidas entre temperaturas em torno de 20 a 55°C inferiores a temperatura de referência. Elas surgiram diante de uma necessidade de criar misturas asfálticas com resistência e durabilidade no mínimo equivalentes ou superiores às das misturas asfálticas a quente, mas em temperaturas que não degradem o ligante asfáltico, diminuindo as emissões e os impactos sobre os operários (NEWCOMB, 2007).

#### **3.3.1 Breve histórico**

Os primeiros relatos de possibilidade na diminuição de temperatura de misturas asfálticas foram feitos em 1956, quando o Dr. H. Ladis Csanyi percebeu o potencial do asfalto espumado como camada selante em solos. Desde então, a tecnologia do asfalto espumado que permitem a diminuição das temperaturas de misturas é usada com muito sucesso em diversos países (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

Posteriormente, em 2000, na 1ª Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos, foi apresentado por Harrison e Christodulaki, o método de produção de misturas mornas com espuma de asfalto, a qual foi testada em laboratório e em campo, tendo seus resultados expostos no Congresso Eurobitume, no mesmo ano. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois contribuíram para redução das emissões de fumos, CO<sub>2</sub> e poeira, além de economia de energia de 20 a 30% e de apresentarem bom desempenho mecânico (OLIVEIRA et al., 2014).

A partir de 2002, a National Asphalt Pavement Association (NAPA), após visitas em países europeus onde foram aplicados os trechos experimentais com asfalto espuma, juntamente com a Federal Highway Administration (FHWA) designou as misturas mornas como área em foco e decidiram explorar o potencial de sua utilização nos Estados Unidos.

Em 2004, no “World of Asphalt” foram apresentados projetos e desenvolvimentos nesta área por diversas empresas e entidades rodoviárias. Desde então, nos Estados Unidos e na Europa, não mais se parou de estudar as vantagens da tecnologia de produção de misturas mornas (FERREIRA, 2009).

### **3.3.2 Vantagens atribuídas às misturas mornas**

Sales (2015) aponta como os principais benefícios da mistura morna a redução de energia na produção de misturas asfálticas, necessária para alcançar temperaturas que permitam atingir a viscosidade ideal do ligante para envolver adequadamente os agregados, boa trabalhabilidade e fácil compactação são benefícios diretos e imediatos das misturas asfálticas mornas. Penz (2010) reúne e sumariza os principais benefícios das misturas mornas, destacando:

- Redução do envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação, preservando a sua resposta elástica, retardando o processo de fissuração dos revestimentos asfálticos;
- Melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica e otimização da compactação;
- Redução do consumo de combustível da usina em até 30%;
- Diminuição significativa de gases poluentes;
- Redução da exposição dos trabalhadores aos fumos e odores, melhorando as condições de trabalho;
- Aumento da distância de transporte de massa asfáltica;
- Abertura do tráfego mais rápida sobre a mistura asfáltica recém-compactadas;
- Possibilidade de utilização de um volume maior de material de fresagem quando se usa em reciclagem.

### **3.3.3 Desvantagens atribuídas às misturas mornas**

Contudo, toda modificação introduzida na preparação das misturas asfálticas acarreta alteração no comportamento mecânico do material que deve ser cuidadosamente estudado para avaliar a sua viabilidade técnica e econômica. Diante de uma variedade de produtos, composições e processos de fabricações distintos, devem-se ter certos cuidados quanto ao uso de misturas asfálticas mornas. Zaumanis (2010) elenca alguns deles como principais:

- Trincamento precoce, devido à água residual aprisionada na mistura, podendo prejudicar a adesão entre ligante e agregados;
- Dados insuficientes e inexistência de normas reguladoras que possam ser parâmetros para limitar produtos e técnicas utilizadas;
- Incógnita sobre as reais reduções de custos das técnicas empregadas nas produções.

### **3.3.4 Influências da temperatura em misturas mornas**

Para um pavimento atingir um desempenho esperado, deve-se ter um controle tecnológico de uso e manuseio dos materiais empregados no momento de sua execução. A temperatura é um fator determinante no comportamento do material betuminoso e de acordo com Gama (2013), sua susceptibilidade térmica possui grande importância, pois define seus estados físicos e de consistência.

#### **3.3.4.1 Temperaturas de usinagem e compactação**

Os ligantes asfálticos são materiais que variam seu estado físico de acordo com a variação de temperatura. Segundo Bernucci (2008), são denominados termoplásticos, pois são semissólidos à temperatura ambiente e a medida que a temperatura aumenta, o ligante asfáltico se torna líquido. O aquecimento do ligante asfáltico é necessário, pois em estado fluido, ele permite uma maior trabalhabilidade da mistura de forma a mantê-la mais homogênea e conseqüentemente, com melhor englobamento deste aos agregados, acarretando ganho de resistência ao pavimento.

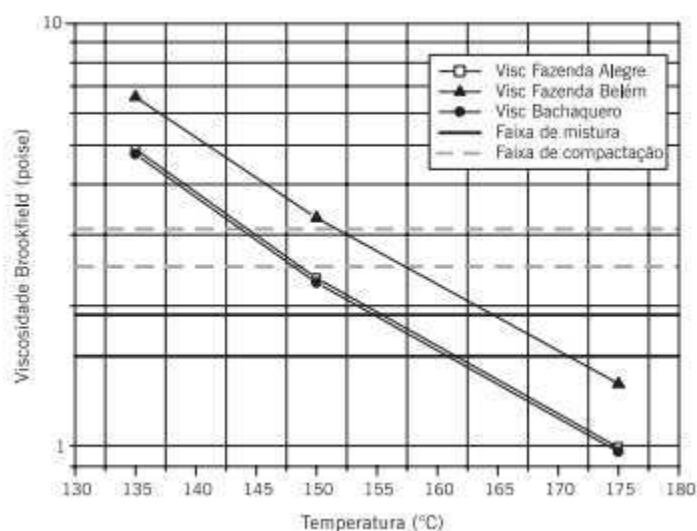
Sendo a viscosidade dos ligantes asfálticos função da temperatura, ou seja, ao se elevar a temperatura se reduz a viscosidade, adotam-se temperaturas de mistura e compactação para cada tipo de ligante asfáltico tomando como base faixas de viscosidade indicadas para mistura e compactação (SINICESP, 2012). As temperaturas de usinagem (TU) e de compactação (TC) são de suma importância durante essas etapas da construção dos revestimentos e, por sua vez, corroboram com o bom desempenho do revestimento aplicado.

As etapas de mistura ligante-agregado e compactação são regidas pelas viscosidades ideais. A viscosidade ideal para a mistura é aquela que permite que o ligante asfáltico envolva totalmente os materiais pétreos que fazem parte da mistura sem deixá-los sem envolvimento,

seja pela baixa viscosidade ou pela elevada viscosidade. Após a mistura, o material é encaminhado até o local da execução da obra, onde é lançado e compactado a uma temperatura específica, denominada temperatura de compactação. Segundo CINICESP (2013), a viscosidade ideal de compactação é aquela na qual a mistura asfáltica, ao ser compactada, não sofra escorregamento pela ação dos rolos compactadores e permita a compactação ideal da mistura com a consequente obtenção do Volume de Vazios (Vv) preconizado na dosagem da mistura asfáltica.

Essas características das misturas asfálticas, temperaturas de usinagem e compactação, são regidas pelo tipo de ligante asfáltico utilizado. Dessa forma se faz necessário conhecer as viscosidades ideais de mistura e compactação para cada tipo de ligante. Bernucci (2008) explana que a escolha das temperaturas de usinagem e compactação é feita a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante. Segundo o mesmo autor, a partir de um intervalo em que a viscosidade deve estar situada,  $0,17\pm 0,02$  Pa.s e  $0,28\pm 0,03$  Pa.s encontram-se as temperaturas de usinagem e compactação, respectivamente. A Figura 5 apresenta a curva viscosidade versus temperatura citada.

Figura 5 - Curva viscosidade versus temperatura



Fonte: Bernucci (2010)

É de grande importância que as temperaturas de transporte, estocagem e usinagem sejam respeitadas para cada tipo de ligante asfáltico, objetivando, dessa forma, que o produto apresente seu desempenho ideal e, por consequência, que o revestimento tenha boa qualidade e durabilidade, evitando os efeitos de craqueamento e oxidativos impostos à mistura asfáltica.

### 3.3.4.2 Efeitos negativos da temperatura

Atualmente um dos grandes desafios da pavimentação é reduzir o envelhecimento do ligante asfáltico durante todo o seu ciclo de aplicação. Deste modo, a redução da temperatura nas misturas mornas e semimornas poderiam levar a um menor enrijecimento do ligante, tornando-o mais flexível e resistente a trincas por fadiga em vida de serviço (NEWCOMB, 2006, PROWELL e HURLEY, 2007).

A etapa de usinagem, no processo de produção das misturas asfálticas é responsável pela parcela significativa no envelhecimento do ligante asfáltico, sendo capaz de alterar suas características físicas, químicas e reológicas que causam alteração na sua consistência. De acordo com Motta (2011), o aquecimento no processo de usinagem de misturas a quente tem três objetivos:

- Secagem dos agregados pétreos, a fim de evitar futuros problemas de efeito *stripping*;
- Manutenção da temperatura da mistura asfáltica, aquecendo os agregados pétreos em temperaturas 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante, para manter o asfalto fluido na fase de recobrimento;
- Redução da viscosidade do asfalto, para melhor trabalhabilidade da mistura.

A temperatura influencia diretamente na qualidade do asfalto, com isso, para reduzir o efeito do envelhecimento, a temperatura de manuseio à aplicação deve ser a mais baixa possível. D'Angelo et al. (2008) descrevem também que as emissões de poluentes nas usinas de produção de misturas mornas chegam a redução de 30 a 40% de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, 50% de compostos orgânicos voláteis (VOC), 10 a 30% de monóxido de carbono (CO), 60 a 70% de óxidos nitrogenados NO<sub>x</sub> e 20 a 25% de poeiras.

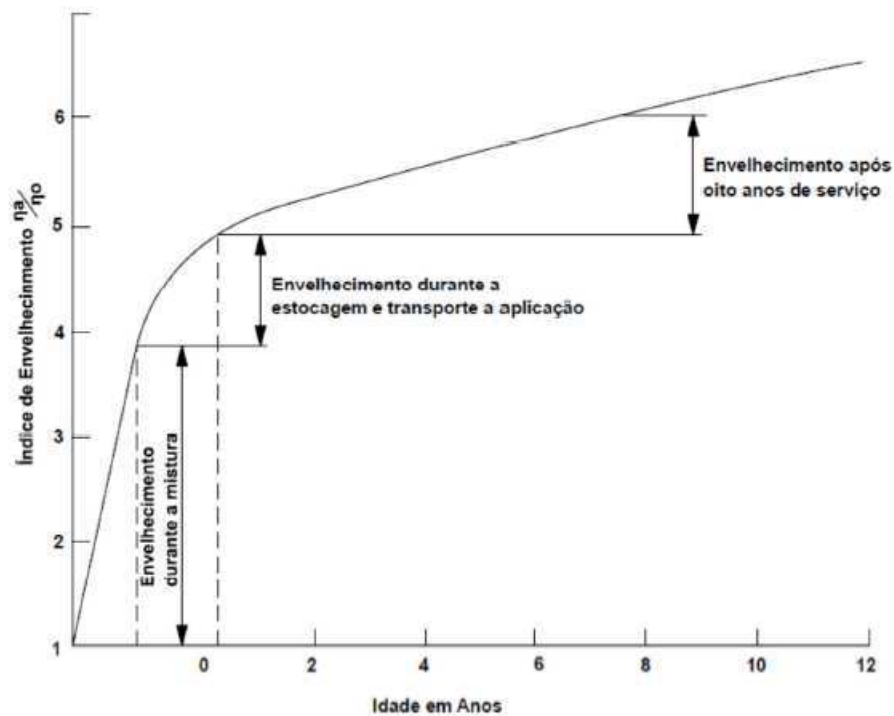
O processo de envelhecimento do ligante se inicia durante a produção da massa asfáltica em usina com a perda de voláteis e oxidação (envelhecimento de curto prazo) e continua em campo com a oxidação progressiva (envelhecimento de longo prazo) (AIREY, 2003). O envelhecimento do ligante asfáltico é caracterizado por alguns fatores sendo eles: aumento da viscosidade e ponto de amolecimento, além da diminuição da penetração.

Whiteoak (1990) fez uma relação entre o índice de envelhecimento e a idade em anos do pavimento. Utilizou-se da razão entre a viscosidade em uma dada condição de envelhecimento e a viscosidade inicial do ligante asfáltico para representar o índice citado.



Na Figura 6, observa-se que o envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em três etapas, sendo a primeira delas responsável por cerca de 60% do envelhecimento total sofrido pelo ligante. Durante a usinagem, a mistura asfáltica é submetida a altas temperaturas durante um curto período de tempo. Juntamente com a existência de uma superfície específica elevada do cimento asfáltico de petróleo (CAP) que recobrem os agregados, estes fatos contribuem para o envelhecimento acelerado do ligante. Esta etapa é denominada de “envelhecimento de curto prazo” a qual cerca de 80% do envelhecimento ocorre antes da efetiva utilização do pavimento e degradação do ambiente sobre ele. O controle tecnológico é de grande importância já que em temperaturas muito elevadas pode haver o envelhecimento precoce da mistura.

Figura 6 - Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento



Fonte: Whiteoak, 1990

O envelhecimento de curto prazo é decorrente da usinagem, transporte, distribuição e compactação da mistura asfáltica na pista. Este envelhecimento pode se dá através de diversos mecanismos, sendo os principais: oxidação, perda de voláteis, endurecimento físico e endurecimento exsudativo. Como outras substâncias orgânicas, o ligante asfáltico oxida lentamente quando em contato com o ar. Os grupos polares oxigenados tendem a associar-se, formando micelas de alto peso molecular e graças a isso ocorre um aumento da viscosidade

do ligante asfáltico. Estas transformações geradas resultam em moléculas maiores e mais complexas que fazem o ligante asfáltico endurecer e ficar menos flexível (TONIAL, 2001).

O grau de oxidação é altamente dependente da temperatura, onde sua taxa dobra a cada 10°C de aumento na temperatura do ligante acima dos 100°C. Dependendo da temperatura e condição de exposição, alguns componentes do ligante asfálticos podem ser perdidos por evaporação por serem bastante voláteis. Tonial (2011) concluiu ainda que quanto maior a temperatura e o tempo de exposição da mistura a temperaturas elevadas, maior será seu envelhecimento e sugeriu que fossem respeitados os tempos de exposição das misturas devido a sua temperatura.

### **3.3.5 Aditivos utilizados na produção de misturas asfálticas mornas**

As misturas asfálticas mornas têm recebido atenção crescente por utilizar aditivos ou modificadores das propriedades físicas e reológicas dos asfaltos. Com o uso de uma tecnologia diferencial, as misturas asfálticas são capazes de atingir temperaturas mais baixas nos processos de usinagem e compactação sem comprometer suas características mecânicas. Budny (2012) afirma que o uso de aditivos, asfalto espumado, zeólitas, dentre outras tecnologias têm o intuito de melhorar as condições de trabalho dos operadores nas usinas, gerar maiores lucros e menores danos ambientais. A escolha da tecnologia a ser utilizada varia de acordo com as características desejadas a serem adquiridas ou melhoradas nas misturas asfálticas.

Segundo D'Angelo et al. (2008), as misturas asfálticas mornas podem ser classificadas em dois tipos: as que usam água e as que usam alguma forma de aditivo orgânico ou cera para a redução da temperatura. A água em contato com o asfalto quente se transforma em vapor expandindo o asfalto e diminuindo a viscosidade da mistura. A diminuição da viscosidade de misturas com inserção de aditivos orgânicos acontece quando o ponto de derretimento da cera é atingido.

Dentre os aditivos, os mais utilizados são: aditivos orgânicos ou ceras, aditivos surfactantes e espumejo de asfalto. Eles podem ser adicionados diretamente no ligante, contribuindo para o menor envelhecimento deste, ou durante o processo de mistura, com a redução da temperatura dos agregados para que a usinagem ocorra à temperatura mais baixa. Porém a utilização de aditivos e a redução da temperatura deve ter alto controle tecnológico, pois a baixa viscosidade e o excesso de aditivo podem enrijecer a mistura, causando problemas de deformação permanente e trincamento por baixas temperaturas.

### 3.3.5.1 Asfalto espumado

O processo de formação de espuma ocorre por meio da introdução de pequenas quantidades de água no asfalto quente, seja por meio de injeto de formação de espuma ou um material hidrófilo, tais como zeólita, ou agregado úmido. Ao entrar em contato com o asfalto quente a água se dispersa e se transforma em vapor, resultando em uma expansão da fase aglutinante e redução da viscosidade da mistura. Dependendo do tipo de tecnologia utilizada é possível reduzir a temperatura de usinagem em até cerca 50°C (MOTTA, 2011).

O uso de espumejo do asfalto é uma técnica antiga, descoberta em 1956, pelo professor Ladis Csanyi da Iowa State University. Ele injetava o vapor de água no ligante para diminuir a viscosidade da amostra. Em 1968, a Mobil Oil Australia, com aquisição da patente do professor começou a injetar água fria ao asfalto, tornando o processo mais ágil e prático. Desde então a tecnologia dos asfaltos espumados que permitem a diminuição das temperaturas de misturas é usada com muito sucesso em diversos países (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

Algumas tecnologias utilizam as zeólitas para produção do efeito de espuma, pois cerca de 20% de sua estrutura é formada por água. Segundo Motta (2011) as zeólitas apresenta um custo benefício favorável por não necessitar de mudanças significativas na planta da usina, já que sua introdução é feita de modo manual, sobressaindo-se comparada com outros métodos de formação de espuma de asfalto.

Ayres (2006) estudou a produção e caracterização mecânicas das misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas e verificou a redução de 20°C nas temperaturas de usinagem e compactação. Essa redução se deu devido a capacidade das zeólitas de armazenarem água no interior de seus poros, que quando aquecida, a água forma uma micro-espuma a qual se expande e diminui a viscosidade da mistura. O autor ainda afirma ainda que toda a produção ocorre sem comprometer as propriedades mecânicas desejáveis.

### 3.3.5.2 Aditivos surfactantes

Diferentemente dos aditivos orgânicos, os aditivos surfactantes não modificam as propriedades reológicas do ligante. Eles agem na interface agregado/ligante com a capacidade de melhorar o cobrimento, a adesividade e a trabalhabilidade do ligante asfáltico a menores

temperaturas (MOTTA, 2011). Dependendo da tecnologia utilizada, os aditivos surfactantes chegam a reduzir a temperatura da mistura em até 40°C, a depender da tecnologia utilizada (Cecabase RT<sup>®</sup>, Evotherm<sup>™</sup>, Rediset<sup>™</sup> WMX).

O uso de Rediset<sup>™</sup> WMX possui características antioxidantes que diminui o envelhecimento do ligante, além de melhorar a adesividade com os agregados. Pois ele permite uma redução superior a 30°C na temperatura de produção. Segundo Pereira (2010), o seu uso nas misturas asfálticas com 1% de aditivo apresentou melhor desempenho para redução da temperatura em torno de 120°C, já que para teores maiores de aditivo, a estabilidade se reduziu.

O Cecabase RT<sup>®</sup> é um aditivo surfactantes composto por agentes tensoativos e segundo Cavalcanti e Ferreira (2009) pode reduzir a temperatura de trabalho em até 50°C. Pereira (2010) verificou que o aditivo tem maior desempenho para a mistura quando adicionado em um teor de 0,15%, não apresentando diferenças quanto a recuperação elástica dos ligantes comparativamente às misturas sem aditivos.

Outro benefício que vem se mostrando de grande valia na produção de misturas asfálticas mornas é a redução, ou até mesmo eliminação, dos agentes tradicionais promotores de adesividade, quando do uso de aditivos surfactantes. A otimização da equipe de compactação, a melhora do ambiente de trabalho para as equipes de pavimentação e a otimização dos custos operacionais seguramente explicam o crescimento do uso dessa tecnologia.

### 3.3.5.3 Aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos atuam na redução da viscosidade, modificando a curva viscosidade *versus* temperatura, e assim, permitindo a redução da temperatura em cerca de 30 a 40°C. Quando submetidos a temperaturas acima do seu ponto de amolecimento, estes aditivos interferem nas propriedades do ligante, fazendo com que haja diminuição da viscosidade deste último (MOTTA, 2011). Com o resfriamento da mistura asfáltica, estes tipos de aditivos se cristalizam de modo disperso no ligante, aumentando a rigidez da mistura asfáltica e, por consequência, obtendo maior resistência para a mistura.

Silva et al. (2010), em ensaios com misturas mornas com ceras sintéticas, comprovaram a melhoria do comportamento a fadiga destas misturas quando comparadas as convencionais. Obtiveram inicialmente resultados de penetrações similares quando comparados aos ligantes usuais com penetrações 50-70, 30-45, 10-20. Porém quando o CAP 160/220 com 6% de

aditivo foi comparado com o CAP 50-70 a melhoria no comportamento quanto à fadiga foi considerável, pois este apresentou um melhor resultado devido ao menor envelhecimento que sofreu na usinagem.

Os óleos apresentam potencial para ser empregado como aditivos na produção de misturas asfálticas mornas devido às características antioxidantes e propriedades tensoativas. No Brasil, diversas pesquisas vêm estudando a adição de óleos nas misturas mais intensamente nos últimos anos. O êxito apresentado na redução das temperaturas de compactação e usinagem através da alteração das viscosidades das misturas mornas torna-se um grande incentivo para que as pesquisas se intensifiquem e consolidem a tecnologia com estes aditivos.

Portugal (2016) estudou a viabilidade física e reológica da substituição parcial do ligante asfáltico pelo óleo de milho novo e residual. Como resultado, comprovou os benefícios ambientais e econômicos deste aditivo, sem comprometer, no entanto, o desempenho mecânico das misturas asfálticas. Constatou também que a adição dos óleos promove diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Souza (2012) estudou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com o CAP modificado com óleo de mamona. Este aditivo reduziu a temperatura em cerca de 8°C, podendo então ser utilizado como “aditivo verde”, pois produziu um menor impacto ambiental.

Lucena et al. (2016) pesquisaram o uso do óleo de moringa e as possíveis mudanças de propriedades de consistência das misturas asfálticas mornas. Os resultados mostraram que a adição deste aditivo com uma dosagem entre 0,5% a 1% em relação ao peso do CAP ocasionou uma redução em torno de 5°C nas temperaturas de usinagem e compactação.

#### 3.3.5.4 Óleo de girassol

O óleo de girassol é extraído da semente da planta cujo nome científico é *Helianthus annuus*. Segundo VERSLYPE (2015) a cultura do girassol é relativamente recente no Brasil, tendo sua produção mundial aumentada significativamente nos últimos 20 anos. O girassol apresenta características agrônômicas vantajosas para os produtores brasileiros, pois seu ciclo de plantio é curto, em torno de 130 dias, permitindo que assim a extração do óleo através das sementes seja rápida e em larga escala. De acordo com VERSLYPE (2015), o óleo de girassol

é responsável por 16% da produção mundial de óleo e representa a terceira cultura anual com maior produção no mundo.

Os óleos de girassol apresentam-se em estado líquido à temperatura ambiente e possuem baixos pontos de fusão. Dentre os óleos vegetais comestíveis, o óleo de girassol é aquele que apresenta, em sua composição, o maior percentual de ácidos graxos poliinsaturados, principalmente o ácido linoleico. Atingindo temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento os óleos apresentam grande potencial para reduzir a viscosidade da mistura, reduzindo assim a temperatura necessária para usinagem. A Tabela 1 apresenta os valores de viscosidades medidos para os diferentes óleos vegetais em função da temperatura.

Tabela 1 - Valores de viscosidade medidos para os diferentes óleos vegetais em função da temperatura

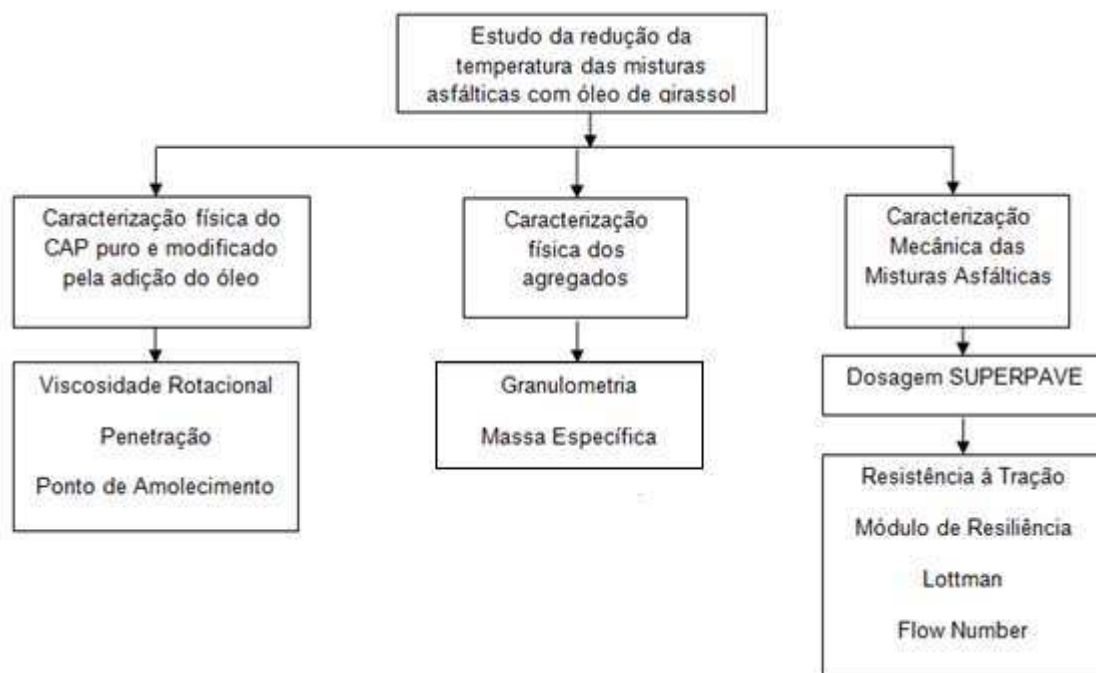
T(°C)	Viscosidade (mPa.s)						
	Soja	Milho	Girassol	Arroz	Algodão	Oliva	Canola
20	59	67,6	58,3	73,8	67,7	79,7	73,1
30	41,2	47,4	41,3	50,5	47,3	55,4	50,5
40	29,5	32,3	29,1	34,3	33,4	37,8	35,6
50	22,3	24,8	21,3	24,5	24,6	26,2	25,2
60	16,7	18,5	16,4	19,2	18	21,4	19,1
70	12,6	14	12,6	14,2	14	14,9	14,5

(BROCK et al.,2008)

## 4. METODOLOGIA

No fluxograma da Figura 7 está apresentado o programa experimental desenvolvido durante a pesquisa. Podem-se verificar os métodos empregados para a realização dos ensaios de caracterização física dos materiais e mecânica das misturas asfálticas.

Figura 7 – Fluxograma do programa experimental.



### 4.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram:

- Ligante asfáltico: CAP 50/70, cedido pela construtora Rocha Cavalcante Ltda, sendo o tipo de ligante asfáltico mais utilizado na região Nordeste. Na Figura 8 é possível verificar uma imagem do CAP 50/70;

Figura 8 – Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70



- Agregados:

- Graúdos: Brita 19 mm e Brita 12,5 mm, de origem granítica (Figura 9).

Figura 9 – Agregados graúdo (a) brita 19mm; (b) brita 12,5mm



(a)



(b)

- Miúdo Pó de pedra e como filler a cal, obtidos no comércio local (Figura 10).

Figura 10 – Agregados miúdos (a) pó de pedra; (b) cal hidratada



(a)



(b)

- Aditivo verde: O óleo de girassol da marca Liza, adquirido no comércio local (Figura 11).

Figura 11 – Óleo de girassol





## 4.2 Métodos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

### 4.2.1 Produção do ligante asfáltico modificado com óleo de Girassol

Na produção da mistura ligante-óleo foi utilizada um agitador mecânico de baixo cisalhamento da marca FISATOM, modelo 722D, ver Figura 12. O teor do óleo foi determinado com base nos resultados encontrados em pesquisa realizada por Régis (2018).

Figura 12 - Agitador mecânico FISATOM



Inicialmente o CAP foi levado à estufa em uma temperatura em torno de 120°C para permitir melhor fluidez e trabalhabilidade durante a mistura. Após um período de 1 hora, o CAP foi retirado da estufa e colocado dentro de um béquer, o qual foi inserido no misturador mecânico. O ligante permaneceu no aparelho até alcançar temperatura de 135°C e então, o óleo, com teor de 2%, pôde ser adicionado, conforme demonstrado na Figura 13. Essa mistura ficou 20 minutos no misturador, com rotações em torno de 400 rpm, a fim de estabilizar-se, e em seguida, reservado em local seguro, para posterior utilização.

Figura 13 - Adição do óleo no agitador mecânico



#### 4.2.2 Caracterização do ligante asfáltico

Os ensaios de caracterização do ligante asfáltico puro e com adição de óleo seguiram as normas apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Características do CAP puro e com óleo

Atributos	Ligante puro	+2% óleo de girassol	Procedimento
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	64,6	105,14	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento, °C	45	41,5	DNIT 131/2010-ME
Viscosidade Rotacional a 135°C, cP	378,75	316,25	
Viscosidade Rotacional a 150°C, cP	189,50	161,50	ASTM D 4402
Viscosidade Rotacional a 177°C, cP	69,50	61,50	

A consistência do ligante asfáltico é tanto maior quanto menor for a profundidade medida. Analisando os dados, verifica-se que a penetração para o CAP com 2% de óleo foi maior quando comparada ao CAP puro, pois houve uma diminuição na consistência do ligante a 25°C. O ponto de amolecimento teve um decaimento para misturas com óleo de girassol, já que sua viscosidade diminuiu e conseqüentemente este comportamento era esperado. A viscosidade rotacional determina a resistência ao escoamento do ligante asfáltico, observa-se que houve uma diminuição nas misturas com óleo, o que proporciona reduções nas temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

### 4.2.3 Caracterização dos agregados

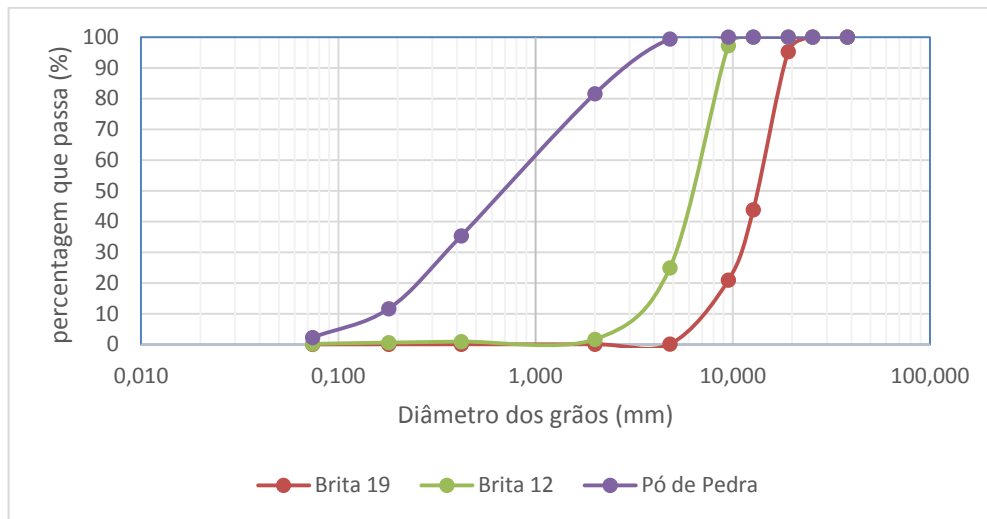
A Tabela 3 apresenta a caracterização dos agregados que foram utilizados nas misturas asfálticas nesta pesquisa.

Tabela 3 - Características dos agregados

Atributos	Brita 19	Brita 12,5	Pó de pedra
Massa específica real, g/cm <sup>3</sup>	2,63	2,58	2,4
Massa específica aparente, g/cm <sup>3</sup>	2,7	2,75	2,37

A Figura 14 apresenta graficamente a composição granulométrica dos materiais utilizados nessa pesquisa.

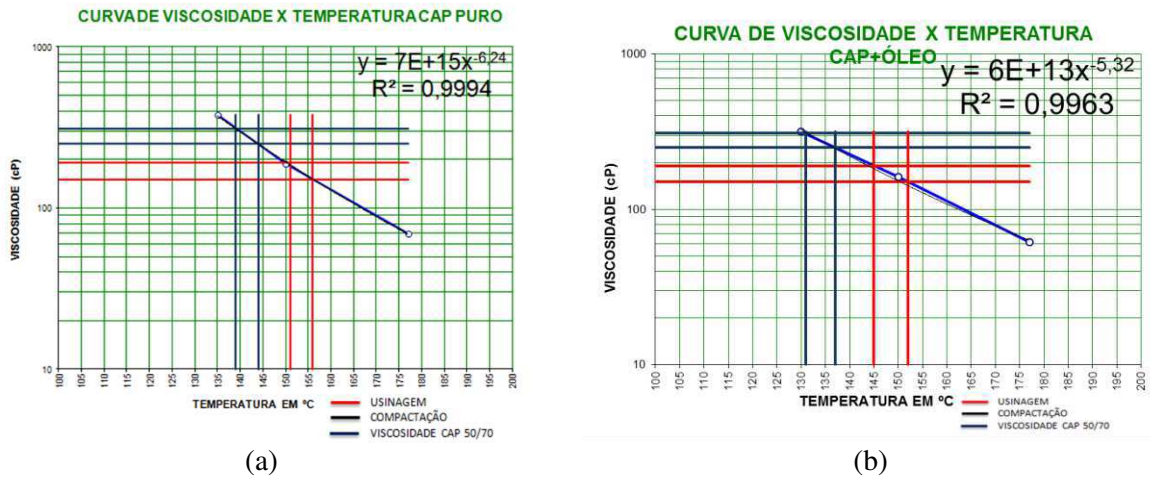
Figura 14 - Curva Granulométrica dos agregados.



### 4.2.4 Temperatura ótima de usinagem e compactação

Através da curva logarítmica viscosidade *versus* temperatura, encontram-se as temperaturas em que vão ocorrer os processos de usinagem e compactação das misturas. Para a viscosidade de 0,17 Pa.s encontrou uma temperatura de usinagem e para 0,28 Pa.s, temperatura de compactação. Na Figura 15 estão representadas as curvas de viscosidade para as amostras ensaiadas para cada ligante, puro ou com óleo, respectivamente.

Figura 15 - Curva de viscosidade (a) CAP puro e (b) CAP + 2% óleo de girassol



Com a adição de óleo, a viscosidade das misturas diminui, tendo os pontos de usinagem e compactação com temperaturas mais amenas, como apresentado na Tabela 4. Com a preocupação no rendimento do pavimento asfáltico e na tentativa de manter um comportamento mecânico aceitável, dentro de limites estabelecidos por normas, foi realizada uma diminuição das temperaturas em 10° e 20°C em relação à temperatura ótima. Já que um dos grandes problemas do ligante asfáltico é dado pelo seu endurecimento (BUDNY, 2011), deixando-o mais frágil e menos elástico.

Tabela 4 - Temperaturas de compactação e usinagem do ligante asfáltico puro e com óleo

Amostra	Temperatura de usinagem - TU (°C)	Temperatura de compactação - TC (°C)
CAP 50/70	153,5	141,5
CAP 50/70 + 2% óleo de girassol	150,0	135,0
Redução (°C)	3,5	6,5

Portanto para a caracterização mecânica das misturas com óleo de girassol, os CPs serão moldados nas temperaturas 150°C (ótima), 140°C (-10°C) e 130°C (-20°C).

#### 4.2.5 Dosagem superpave

A metodologia SUPERPAVE foi desenvolvida pelo Strategic Highway Research Program (SHRP), um programa de pesquisa de asfalto dos Estados Unidos, criada em substituição aos métodos de Hveem e Marshall, que tem a comum análise volumétrica destes dois métodos como a base para o método Superpave. Segundo Cominsky et al (1994), o objetivo desta metodologia é desenvolver uma mistura econômica de ligante asfáltico e

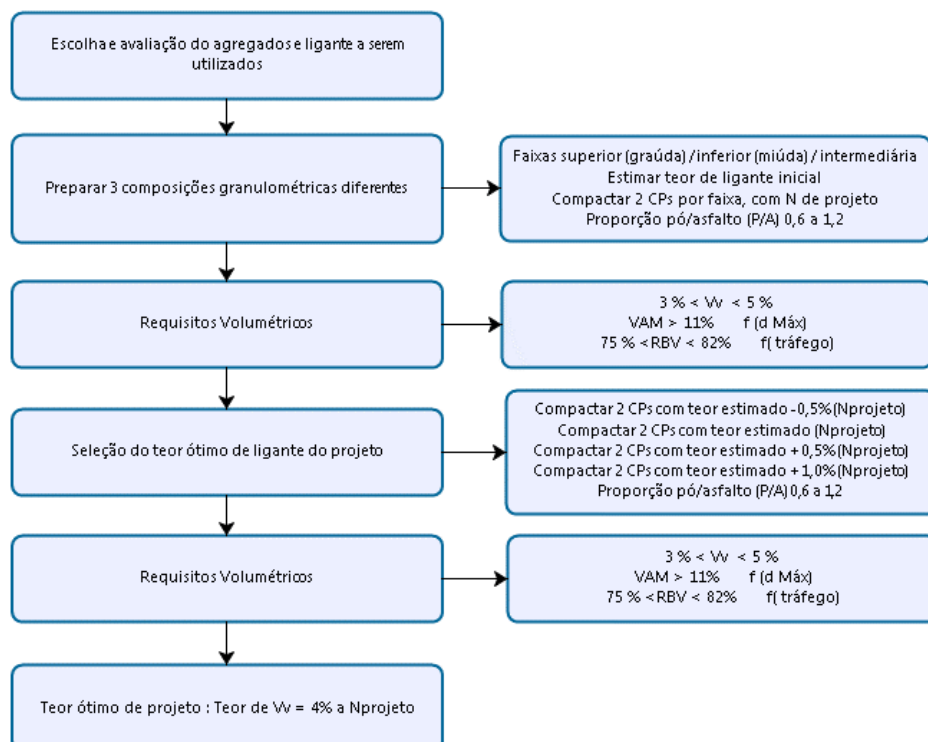
agregado que alcance um nível de desempenho compatível com as demandas de tráfego, ambiente e estrutura do pavimento, atendendo e minimizando a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade (KENNEDY et al, 1994).

A maior diferença entre as dosagens Marshall e SUPERPAVE é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall a compactação é realizada por impacto, na SUPERPAVE esta é realizada por amassamento. Outra mudança é na forma de escolha da granulometria, onde na metodologia SUPERPAVE inclui conceitos de pontos de controle e zonas de restrição. (BERNUCCI et al., 2007).

Segundo Asphalt Institute (2003) os pontos de controle funcionam como faixas através das quais as gradações devem passar e variam dependendo do tamanho nominal da composição de agregados. Já a zona de restrição, segundo Bernucci et al (2007), é uma medida empírica que forma uma região em que se aconselha que a curva não deveria passar, pois podem fazer com que a mistura se torne bastante frágil e dependa do ligante para ter resistência ao cisalhamento.

O procedimento da dosagem Superpave consiste em estimar o teor de projeto de CAP através da fixação do volume de vazios, conhecendo-se a granulometria dos agregados disponíveis. A Figura 16 detalha o esquema a ser seguido para determinação deste teor.

Figura 16 – Fluxograma de dosagem Superpave



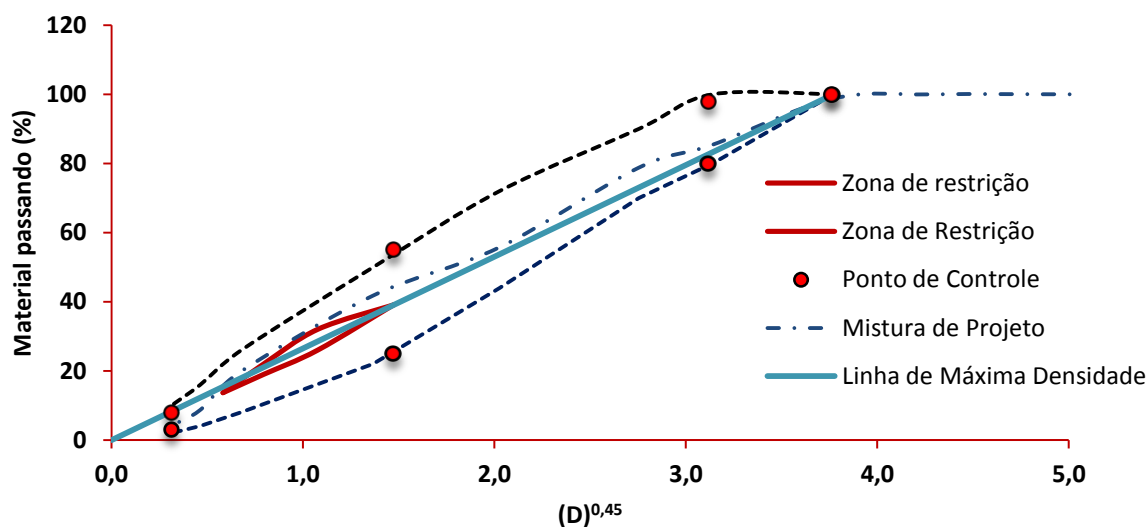
A partir da granulometria dos agregados (Figura 14), foi determinada a composição granulométrica utilizada nessa pesquisa. A curva granulométrica foi enquadrada na faixa “B” estabelecida pelo DNIT. A tabela 5 mostra a proporção de agregados que contém nas misturas, a partir da composição granulométrica.

Tabela 5-Proporção de agregados a partir da composição granulométrica

<b>Brita 19</b>	<b>Brita 12,5</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Fíller</b>
26%	24%	47%	3%

A Figura 17 apresenta graficamente essa composição granulométrica através da curva Fuller, onde é possível perceber que a mesma atende aos critérios de pontos de controle e zona de restrição, estabelecidos pela metodologia Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE).

Figura 17 – Curva Fuller intermediária faixa B.



A premissa principal da dosagem Superpave é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros do projeto, verificando os parâmetros volumétricos pelo Rice Test (Figura 18), segundo os procedimentos da norma ASTM 2041. Os vazios existentes, na mistura compactada total, são necessários para permitir a expansão térmica do ligante asfáltico e agregados nas temperaturas de verão, porém, devem existir em pequena quantidade para que evite efeitos danosos de ar e da umidade. Caso isso

não ocorra nas misturas experimentais feitas inicialmente, é realizada uma estimativa do teor de ligante que deverá atender esta exigência.

Figura 18 – Etapas Rice Test: (a) bandeja com agregados+CAP soltos; (b) aparelho de Rice



O objetivo final do Rice Test é a determinação de uma combinação e graduação de agregados econômica (dentro dos limites especificados) e do teor de ligante asfáltico correspondente (MANUAL DE ASFALTO, 1989), através da máxima gravidade e densidade específica das misturas betuminosas.

Para a determinação do teor de projeto, foram moldados corpos de prova com CAP 50/70 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 compactação é realizada no compactador giratório SERVOPAC com um número de giros igual a 100, com pressão aplicada de 600kPa e o ângulo de rotação de 1,25° conforme a premissa do SUPERPAVE.

A mistura, ainda não compactada, permanece em estufa por um período de 2 horas antes da compactação de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem (BERNUCCI et al., 2007). Para determinação do teor de projeto foram moldados corpos de prova no teor de ligante inicial de 4% estimado para a mistura, bem como em mais outros três teores de  $\pm 0,5\%$  e  $+ 1\%$  de ligante em relação ao teor inicial, determinando-se o teor ótimo de ligante igual a 4,5%. A partir dos valores de Volume de Agregado Mineral (VAM) e Volume de Vazios (Vv) inseridos na tabela 6 foi selecionada o teor de projeto mais adequado. A Figura 19 demonstra uma amostra dos CPs ensaiados nessa pesquisa.

Tabela 6 - Valores de VAM e Vv para os teores de CAP

TEOR DE CAP	VAM	%Vv
3,5	12,33	8,44
4	11,09	6,13
4,5	10,34	3,91
5	9,74	2,17

Figura 19 – Seleção do teor do ligante de projeto



Neste trabalho, a dosagem SUPERPAVE e seu resultado, o teor ótimo de CAP, serão tratados como metodologia, pois sua aplicação e resultado final estão ligados aos ensaios mecânicos realizados nos corpos-de-prova confeccionados.

#### 4.2.6 Caracterização mecânica das misturas asfálticas

Esta caracterização mecânica tem por objetivo avaliar e comparar as seguintes misturas asfálticas, compostas por: CAP puro, CAP com adição de 2% de óleo em temperatura ótima e CAP com adição de óleo em temperaturas com 10°C e 20°C abaixo da temperatura de referência. A partir daí, pode-se avaliar a influência da temperatura de usinagem das misturas quanto aos seus desempenhos mecânicos.

Os CPs foram moldados utilizando a mesma composição granulométrica e mesmo teor de ligante asfáltico, alterando-se apenas a temperatura na qual as misturas foram compactadas (nas temperaturas determinadas no ensaio de viscosidade dos ligantes asfálticos bem como em 10 °C e 20 °C abaixo destas). Os ensaios realizados foram: Resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), resistência ao dano por umidade induzida (Lottman) e Flow Number que serão descritos a seguir.



#### 4.2.6.1 Resistência à tração por compressão diametral – RT

O ensaio de compressão diametral, também denominado de *Brazilian Test*, determina a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica até sua ruptura. O ensaio é bastante empregado na atualidade para a medida da resistência à tração indireta de amostras de concretos asfálticos (BALBO, 2007).

O procedimento foi realizado segundo a norma ME 136/2010 do DNIT e o equipamento utilizado para a realização do ensaio é a prensa mecânica com sensibilidade de 19,60 N. O corpo de prova é submetido à aplicação progressiva de uma carga com velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que seja rompido segundo o plano diametral vertical. A Figura 20 mostra a prensa realizada para os ensaios de RT.

Figura 20 – Equipamento para ensaio RT – Prensa mecânica



O ensaio é realizado em uma temperatura em torno de 25 °C. A resistência à tração do corpo de prova rompido por compressão diametral é calculada por meio da Equação 1.

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\sigma_r$  - Resistência à tração, em kgf/cm<sup>2</sup>;

F - Carga de Ruptura, em kgf;

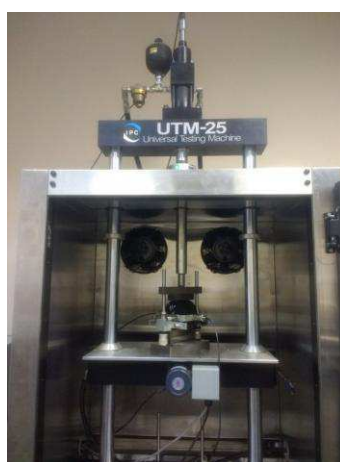
D - Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H - Altura do corpo de prova, em cm.

#### 4.2.6.2 Módulo de Resiliência – MR

Este ensaio foi realizado em um equipamento composto por um sistema pneumático de carregamento com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, o Universal Testing Machine (UTM-25), um sistema de medição do deslocamento axial do corpo de prova - LVDTs (Linear Variable Differential Transducer) e um software UTS003 1.39 Indirect Tensile Modulus Test, para coleta e análise de dados. Na Figura 21 apresentasse uma imagem do equipamento UTM – 25.

Figura 21 - Equipamento utilizado no ensaio MR - UTM-25



O princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações, durante o carregamento repetido, em potencial elétrico, cujo valor é registrado no microcomputador. Uma pré-calibração é necessária, a fim de se correlacionar as deformações com os valores dos registros.

O ensaio do Módulo de Resiliência (MR) foi realizado segundo as normas ABNT NBR 16018/2011 e ASTM D 7369/2009 e tem por objetivo simular o efeito do tráfego que aplica cargas transientes provenientes do movimento dos veículos.

O procedimento consistiu na aplicação de uma carga a uma frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com o tempo de aplicação de 0,10 segundo e, portanto, com 0,90 segundo de repouso ou descarregamento. A temperatura de ensaio foi de 25°C e carga de valor igual a 10% da resistência à tração obtida para cada mistura asfáltica com o seu respectivo teor de ligante asfáltico. Sendo realizado um condicionamento de 50 ciclos, para posteriormente execução de ensaio.

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

O ensaio é normatizado pela AASHTO T 283/14 ou ASTM D 4867. O primeiro passo foi a moldagem de quatro CPs com 1200g de mistura asfáltica, apresentando volume de vazios de  $7\% \pm 1\%$  para cada temperatura de usinagem. Os CPs foram divididos em dois grupos, onde em um grupo, os CPs foram rompidos à tração por compressão diametral (sem condicionamento térmico) após ter sido submetido a um banho a  $25^{\circ}\text{C}$  por 2h para regularização da temperatura.

Para o segundo grupo, os CPs passaram pelo processo de condicionamento, onde foram colocados em recipientes contendo água destilada e aplicou-se vácuo a uma pressão de 250-650mmHg por um período de aproximadamente 5 minutos. A fim de simular a condição extrema de mínima temperatura, os CPs foram envolvidos em um saco plástico com 10ml de água e colocados em uma geladeira a  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período em torno de 16hrs. Posterior ao congelamento, os CPs foram imersos em um banho em água destilada com temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , por um período de 24 horas. Por fim, submeteram-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 rompê-los através do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

A análise é dada pela relação entre a resistência à tração dos corpos de prova submetidos ao condicionamento (RTu) e não condicionados (RT), chamada de Resistência à Tração Retida ou Razão de Resistência à Tração por compressão diametral (RRT). O critério para aceitação de uma mistura asfáltica é dado em porcentagem de propriedade retida, que para a AASHTO é de 70%.

#### 4.2.6.4 Flow Number

Este ensaio simula a condução de um veículo pesado repetidamente sobre a estrutura do pavimento e oferece como resposta flow number (FN), que é o número de ciclos de carga que o pavimento pode tolerar antes que ocorra a fluência (COSTA,2017). O ensaio de deformação por critério diametral FN é o mais recomendado para analisar a resistência das misturas a deformações permanentes, já que os ensaios de cargas estáticas não representam bem estas deformações em campo.

O procedimento foi realizado na Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) (Figura 22) conforme a norma brasileira (NBR 16505/2016), onde o dispositivo de carregamento deve

ser capaz de transmitir ondas de forma senoidal em frequências de 1 Hz (carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s). Os corpos de prova para realização deste ensaio foram moldados com altura de 150mm, diâmetro de 100mm e volume de vazios de  $7\% \pm 0,5$ . O ensaio consistiu na aplicação de cargas repetidas de 204kPa em corpos de prova condicionados a uma temperatura de 60°C.

Figura 22 - Asphalt Mixture Performance Tester AMPT



## 5. Resultados e discussões

Os resultados obtidos foram utilizados para mensurar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com adição de óleo de girassol e compará-las em suas temperaturas ótima, -10°C e -20 °C. Nesse capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência, dano por umidade induzida e Flow Number. Para fins de melhor visualização gráfica, foram atribuídas nos gráficos nomenclaturas como CAP PURO, CAP+ÓLEO TO, CAP+ÓLEO-10°C e CAP+ÓLEO-20°C para as misturas ensaiadas compostas por CAP puro, CAP com 2% de óleo de girassol em temperatura ótima, CAP com 2% de óleo de girassol em temperatura 10°C abaixo da temperatura ótima e CAP com 2% de óleo de girassol em temperatura 20°C abaixo da temperatura ótima, respectivamente.

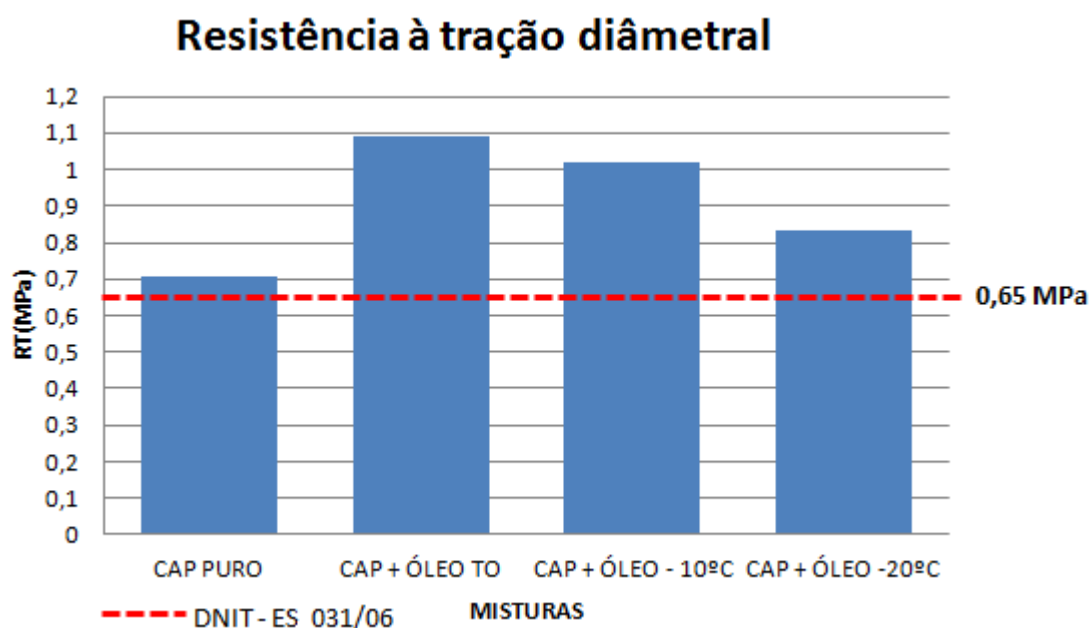
### 5.1 Resistência a Tração (RT)

Neste item são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas. Na Tabela 7 e Figura 23 estão as amostras CAP PURO, CAP+ÓLEO TO, CAP+ÓLEO-10°C e CAP+ÓLEO-20°C, respectivamente.

Tabela 7 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Amostra	Resistência a tração por compressão diametral (MPa)
CAP puro,	0,8
CAP + ÓLEO TO	1,1
CAP + ÓLEO – 10 °C	1,0
CAP + ÓLEO – 20 °C	0,9

Figura 23 - Resultados do ensaio RT



Para a norma DNIT 031/06 – ES, que estabelece as especificações técnicas de serviço para CBUQ, a RT mínima a ser obtida deve ser de 0,65 MPa. Sendo assim, todas as misturas analisadas satisfazem a norma citada. Além disso, os resultados obtidos de RT para as amostras com óleo de girassol apresentaram resultados melhores que a amostra de referência. Esse aumento indica os benefícios inerentes à adição do óleo de girassol ao ligante, onde esse auxiliou no aumento da capacidade de envolvimento dos agregados. A amostra com adição de óleo de girassol na temperatura ótima apresentou um aumento de 38,9% em relação à mistura de referência, enquanto que as misturas com adição de óleo de girassol com -10 e -20 °C apresentaram aumentos de 29,2% e 18,3%, respectivamente.

Com a diminuição da temperatura de usinagem e compactação as misturas asfálticas com óleo apresentaram uma diminuição da RT em relação à mistura com temperatura ótima. Os mesmos comportamentos foram encontrados em estudos como Luz (2016) e Barros (2018), os autores utilizaram óleo de milho adicionado ao ligante asfáltico, CAP 50/70 e E – 55/75, respectivamente. Em seus resultados foi observado que a diminuição da temperatura de usinagem e compactação, impactava diretamente os valores de RT das misturas asfálticas.

Os resultados indicam que, mesmo para as amostras modificadas com óleo de girassol compactadas com temperaturas 20 °C inferiores a temperatura ótima, ainda foram obtidos

resultados mais eficazes que a amostra de referência. Porém, não correspondendo ao máximo desempenho que poderá ser obtido das misturas obtidas com o acréscimo de óleo de girassol.

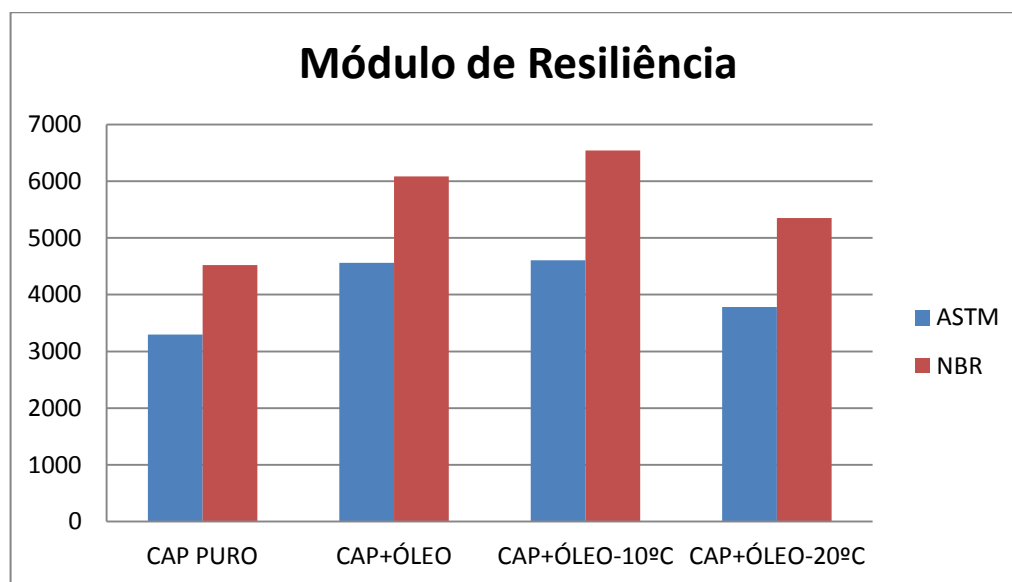
## 5.2 Módulo de Resiliência (MR)

Na Tabela 8 e Figura 24 estão apresentados os resultados do ensaio de MR para os corpos de prova ensaiados.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)

Amostra	MR ASTM (MPa)	MR NBR (MPa)
CAP PURO	3297	4524
CAP + ÓLEO TO	4559	6086
CAP + ÓLEO – 10 °C	4607	6542
CAP + ÓLEO – 20 °C	3779	5351

Figura 24 – Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)



De acordo com BERNUCCI et al. (2007), os valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Nota-se que os valores encontrados para as misturas asfálticas estão dentro do intervalo citado. Em relação ao ligante puro, as outras amostras apresentaram um aumento significativo no módulo de resiliência pelo ASTM, sendo de 38%, 40% e 15% para os corpos de prova a temperatura ótima, 10°C abaixo da temperatura

ótima e 20°C abaixo da temperatura ótima, respectivamente. Observa-se, no entanto, que para a amostra a 20°C abaixo da temperatura ótima, foi encontrado uma redução no valor de MR em relação as outras amostras modificadas com o óleo de girassol. Indicando mais uma vez que a temperatura de 20 °C inferior mesmo apresentando valores equivalentes a amostra de referência, não representa os melhores resultados para o ligante modificado com óleo de girassol.

O mesmo comportamento foi observado nos resultados obtidos utilizando a norma da ABNT NBR. Ou seja, ocorreu um acréscimo nos valor de MR para os corpos de prova com adição de óleo de girassol a temperatura ótima, 10°C abaixo da temperatura ótima, 20°C abaixo da temperatura ótima de 34,5%, 44,6% e 18,3%, respectivamente, em relação as amostras de referência.

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

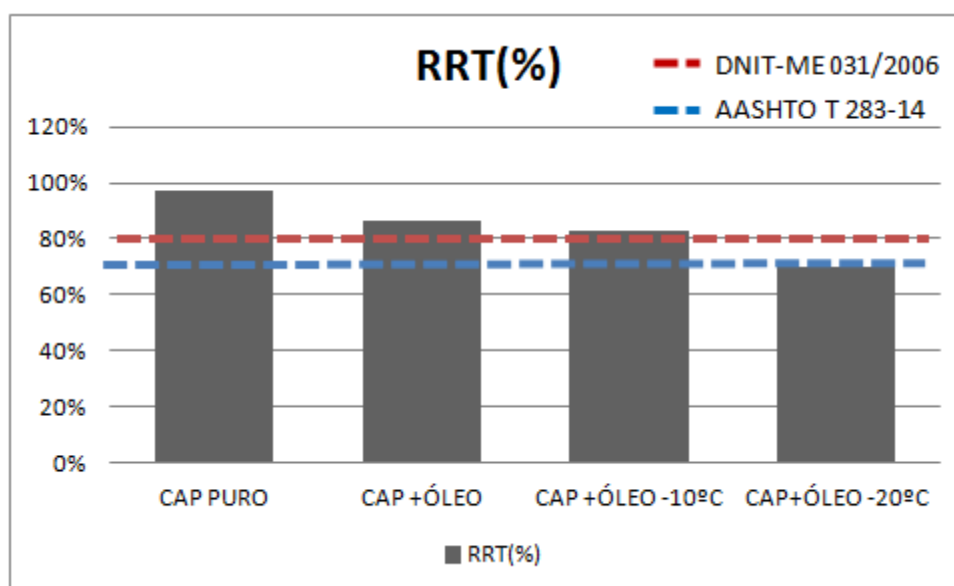
Na Tabela 9 e Figura 25 são apresentadas as médias dos resultados obtidos.

Tabela 9 – Valores do ensaio de Resistência à tração

AMOSTRA	RT (MPa)	RTU (MPa)	RRT(%)
CAP PURO	283,33	275,00	97
CAP +ÓLEO	335,00	290,00	87
CAP +ÓLEO -10°C	326,67	270,00	83
CAP+ÓLEO -20°C	320,00	223,33	70



Figura 25 – Resultado do ensaio de Lottman



A análise é feita pela razão entre as resistências à tração das amostras previamente condicionadas (RTu) e das amostras sem condicionamento (RT). Este valor (em porcentagem) é denominado Resistência Retida à Tração (RRT). Conforme os resultados obtidos (Figura 22) verifica-se que os valores do RRT para todas as misturas satisfazem o limite de acordo com AASHTO T 283-14, sendo de no mínimo 70%. Pelo limite estabelecido pela metodologia SUPERPAVE, que corresponde a 80% para o índice de resistência a tração, apenas as misturas com a redução de 20°C são inadequadas. Para os resultados, os fatores determinantes no desempenho das misturas no ensaio de dano por umidade induzida são o grau de saturação, o ligante asfáltico, e a temperatura de usinagem e compactação, já que o agregado, a faixa granulométrica, bem como as demais condicionantes foram mantidos constantes.

Verifica-se que o valor de RRT decresce com a adição do óleo de girassol à mistura, afirmando a influência do aditivo quanto à sensibilidade à umidade e seu comportamento adesivo. Para a redução da temperatura também houve diminuição do valor do RRT, para amostras à -10°C da temperatura ótima, encontrou-se um grau de saturação de 83% e à -20°C, 70%. Isto pode estar relacionado à umidade que pode ter sido armazenada na mistura devido às temperaturas mais baixas de trabalhabilidade, o que pode acarretar problemas na adesividade e conseqüente diminuição na rigidez do pavimento.

A utilização de um aditivo químico (dope) incorporado ao ligante é uma alternativa para solucionar o problema de adesividade das misturas. Em quantidades adequadas, o uso de dope

pode retardar o deslocamento da película betuminosa ao agregado, adiando os efeitos danosos ao pavimento.

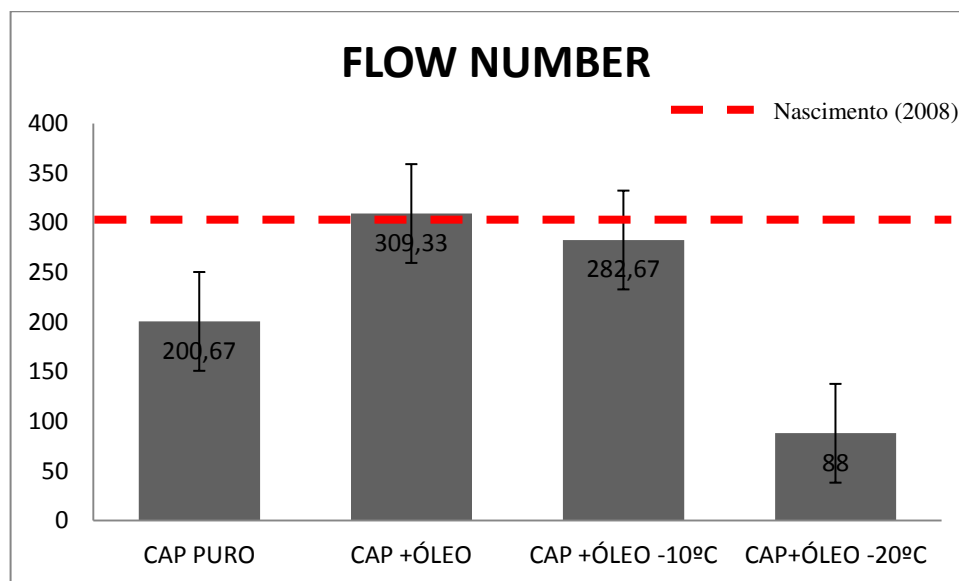
#### 5.4 Flow Number

Na Tabela 10 e Figura 26 estão apresentados os valores médios e os desvios padrão, de três corpos de prova por mistura, obtidos no ensaio de Flow Number.

Tabela 10 – Valores de ensaio de FN

Amostras	FN (Ciclos)
CAP PURO	200
CAP +ÓLEO	309
CAP +ÓLEO -10°C	282
CAP+ÓLEO -20°C	88

Figura 26 – Resultado do ensaio FN



Alguns autores sugerem valores de referência para o FN. Nascimento (2008) correlacionou os valores de FN aos níveis de tráfego suportado pelas misturas. O mesmo autor propôs os limites mínimos de 300 e 750 ciclos para valores de FN para tráfego médio e pesado, respectivamente, à 60°C, para que as misturas apresentem desempenho satisfatório quanto às deformações permanentes.

Desta forma, de acordo com a NBR 16505/2016, apenas as misturas ensaiadas com adição de 2% de óleo de girassol produzidas na temperatura ótima apresentam valores de FN que satisfazem requisitos para rodovias de tráfego médio.

As menores temperaturas de usinagem e compactação das misturas podem resultar em uma menor rigidez inicial da mistura, o que as tornam mais suscetíveis a deformações permanentes. Portanto, a redução da temperatura de produção das misturas asfálticas deve ser controlada, pois em temperaturas mais baixas a compactação se torna mais difícil, devido à menor trabalhabilidade da mistura, fazendo com que possa aumentar o volume de vazios e, conseqüentemente, ocasionando a perda de resistência.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais dessa pesquisa fornecem conhecimento do comportamento das misturas asfálticas mornas produzidas com a incorporação do óleo de girassol, em relação aos ensaios mecânicos (Resistência à Tração Diametral, Módulo de Resiliência, Lottman Modificado e FlowNumber) com método de dosagem SUPERPAVE. Foram estudados dois tipos de misturas asfálticas, com ligante puro e ligante com adição de óleo de girassol, variando-se as temperaturas de usinagem e compactação em quatro situações diferentes. A mistura com ligante asfáltico puro foi base de comparação para as outras três misturas com óleo, sendo diferenciadas através de suas temperaturas de usinagem e compactação ótimas e 10° e 20°C abaixo da temperatura de referência obtidos através do ensaio de viscosidade.

Em suma, pode-se inferir, a partir dessa pesquisa que:

A adição do óleo de girassol à mistura reduziu as temperaturas de usinagem e compactação em 3,5 e 6,5°C, respectivamente. As misturas modificadas puderam ser fabricadas em temperaturas inferiores, diminuindo assim o consumo energético e consequentemente, o custo para sua produção.

Todos os resultados de RT obtiveram um aumento com a adição de óleo quando comparadas com as misturas com CAP puro. Porém as reduções de 10 e 20°C nas temperaturas de usinagem e compactação tenderam a diminuir a resistência a tração das misturas. Todas as amostras encontram-se com valores de RT acima do mínimo normatizado.

Pelos dois métodos analisados para o MR (ASTM D 4123-82 e NBR 16018/2011), os valores encontrados para as misturas asfálticas apresentaram aumento significativo no módulo de resiliência, em relação ao ligante puro, sendo as amostras com temperatura de usinagem e compactação 10°C abaixo da temperatura ótima as que apresentaram maiores valores para o ensaio.

Em relação ao dano por umidade induzida, todas as misturas ensaiadas apresentam valores acima do exigido para RRT, determinado pela AASHTO T 283-14. Porém, baseados na metodologia SUPERPAVE, as misturas com a redução de 20°C nas temperaturas de usinagem e compactação são inadequadas. Em todas as amostras houve uma diminuição no valor da RRT, tanto pelas adições de óleo quanto pela redução da temperatura, verificando assim a influência negativa destes com relação ao aumento da sensibilidade a umidade das misturas.

No ensaio de Flow Number, apenas as misturas ensaiadas em temperaturas de compactação 20°C inferiores apresentaram valores insuficientes ao limite mínimo definido pela Report 673 apropriadas para tráfego pesado. Baseado nesses resultados, não é aconselhável o uso de misturas compactadas a uma temperatura 20 °C abaixo da temperatura ótima em pavimentos de tráfego pesado, pois podem comprometer a resistência do pavimento.

Em suma, quanto à avaliação das propriedades mecânicas, as misturas asfálticas com óleo de girassol, compactadas a uma temperatura 10 °C abaixo da temperatura ótima, apresentam-se como uma alternativa promissora de misturas mornas com aditivos. Além de apresentar resposta positiva aos ensaios mecânicos, tem vantagens no quesito ambiental por promover a redução de emissão de gases causadores do efeito estufa com a queima de combustíveis e melhorar a qualidade de trabalho dos operadores durante o processo de usinagem e compactação.

## 7. Referências Bibliográficas

- ABNT (2000) NBR 6560/00, *Ponto de Amolecimento do Ligante Asfáltico*.
- ABNT (2004) NBR 15184/04, *Materiais betuminosos – Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional*.
- ABNT (2011) NBR 16018/11 – *Materiais asfálticos - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.
- 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.
- ASPHALT INSTITUTE (2003) (Ed.). *Performance graded asphalt binder specification and testing*. Asphalt Institute.
- ASTM (2009) D 7369 – *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixture by Indirect Tension Test*.
- ASTM (2013) D 4402 – *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials, EUA.
- AYRES C. S., DA SILVEIRA, L. E., DE SANT’ANA, H. B., SOARES, J. B. (2006). *Produção e caracterização mecânica de misturas asfálticas obtidas a temperaturas intermediárias pela adição de zeólitas*. 18º Encontro do Asfalto – Instituto Brasileiro de Petróleo e gás. Rio de Janeiro (RJ)
- BARROS, A. D. (2018) *estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição do óleo de milho* Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB
- BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. (2008) *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA.
- BROCK, Josiane et al. (2008). *Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais*. Ciência e tecnologia de alimentos, v. 28, n. 3.
- BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., ROBERTS, F. L., KIM, Y. R., LEE, D.-Y., KENNEDY, T. W (2009). *Hot mix asphalt: Materials, mixture design, and construction*. Lanham: NCAT at Auburn University , 3<sup>rd</sup> Ed.
- BUDNY, J. (2012). *Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas..* Tese de Doutorado. Dissertação Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Fevereiro.
- CAVALCANTE, F. P. (2016) *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.

CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2016 – *Relatório Gerencial*. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>> Acesso em: 15 Agosto 2017.

COMINSKY, Ronald J. et al. (1994). *The superpave mix design manual for new construction and overlays*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program.

COSTA, L. F., (2017) *Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

COSTA, A.A.; BENTA, A. (2016). *Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt*. Journal of Cleaner Production. V. 112, Part 4, Pages 2308–2317.

D'ANGELO, J.; HARM, E. ;BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B.(2008). *Warm-mix Asphalt: European practice. Technical Report FHWA*. Washington, DC: Internacional Technology Scanning Program, Federal Highway Administration, USA.

DNIT (1995) ME 084/95 – *Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

DNIT (1998) ME 081/98 – *Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

DNIT (1998) ME 083/98 – *Agregados – Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

DNIT (2006) ME 031/2006 – *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro

DNIT (2010) ME 131/2010 – *Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

DNIT (2010) ME 136/2010 – *Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro

DNIT (2010) ME 155/2010 – *Material asfáltico – Determinação da penetração*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

FAXINA, A. L. (2006) *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

FHWA (2008) *Warm-mix asphalt: European practice*. Virginia: FHWA, 2008. (Report FHWA-PL-08-007).

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

KENNEDY, Thomas William et al. (1994) *Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program.* Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program, National Research Council.

KOTLINSKI, J. R., (2010) *Proposta de instrumento para avaliar o grau de sustentabilidade de edificações em cidades de pequeno e médio porte.* Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, UNIJUI, Ijuí, RS, 70f.

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

LUZ P. M. (2006) *Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com a adição do óleo de milho.* Trabalho de Conclusão do Curso. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.

MANUAL, DO ASFALTO (1989) *Instituto do Asfalto.*Série do Manual, n. 4.

MOTTA, R. S. (2011) *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.

NAKAHARA, S. M.;RHODE,L.;MALLMANN, E.; CERATTI, J. A.(2010) *Misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas de resíduos de carvão.* In: ENCONTRO DE ASFALTO, 20., Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: IBP.

NASCIMENTO, L. A. H. (2008) *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.

NELSON FILHO, W.(2013) *Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.* Universidade Federal do Ceará- UFS, Fortaleza/CE.

NEWCOMB, D. (2007) *Innovations in hot mix asphalt highway quality compendium.* Federal highway compendium, United States Department of Transportation, 132f.

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

PENZ, Gustavo. (2010) *Propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas.* Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS.



PORTAL SINICESP. SÃO PAULO, (2013). Disponível em: <[HTTP://www.sinicesp.org.br/materiais/2013/bt13a.htm](http://www.sinicesp.org.br/materiais/2013/bt13a.htm)> Acesso em 15/09/2017.

PORTUGAL, A. C. X. (2016) *Avaliação Reológica de Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados com Óleo de Soja e de Milho*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.

PROWELL B. D., HURLEY G. C. (2007) *Warm-mix asphalt: best practices* National Asphalt Pavement Association. Lanham. 27f.

SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; PERALTA, J.; ZOOROB, S. E (2010). *Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents*. Construction and Building Materials, 24, 1621-1631.

SOUZA, J.L.S. (2012) *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.

TONIAL, I. A.(2001) *Influencia do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos*. Dissertação (mestrado em engenharia), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 244f.

TONIAL, I. A. (2011) *Efeito do tempo sobre a temperatura de transporte da massa asfáltica sobre o envelhecimento do CAP XVI-CILA*, Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto. Rio de Janeiro.

VERSLYPE, Nina Iris et al.(2016) *Potencial para o cultivo do girassol na Microrregião do Pajeú através do modelo digital do terreno*. Revista geama, v. 1, n. 3, p. 279-292.

WHITEOAK, D. (1990) *The Shell bitumen handbook*. 1 ed. Cambridge.