



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



Felipe Fernandes Medeiros

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO MÓDULO  
DE RESILIÊNCIA DE MISTURA ASFÁLTICA**

CAMPINA GRANDE/ PB

Setembro/2017

FELIPE FERNANDES MEDEIROS

**ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS  
ASFÁLTICAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federal de Campina Grande para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

CAMPINA GRANDE/ PB

Setembro/2017

FELIPE FERNANDES MEDEIROS

**ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS  
ASFÁLTICAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS**

Aprovado por:

---

John Kennedy Guedes Rodrigues  
(Orientador)

---

Ana Maria Gonçalves Duarte  
(Examinador interno)

---

Jonny Dantas Patrício  
(Examinador externo)

Campina Grande – PB, 01 de Setembro de 2017

“Sorte é um dividendo de suor. Quanto mais você  
suar, mais sorte você tem” (Ray Kroc, Fundador  
da McDonald's)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por sempre ter me dado forças diante das dificuldades.

A minha mãe, Santana, pela determinação e luta na minha formação e do meu irmão. Você é e sempre será o nosso alicerce. Obrigado por nunca nos deixar faltar nada e pelo apoio incondicional em nos dar o melhor.

Aos meus avós maternos, Seu Antônio “In Memoriam” e Dona Maria, meus segundos pais. Obrigado por tudo que já fizeram por mim.

À minha vó paterna, Dona Ilza, pelo apoio e carinho.

À minha tia, Maria Aparecida (Bibia), por ter acreditado nesse sonho junto comigo e por ter dado total suporte do começo ao fim dessa minha jornada. O meu muito obrigado.

Aos amigos que conheci nesse tempo de universidade e intercâmbio que se transformaram em uma família para mim. Vocês foram peças fundamentais na minha vida. Obrigado pela atenção, companheirismo e cumplicidade. Cada história que passamos juntos vou levar comigo para o resto da vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. John Kennedy pelo suporte no término desse trabalho.

À Daniel, mestrando em engenharia civil pela UFCG, pela dedicação e empenho em me ajudar na realização dos experimentos e na transmissão de conhecimento.

## RESUMO

No dimensionamento de pavimentos, a previsão das tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura do pavimento passou a ser feita por métodos de cálculo que levam em consideração os esforços atuantes. Nos métodos de dimensionamentos mecanísticos, o módulo de resiliência do revestimento asfáltico é normalmente usado como parâmetro de cálculo no dimensionamento de pavimentos. O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento de 2 (dois) tipos de mistura asfálticas utilizando CAP 50/70 e AMP 55/75 avaliando as propriedades mecânicas das misturas foram feitos ensaios de resistência à tração diametral (RT) e o módulo de resiliência (MR). No ensaio do MR foram utilizadas 6 (seis) diferentes temperaturas (5°C, 10°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C). Os resultados demonstraram maior RT para o AMP 55/75 em relação ao CAP 50/70. O aumento de temperatura ocasionou uma diminuição do MR tanto no CAP 50/70 quanto no AMP 55/75. A resistência à tração das misturas asfálticas feitas com AMP 55/75 são 50% maiores que as misturas asfálticas feitas com CAP 50/70;

**PALAVRA CHAVE:** Propriedades mecânicas, Misturas asfálticas, Ensaios.

## **ABSTRACT**

In the design of pavements, the prediction of the tensions and deformations from the traffic and the climate that act on the pavement structure began to be made by calculation methods that take into account the working forces. In the mechanistic dimensioning methods, the resilient modulus of the asphalt coating is usually used as a calculation parameter in the sizing of pavements. The objective of this work was to verify the behavior of 2 (two) types of asphalt mixtures using CAP 50/70 and AMP 55/75 evaluating the mechanical properties of the mixtures were made diametral tensile strength (RT) and resilience modulus ( MR). In the MR assay 6 (six) different temperatures (5°C, 10°C, 15°C, 25°C, 30°C and 45°C) were used. The results showed a higher RT for 55/75 AMP compared to CAP 50/70. The increase in temperature caused a decrease in MR in both the CAP 50/70 and the AMP 55/75. The tensile strength of the asphalt mixtures made with AMP 55/75 is 50% greater than the asphalt mixtures made with CAP 50/70;

**KEYWORDS :** Mechanical properties, Asphaltic mixtures, Tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição granulométrica .....	20
Figura 2 - Representação convencional das curvas granulométricas .....	21
Figura 3 - Representação de curvas granulométricas pelo SHRP-Superpave .....	23
Figura 4 - Classificação asfálticas em função da temperatura de produção de misturas .....	26
Figura 5 - Fluxograma .....	27
Figura 6 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados .....	29
Figura 7 - Composição granulométrica .....	32
Figura 8 - Fíller utilizado (cal hidratada) .....	32
Figura 9 - Mistura do agregado com ligante .....	33
Figura 10 - Medição do corpo de prova .....	34
Figura 11 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico .....	35
Figura 12 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico .....	36
Figura 13 - Corpo de prova rompido .....	36
Figura 14 - Ensaio de módulo de resiliência .....	38
Figura 15 - Ensaio módulo de resiliência .....	39
Figura 16 - Resistência à tração x Temperatura .....	40
Figura 17 - Módulo de resiliência x Temperatura .....	41



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos cimentos asfálticos de petróleo segundo a norma regulamentadora 03/2005 da ANP .....	16
Tabela 2 - Características dos diversos tipos de AMP .....	18
Tabela 3 - Especificações das peneiras .....	20
Tabela 4 - Granulometria e percentual de ligante asfáltico em relação às faixas de misturas ....	25
Tabela 5 - Valores limites para características das misturas .....	25
Tabela 6 - Caracterização do CAP 50/70 .....	28
Tabela 7 - Caracterização do CAP 55/75 .....	28
Tabela 8 - Ensaio de caracterização.....	29
Tabela 9 - Distribuição granulométrica por peneiramento dos agregados .....	30
Tabela 10 - Massas específicas aparente, real e absorção dos agregados .....	30
Tabela 11 - Mistura AMP 55/75 .....	31
Tabela 12 - Mistura CAP 50/70 .....	31
Tabela 13 - Resistência à tração .....	40
Tabela 14 - Módulo de resiliência x Temperatura .....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMA – Asphalt Emulsion Manufacturers Association

ASTM – American Society for Testing Materials

CP – Corpo de Prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FHWA – Federal Highway Administration

Gmm – Massa Específica Máxima Medida da Mistura

HMA – Hot Mix Asphalt

LEA – Low Energy Asphalt

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

LVDTs – Linear Variable Differential Transducer

MAM – Mistura Asfáltica Morna

ME – Método de Ensaio

MR – Módulo de Resiliência

N – Número

NBR – Norma Brasileira Registrada

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program

PB – Paraíba

RBV – Relação Ligante x Vazios

RRT – Resistência Retida à Tração

RT – Resistência à Tração

RTFO – Rolling Thin-Film Oven

SHRP – Strategic Highway Research Program

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

TCU – Temperatura de Compactação e Usinagem

TNM – Tamanho Nominal Máximo

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

VAM – Vazios do Agregado Mineral

Vv – Volume de vazios

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO .....	12
1.1 – Objetivos .....	13
1.1.1 – Objetivos gerais .....	13
1.1.2 – Objetivos específicos .....	13
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	14
2.1 – Ligantes .....	14
2.1.1 – Cimento asfáltico de petróleo .....	15
2.1.2 – Ligantes asfálticos modificados com polímero .....	17
2.2 – Agregados .....	18
2.3 – Misturas asfálticas .....	22
2.3.1 – Misturas asfálticas a quente .....	22
2.3.2 – Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) .....	24
3 – METODOLOGIA .....	27
3.1 – Materiais .....	28
3.1.1 – Ligante asfáltico .....	28
3.1.2 – Agregados .....	28
3.2 – Métodos .....	30
3.2.1 – Separação do agregado .....	31
3.2.2 – Determinação da resistência à tração por compressão diametral .....	35
3.2.3 – Determinação do módulo de resiliência .....	37
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	40
4.1 – Resultado Resistência à tração diametral .....	40
4.2 – Resultado módulo de resiliência .....	41
5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	43
REFERÊNCIAS .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é hoje o mais utilizado no país. De acordo com os dados apresentados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) na Pesquisa CNT de Rodovias em 2013, cerca de 65% da movimentação de cargas e 90% da movimentação dos passageiros do Brasil ocorrem pelas rodovias. Analisado a situação de todas as rodovias federais e das principais rodovias estaduais do país, a última pesquisa, em 2014, apontou que 49,90% da extensão avaliada apresenta algum tipo de deficiência, como buracos, trincas, afundamentos, ondulações, entre outros problemas. Além de diversos pontos críticos, os quais apresentam graves riscos à segurança dos usuários.

O pavimento constitui-se de uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos (pavimentos de concreto de cimento Portland) e flexíveis (pavimentos de revestimento asfálticos) (Bernucci et.al. 2007).

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Bernucci et.al. 2007).

A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica pré-definida. O teor de projeto de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros.

Com este objetivo de alongar a vida útil das vias, Balbo (2007) sugere que se deve "tornar o material mais rígido ao receber esforços (sofrendo menores deformações) e mais mole ao aliviar os mesmos esforços (apresentando maior recuperação elástica)".

É comum durante a fase de dimensionamento de um pavimento novo não se ter conhecimento da mistura asfáltica real que vai ser utilizada naquele pavimento. Deste modo, o módulo de resiliência é definido arbitrariamente dentro do universo típico de valores e todo o

processo do dimensionamento é realizado com este valor. Ao se definir um valor específico para o módulo de resiliência da camada asfáltica, pressupõe-se que aquele valor do módulo de resiliência será obedecido na época da construção do trecho. Semelhante situação acontece com os demais materiais utilizados na construção do pavimento, embora com os solos e britas haja possibilidade de escolha prévia das jazidas e pedreiras e ensaios específicos destes materiais Marques (2004).

O MR é normalmente usado como parâmetro de cálculo no dimensionamento de pavimentos flexíveis devido a alguns fatores, dentre eles: indicam uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas; método aceito internacionalmente para caracterizar materiais para o projeto de pavimentos e para sua avaliação de desempenho; há técnicas disponíveis para estimar o módulo de resiliência em campo com testes rápidos e não-destrutivos, o que facilita a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos gerais**

Analisar a influência da temperatura no Módulo de resiliência para mistura asfáltica utilizando CAP 50/70 e AMP 55/75.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Avaliar o Módulo de resiliência nas temperaturas de (5°C, 10°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sempre foi de grande importância para a sociedade realizar deslocamentos entre regiões diferentes como forma de integração social, econômica, cultural e/ou política. Um dos meios pelo qual são realizados esses deslocamentos é pelo intermédio de estradas, que são responsáveis por uma grande parcela dos mesmos, o pavimento é uma forma de aprimorar essas estradas garantindo segurança, conforto, eficiência e economia aos seus usuários.

Uma estrada pavimentada de forma correta apresenta a superfície regular e mais aderente aos pneus utilizados nos meios de transporte, proporcionando, assim, menores riscos quanto à perda de controle do veículo e garantindo a resposta a qualquer necessidade de frenagens ou desvios repentinos.

Como uma forma de reduzir os gastos com manutenção de pavimentos e aumentar a sua vida útil, as empresas do ramo de pavimentação vem numa busca cada vez maior pela utilização de tecnologias para aumentar a performance do pavimento.

### 2.1 Ligantes

De acordo com Bernucci et al (2008), atualmente, o mercado brasileiro dispõe dos seguintes tipos de ligantes asfálticos:

- Cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- Asfaltos diluídos de petróleo – ADP;
- Emulsões asfálticas de petróleo – EAP;
- Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- Asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- Agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil utiliza-se a denominação CAP (Cimento asfáltico de petróleo) para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que serão mostradas mais adiante. O CAP é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono,

propriedade que será utilizada como um dos requisitos de especificação (BERNUCCI et al, 2007, p. 26).

### **2.1.1 Cimento asfáltico de petróleo**

Os CAP's são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os precedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).

A composição química do CAP tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência será nos processos de incorporação de agentes modificadores tais como os polímeros. As propriedades do CAP variam muito com a temperatura, por isso a característica de suscetibilidade térmica de cada ligante é de extrema importância para o comportamento futuro do pavimento.

Para se especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, utiliza-se duas características principais: dureza, medida através da penetração de uma agulha padrão na amostra do ligante, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade.

Os ensaios físicos dos cimentos asfálticos podem ser categorizados entre ensaios de Consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança.

Sua classificação, de acordo com DNIT 095 (2006), é relacionada à sua penetração, podendo ser: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. A Tabela 1 apresenta a classificação do CAP segundo norma da ANP (2005).

Tabela 1: Classificação dos cimentos asfálticos de petróleo segundo a norma regulamentadora 03/2005 da ANP

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
<b>Viscosidade Saybolt-Furol</b>							
a 135 °C, mín.		192	141	110	80		
a 150 °C, mín.	s	90	50	43	36	NBR 14950	E 102
a 177 °C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
<b>Viscosidade Brookfield</b>							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150 °C, mín.		203	112	97	81		
a 177 °C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor, mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25 °C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
<b>Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos</b>							
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.(*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Bernucci et al (2008, p. 61)



### 1.1.2 Ligantes asfálticos modificados com polímero

Ligantes asfálticos modificados tem seu conceito e tecnologia originados da necessidade de melhoria de desempenho e durabilidade dos pavimentos, com consequente aumento de sua vida útil. Uma forma de aperfeiçoar esta durabilidade e pela otimização de suas propriedades reológicas. Isso pode ser obtido a partir do uso de modificadores das suas propriedades e o principal tipo de modificador são os materiais poliméricos (KALANTAR *et al.*, 2012).

Desde o início da introdução dos ligantes asfálticos modificados por polímero (AMP) na indústria de pavimentos, pesquisadores tem utilizado quase todos os tipos de polímeros disponíveis. Todavia, os polímeros precisam atender a uma longa lista de requisitos incluindo adequadas propriedades mecânicas, economia, estabilidade a estocagem e temperatura de compactação compatível com os processos e máquinas de construção de pavimentos (Negrão 2006).

Dadas essas limitações, e em contraste com a grande variedade de polímeros disponíveis no mercado, apenas um pequeno número é utilizado na indústria da pavimentação. 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).

Ambas as vantagens e desvantagens dos AMPs tem sido analisadas. Por um lado, tem-se concluído que a modificação do polímero resulta em algumas propriedades melhoradas de asfalto, tais como melhor recuperação elástica, maior resistência a fissuração a baixa temperatura e uma maior resistência ao amolecimento em altas temperaturas (TAYFUR *et al.*, 2007; GORKEM *et al.*, 2009; ALATAS e YILMAZ, 2013; JASSO *et al.*, 2015; XIAO *et al.*, 2014). A Tabela 2 apresenta a caracterização dos tipos de AMP's.

Tabela 2: Características dos diversos tipos de AMP

TIPO					
Grau (Ponto de amolecimento mín./ Recuperação elástica a 25°C mín.) (°C/%)	Método ABNT	50/65	55/75	60/85	65/90
Ensaio na amostra virgem					
Penetração 25°C, 5s, 100g, 0,1mm	NBR 6576	45-70	45-70	40-70	40-70
Ponto de amolecimento, mín., °C	NBR 6560	50	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 RPM, máx., cP	NBR 15184	1500	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 RPM, máx., cP	NBR 15184	1000	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 RPM, máx., cP	NBR 15184	500	1000	1000	1000
Ponto de fulgor, mín., °C	NBR 11341	235	235	235	235
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15165	5	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, mín., %	NBR 15086	65	75	85	90
Recuperação elástica a 4°C, 10cm, %	NBR 15086	Anotar	anotar	anotar	Anotar
Ensaio no resíduo após RTFOT					
Variação de massa, máx., %	NBR 15235	1	1	1	1
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	6	7	7	7
Redução do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	3	5	5	5
Porcentagem de penetração original, mín.	NBR 6576	60	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	NBR 15086	80	80	80	80

Fonte: Bernucci et al (2008, p. 70)

## 2.2 Agregados

Woods (1960) define agregado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usados em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc.

Todos os revestimentos asfálticos constituem de ligantes asfálticos, agregados e, em alguns casos, de agentes complementares. Para isso, deve-se conhecer e selecionar as propriedades que os agregados devem conter. ABNT NBR 9935/2005, que determina a terminologia dos agregados. Uma vez associados com ligantes asfálticos, como parte de uma estrutura de pavimento, seu desempenho deve ser considerado em termos de tempo em engenharia, que em obras de pavimentação é medido em anos ou décadas (BERNUCCI et al, 2008, p. 115).

Antes da utilização do agregado para uma determinada função é preciso conhecer todas as informações possíveis tais como: o tipo de rocha, sua composição mineralógica, sua

composição química, sua granulação, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

Ainda para o Bernucci et al (2008), os agregados utilizados para a pavimentação podem ser divididos em três grupos, de acordo com sua natureza, seu tamanho e sua distribuição de grãos.

Quanto à sua natureza, podem ser subdivididos em: natural, artificial e reciclado.

- Natural: Ocorrem através de todas as fontes naturais possíveis, sendo extraídos através de detonações, escavações, dragagens, etc. Como exemplo, pode-se citar: areia, britas, seixos e pedregulhos;
- Artificial: Podem ser tanto resíduos de processos industriais como fabricados para atingir alto desempenho. Escória de alto-forno e argila expandida são citados como exemplo;
- Reciclado: Este tipo de agregado provém de reutilização de materiais. Atualmente, o emprego de reciclagem de pavimentos asfálticos vem ganhando espaço em obras de infraestrutura, assim como a utilização de resíduos gerados pela construção civil.

Quanto ao seu tamanho, DNIT 031 (2006) subdivide-os em: graúdo, miúdo e material de enchimento (fíler).

- Graúdo: São os materiais com granulometria superior a 2,0mm. É o caso de britas, seixos e cascalhos;
- Miúdo: São os materiais com granulometria entre 0,075mm e 2,0mm. Areias e pó de pedra são exemplos desde agregado;
- Material de enchimento (fíler): Este material possui pelo menos 65% de suas partículas inferiores a 0,075mm. É representado pela cal hidratada e cimento *portland*, dentre outros.

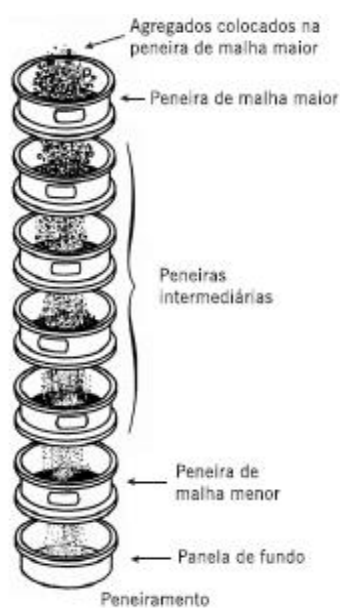
Quanto à distribuição de grãos:

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc (Bernucci et al, p. 121).

A distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Nessa análise uma amostra seca de agregado é fracionada

através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores, conforme ilustrado na Figura 1. Uma vez que a massa da fração de partículas retida em cada peneira é determinada e comparada com a massa total da amostra, a distribuição é expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira especificada na Tabela 3.

Figura 1: Distribuição granulométrica



Fonte: Bernucci et al (2008, p. 121)

Tabela 3 - Especificações das peneiras

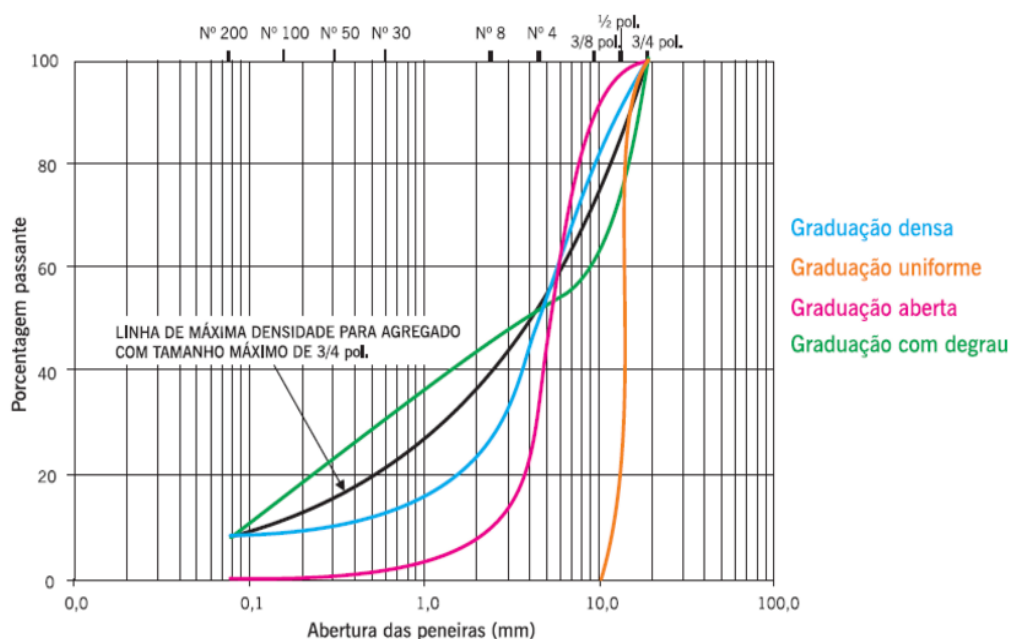
Dão da peneira		Abertura da peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,00mm		75,00	3,0
50,0mm		50,00	2,0
37,5mm		37,50	1,5
25,0mm		25,00	1,0
19,0mm		19,00	0,75
9,5mm		9,50	0,375
4,75mm	4	4,75	0,187
2,36mm	8	2,36	0,0937
2,00mm	10	2,00	0,0789
1,18mm	16	1,18	0,0469
600 $\mu$ m	30	0,60	0,0234
425 $\mu$ m	40	0,43	0,0168
300 $\mu$ m	50	0,30	0,0117
150 $\mu$ m	100	0,15	0,0059
75 $\mu$ m	200	0,08	0,0029

Fonte: Bernucci et al (2008, p. 121)

Bernucci et al (2008) diz que uma vez que a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas mais importantes características físicas, a subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na distinção de tipos de misturas asfálticas. A seguir são denominadas as mais importantes graduações, ilustradas na Figura 2.

- **Agregado de graduação densa ou bem-graduada:** é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima;
- **Agregado de graduação aberta** é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios. Nas frações de menor tamanho a curva granulométrica é abatida e próxima de zero;
- **Agregado de graduação uniforme:** é aquele que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme;
- **Agregado com graduação com degrau ou descontínua** é aquele que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias. São agregados que devem ser adequadamente trabalhados quando em misturas asfálticas, pois são muito sensíveis à segregação.

Figura 2 - Representação convencional das curvas granulométricas



Fonte: Bernucci et al (2008, p. 123)

## **2.3 Misturas asfálticas**

A busca em produzir misturas com maior economia, com menos impactos ambientais e que aumente cada vez mais a vida útil do pavimento fez com que pesquisadores elaborassem novos métodos de fabricação de misturas asfálticas mantendo as mesmas propriedades mecânicas das misturas convencionais.

### **2.3.1 Misturas asfálticas a quente**

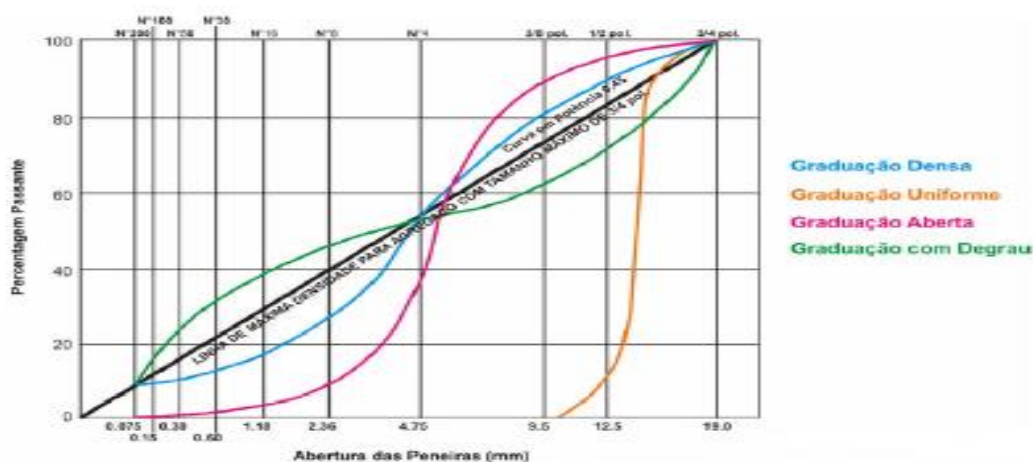
Com o crescente volume de tráfego nas rodovias e o conseqüente aumento nos esforços transmitidos aos pavimentos, a camada de revestimento deve receber maior atenção já que é ela a que recebe diretamente todo o esforço aplicado. Portanto, as principais características para o bom desempenho de um revestimento, citadas por Bernucci et al. (2008, p. 157), são “[...] impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local.”.

O agregado mineral representa cerca de 90 a 95% em peso e 75 a 85% em volume em misturas asfálticas. Esse material tem grande influência no desempenho dos pavimentos, e principalmente, quanto à capacidade de suporte de cargas. Para a escolha adequada de um agregado é importante que se conheçam as propriedades geológicas da rocha de origem. Bernucci et al. (2008, p. 116), por exemplo, salientam a composição mineralógica, composição química, sua granulação, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

As misturas asfálticas a quente convencionais podem ser classificadas pela graduação dos agregados em densa (ou bem graduada), aberta, descontínua (ou com degrau), e uniforme.

A figura 3 apresenta exemplos de curvas granulométricas de agregados usados na composição de misturas asfálticas a quente.

Figura 3 - Representação de curvas granulométricas pelo SHRP-Superpave



Fonte: Bernucci et al (2008, p. 123).

No fim dos anos 1950, Bruce Marshall desenvolveu o método de dosagem de misturas asfálticas, conhecido como dosagem Marshall. Esse método prevê a quantidade ótima de ligante a ser utilizada e emprega o impacto como forma de compactação da amostra de mistura asfáltica. No Brasil, o método Marshall é usado como critério na dosagem de misturas asfálticas para pavimentação.

O *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, programa de pesquisa dos Estados Unidos desenvolveu o método de dosagem *SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements)* para minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade devido às evidentes deformações permanentes prematuras presentes em várias rodovias americanas na década de 80 (KENNEDY et al., 1994).

Por estes motivos e principalmente pelo histórico de sucessos, o compactador giratório acabou tornando-se a maneira mais eficiente de compactar misturas asfálticas em laboratório, sendo atualmente o principal método de dosagem de misturas asfálticas nos Estados Unidos.

A aplicação do sistema *SUPERPAVE* depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia. Durante o desenvolvimento do programa *SHRP* foram propostos três níveis de projeto para dosagem de misturas asfálticas. Estes níveis foram numerados de um a três em ordem crescente de complexidade de acordo com a importância do pavimento projetado (KENNEDY et al., 1993).

No Brasil o método de dosagem *SUPERPAVE* vem sendo bastante estudado no campo acadêmico. Existem algumas diferenças importantes entre seus métodos, a principal delas é a

forma de compactação. Na dosagem Marshall a compactação é realizada por impacto, enquanto que na *SUPERPAVE* esta é por amassamento. Quanto a granulometria, a metodologia SUPERPAVE usa uma modificação da maneira tradicional do Marshall, por meio dos conceitos de pontos de controle e zonas de restrição para a curva granulométrica. As zonas de restrições servem como recomendações e não como especificações a serem seguidas. Alguns pesquisadores questionam a necessidade da zona de restrição, quando a mistura asfáltica atende as propriedades volumétricas nos seus três níveis de compactação: inicial, projeto e máximo; (LIMA et al., 2003).

### **2.3.2 Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)**

A mistura asfáltica mais utilizada no Brasil é o concreto asfáltico (CA) ou também chamado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Segundo Bernucci et al. (2008, p. 158), “Trata-se do produto da mistura conveniente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.”.

Segundo as definições de Balbo (2007, p. 168-170) o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é:

[...] um material para construção de revestimentos de pavimentos, incluindo as capas de rolamento e camadas de ligação imediatamente subjacentes aos revestimentos, obtido a partir da mistura e homogeneização de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), em geral bem graduados, de material fino de enchimento – filer (pó-de-pedra, finos calcários ou cimento Portland) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Trata-se de uma mistura elaborada a quente, em usina misturadora (central de usinagem), contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte.

Na produção do CA os agregados devem ser corretamente dosados e estarem perfeitamente secos antes da usinagem. Além da secagem, os agregados são aquecidos a uma temperatura compatível para que, quando misturados, fiquem na temperatura ideal próxima a 140 a 145°C (BALBO, 2007, p. 177).

A temperatura de aplicação em pista depende de muitos fatores, entre eles, distância da usina até o local de aplicação, as condições climáticas no dia, a proteção do material até local, etc. Com todas essas variações, é necessário fazer a verificação por meio de controle no caminhão basculante. Caso houver modificação na viscosidade, pode-se perder todo o material devido às mudanças nas características da mistura.

Suas propriedades são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico sendo que uma pequena variação para mais ou para menos, ainda dentro do admissível, pode acarretar



problemas de deformação permanente por fluência e exsudação ou enfraquecimento da mistura e da resistência à formação de trincas (BERNUCCI et al., 2008, p. 162). Deve-se considerar uma faixa de 3 a 5% de vazios para camadas de rolamento e de 4 a 6% de vazios para camadas de ligação. Caso não se tenha esse cuidado, a mistura asfáltica deixa de ser estável ao tráfego e, por fluência, deformam-se significativamente (BERNUCCI et al., 2008, p. 162). A Tabela 4 apresenta as faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT.

Tabela 4 - Granulometria e percentual de ligante asfáltico em relação às faixas de misturas

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100			
1 1/2"	38,1	95--100	100		± 7%
1"	25,4	75--100	95--100		± 7%
3/4"	19,1	60--90	80--100	100	± 7%
1/2"	12,7			80--100	± 7%
3/8"	9,5	35--65	45--80	70--90	± 7%
Nº 4	4,8	25--50	28--60	44--72	± 5%
Nº 10	2	20--40	20--45	22--50	± 5%
Nº 40	0,42	10--30	10--32	8--26	± 5%
Nº 80	0,18	5--20	8--20	4--16	± 3%
Nº 200	0,075	1--8	3--8	2--10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0-7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5-7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5-9,0 Camada de rolamento	± 3%

Fonte: DNIT (2006b, p. 5)

Devem ser respeitados, também, os limites de resistência à tração e percentual de vazios da mistura, conforme indicação da Tabela 6:

Tabela 5 - Valores limites para características das misturas

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação (binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75-82	65-72
Estabilidade, mínima. (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 183	0,65	0,65

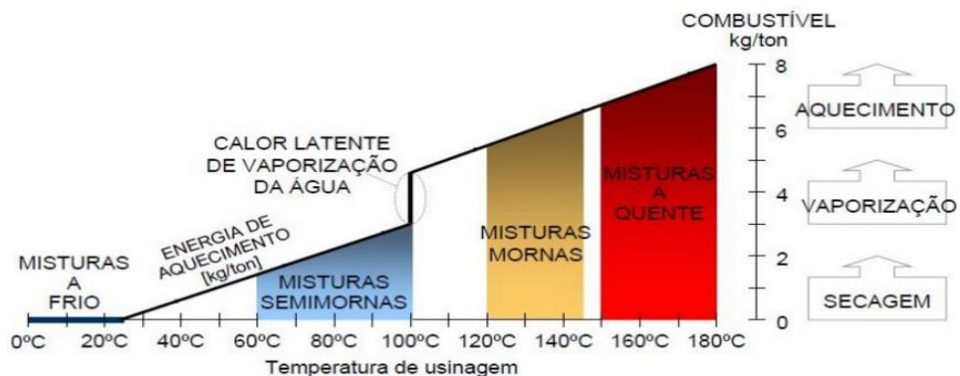
Fonte: DNIT (2006b, p. 5)

Todas as misturas asfálticas descritas anteriormente são caracterizadas como misturas asfálticas a quente, tanto na produção em usina como na compactação em pista. São produzidas a altas temperaturas para garantir “[...] a secagem dos agregados, cobrirem-los com o ligante asfáltico, alcançar as condições de trabalhabilidade, e fornecer tempo suficiente para a compactação desta mistura em campo” (NAKAHARA et al., 2010a, p.1).

A execução da mistura deve respeitar às condições estabelecidas pela especificação, quanto à temperatura de usinagem. A temperatura do ligante varia de acordo com o material escolhido, uma vez que se determina a temperatura ideal baseando-se na relação temperatura-viscosidade. A faixa adequada é de 75 a 150 SSF "Saybolt-Furol", estando preferencialmente em um intervalo entre 75 a 95 SSF. O ligante não deve ter sua temperatura inferior a 107°C e nem superior a 177°C. O aquecimento dos agregados deve superar a temperatura do ligante em 10°C até 15°C, não podendo ultrapassar o 177°C (DNIT 031, 2006).

A figura 4 apresenta uma classificação das misturas asfálticas quanto a temperatura de produção

Figura 4 - Classificação asfálticas em função da temperatura de produção de misturas



Fonte: MOTTA, 2011 adaptada de D'Angelo et al., 2008

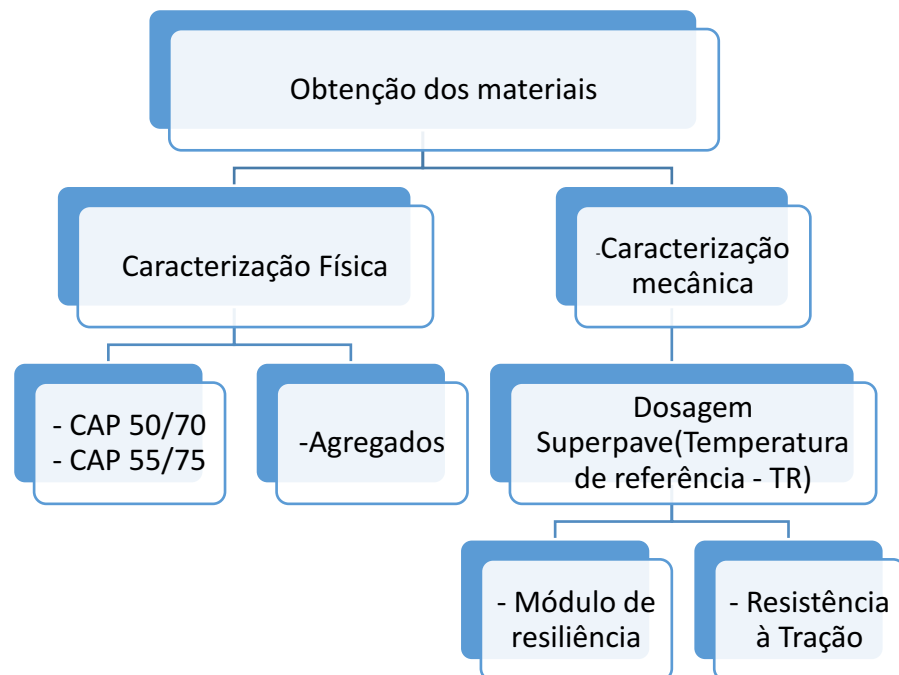
### 3. METODOLOGIA

O estudo teve como base entender o comportamento de uma mistura asfáltica com relação ao módulo de resiliência com a variação da temperatura. Os ensaios foram feitos na UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), no LEP (Laboratório de Engenharia de Pavimentos) na cidade de Campina Grande – PB. Determinou-se em laboratório as seguintes propriedades mecânicas das misturas asfálticas:

- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de resiliência;

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da *ASTM* (*American Society for Testing Materials*), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (*AASHTO*). A metodologia adotada está representada no Fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma



Fonte: Autor (2017)

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Ligante asfáltico

Os ligantes asfálticos utilizados na pesquisa foram o 50/70, que é o tipo de ligante asfáltico utilizado na região Nordeste, com caracterização física apresentada na Tabela 6 e o ligante 55/75, com característica física apresentada na Tabela 7.

Tabela 6 - Caracterização do CAP 50/70

Característica	Ligante Puro	Limites	Norma
Penetração (0,1mm)	52	50-70	NBR-6576
Ponto de amolecimento (°C)	48	46 (mín)	NBR-6560
Viscosidade rotacional 135°C (cp)	435	274 (mín)	NBR-15184
Viscosidade rotacional 150°C (cp)	215	112 (mín)	NBR-15184
Viscosidade rotacional 177°C (cp)	78	57-285	NBR-15184

Tabela 7 - Caracterização do CAP 55/75

Característica	Ligante Puro	Limites	Norma
Penetração (0,1mm)	62	50-70	NBR-6576
Ponto de amolecimento (°C)	48	46 (mín)	NBR-6560
Viscosidade rotacional 135°C (cp)	788,75	274 (mín)	NBR-15184
Viscosidade rotacional 150°C (cp)	383,5	112 (mín)	NBR-15184
Viscosidade rotacional 177°C (cp)	137,5	57-285	NBR-15184

#### 3.1.2 Agregados

O agregado usado na confecção da mistura asfáltica foi cedido por GAMA (2016). Para as misturas de concreto asfáltico foram utilizados Brita #19, Brita #9.5, Areia, Pó de Pedra e Fíller (cal hidratada) da região de Campina Grande - PB.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados segundo as normas descritas na Tabela 8.

A Tabela 9 apresenta a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos agregados.

Tabela 8 - Ensaio de caracterização

Ensaio	Norma
Granulometria por peneiramento	DNIT-ME 083/98
Massa específica e absorção do agregado graúdo	DNIT-ME 081/98
Massa específica e absorção do agregados miúdo	NBR NM 52/2002
Absorção	DNIT-ME 081/98
Abrasão Los Angeles	DNIT-ME 035/98
Índice de forma DNIT-ME 086/94	DNIT-ME 086/94

Fonte: (Gama, 2016)

A Figura 6 está representada a curva granulométrica após os ensaios de caracterização dos agregados.

Figura 6 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados

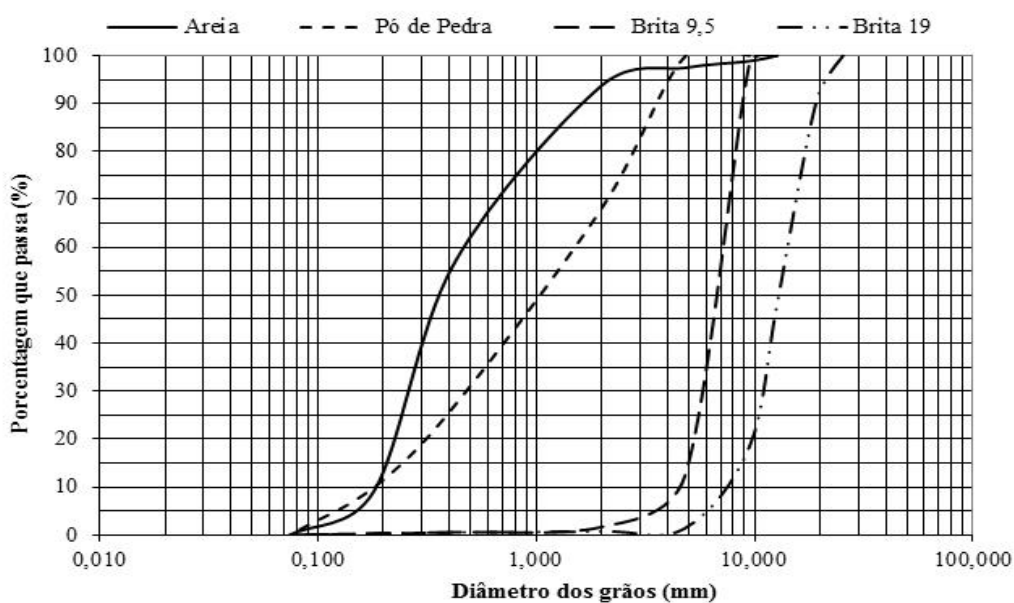


Tabela 9 - Distribuição granulométrica por peneiramento dos agregados

Diâm. (mm)	% Passa			
	Areia	Pó de pedra	Brita nº9,5	Brita nº19
25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
19,10	100,00	100,00	100,00	90,03
12,70	100,00	100,00	100,00	48,30
9,50	98,87	100,00	98,52	18,53
4,80	97,46	99,81	12,37	1,39
2,00	93,79	68,20	1,68	0,75
0,42	56,57	26,80	0,56	0,52
0,18	9,01	9,88	0,27	0,29
0,07	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: (Gama, 2016)

Na Tabela 10 estão inseridos os valores de massa específica real e aparente, e absorção dos agregados.

Tabela 10 - Massas específicas aparente, real e absorção dos agregados

Agregado	Massa específica aparente (Gsb) (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica real (Gsa) (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Índice de forma	Abrasão los angeles (%)
Brita #19	2,64	2,68	0,54	0,86	37,06%
Brita #9,5	2,64	2,72	0,44	0,75	44,50%
Areia	2,30	2,32	0,30	-	-
Pó de pedra	2,26	2,25	0,24	-	-

Fonte: (Gama, 2016)

### 3.2 Métodos

Para a realização do presente estudo foram confeccionados 2 tipos de misturas asfálticas:

Mistura asfáltica com CAP 50/70;

Mistura asfáltica com AMP 55/75;

As misturas asfálticas foram compactadas na mesma temperatura de 160°C. Para a obtenção dos resultados foram produzidos 5 (cinco) corpos de provas de cada tipo de mistura, totalizando 10 corpos de provas. Conforme a relação abaixo:

- 2 Corpos de provas com CAP 50/70 para o ensaio de resistência à tração;
- 3 Corpos de provas com CAP 50/70 para o ensaio de módulo de resiliência;
- 2 Corpos de provas com AMP 55/75 para o ensaio de resistência à tração;
- 3 Corpos de provas com AMP 55/75 para o ensaio de módulo de resiliência;

O projeto atende a Faixa C do DNIT, seguindo sua especificação 031/2006. O teor ótimo do ligante CAP 50/70 e do AMP 55/75 e a porcentagem de cada ligante estão representado nas tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11: Mistura AMP 55/75

TEOR 5,5% CAP					
BRITA 19	BRITA 9,5	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
19,85%	24,57%	13,23%	34,97%	1,89%	5,50%
238,14g	294,84g	158,76g	419,58g	22,68g	66g

Fonte: Gama (2016)

Tabela 12: Mistura CAP 50/70

TEOR 5,0% CAP					
BRITA 19	BRITA 9,5	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
19,95%	24,70%	13,30%	35,15%	1,90%	5,00%
239,4g	293,4g	159,6g	421,80g	22,80g	60g

Fonte: Gama (2016)

### 3.2.1 Separação do agregado

Inicialmente, os agregados extraídos da pedreira foram peneirados e separados em 8 diferentes faixas granulométricas, conforme GAMA (2016). De acordo com DNER-ME 043 (1995), o peso final do corpo de prova deve ficar próximo à 1.200,00 g.

Realizou-se na sequência a pesagem e a separação granulométrica de cada uma das frações de agregados a serem utilizadas para a moldagem de 1 corpo de prova de cada vez, mantendo-as em recipientes separados. Nas Figuras 7 e 8 estão representados os agregados

utilizados nesta pesquisa que foram a brita 19mm, brita 9,5mm, areia, pó de pedra e cal hidratada.

Figura 7 - Composição granulométrica



Fonte: (Souza, 2017)

Figura 8 - Filler utilizado (cal hidratada)



Fonte: (Souza, 2017)



Para a mistura do agregado com o ligante utilizou-se o recipiente apresentado na Figura 9. Colocado na estufa, o recipiente recebeu os agregados a uma temperatura de 170°C, respeitando a exigência da especificação, a qual estabelece que esta temperatura esteja aproximadamente entre 10°C e 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante, não podendo ultrapassar os 177°C.

Figura 9 - Mistura do agregado com ligante



Fonte: Autor (2017)

Para o aquecimento do ligante, adotou-se a temperatura de 160°C, respeitando a temperatura de aquecimento adequada, não ultrapassando o tempo de 1 hora de aquecimento. Devidamente dosado para a realização de 1 corpo de prova por vez, o ligante foi mantido em recipiente fechado.

Para a adição do ligante na mistura, abriu-se uma cratera para o recebimento do mesmo, pesando-o instantaneamente.

Efetou-se então a mistura rapidamente, conforme indicado na especificação, respeitando um intervalo de 2 a 3 minutos, até que todos os agregados estivessem devidamente envoltos pelo ligante.

Com a mistura pronta, iniciou-se o processo de moldagem e compactação do corpo de prova. A fim de simular o envelhecimento de curto prazo da mistura asfáltica durante o período da usinagem, manteve-se a mistura asfáltica por 2 horas dentro de uma estufa, utilizando a mesma temperatura em que a mistura seria posteriormente compactada, adotando o

procedimento Superpave (2001). Para que a mistura asfáltica não perdesse bruscamente a sua temperatura no instante da compactação, inseriu-se na estufa, junto da mistura, o molde de compactação para ser também aquecido.

Após 2 horas, colocou-se o molde na posição correta no suporte de compactação e introduziu-se no seu fundo uma folha de papel filtro do mesmo tamanho da seção do molde. Logo em seguida, adicionou-se a mistura no molde de uma só vez,

Cada corpo de prova foi removido do molde cuidadosamente após sua compactação, sendo colocado sobre uma superfície lisa e plana, mantendo-os em repouso por 12 horas, à temperatura ambiente.

Após a moldagem dos 10 corpos de prova, realizou-se primeiramente, a aferição das dimensões de cada corpo de prova. Esta é necessária uma vez que o corpo de prova pronto deve apresentar altura de 63,50 mm, sendo admissível uma variação de 1,3 mm tanto para mais quanto para menos.

De acordo com a Figura 10, as dimensões foram aferidas através da utilização de um paquímetro. Conforme exigido pela especificação, mediu-se os corpos de prova em 4 diferentes pontos, tanto em relação a altura, quanto ao diâmetro. Obteve-se os valores finais através do cálculo da média dos valores encontrados.

Figura 10: Medição do corpo de prova



Fonte: Autor (2017)

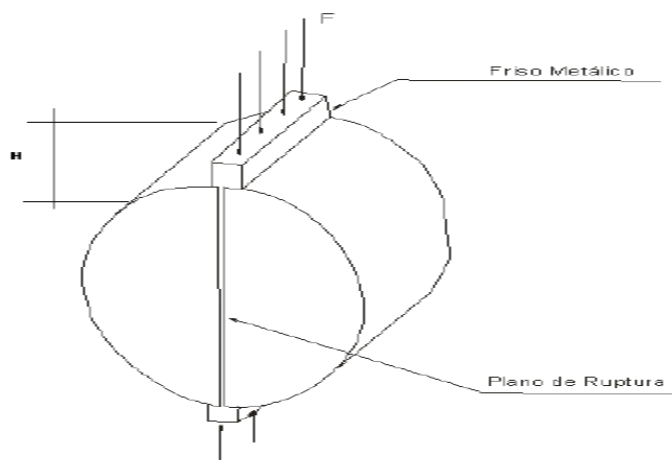
### 3.2.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Para o controle da qualidade da mistura, a especificação DNIT 031 (2006) estabelece que seja realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A especificação DNIT 036 (2010) determina os critérios para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Conforme já mencionado, antes da realização do ensaio aferiu-se a altura e o diâmetro dos corpos de prova.

Em seguida, é colocada em posição horizontal, repousando, segundo uma geratriz, sobre o prato inferior da prensa. Verifica-se visualmente a retilidade das geratrizes de contato com ambos os pratos. Ajustou-se os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter em posição o corpo-de-prova. A Figura 11 indica o posicionamento do corpo de prova no ensaio, bem como o ponto de ruptura do mesmo.

Figura 11: Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: DNIT (2010, p. 3)

Após o posicionamento correto, aplicou-se uma carga progressiva no corpo de prova, com velocidade de deformação de 0,80 mm/s. A especificação permite uma variação de 0,01 mm/s tanto para mais quanto para menos. A carga foi aplicada até o momento de ruptura do corpo de prova. A Figura 12 demonstra o ensaio realizado, enquanto a Figura 13 apresenta o corpo de prova rompido.

Figura 12: Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Autor (2017)

Figura 13 - Corpo de prova rompido



Fonte: Autor (2017)

Com o valor obtido no ensaio calculou-se a resistência à tração, através da seguinte Equação (1):

$$\sigma_R = \frac{2xF}{100xDxHx\pi} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_R$ : resistência à tração, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

### 3.2.3 Determinação do módulo de resiliência

Segundo Ponte *et al.* (2014), o MR é análogo ao módulo de elasticidade (E), sendo ambos definidos pela teoria da elasticidade. De acordo com DNER 133 (1994), o módulo de resiliência é definido como:

A relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável ( $\epsilon_t$ ) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T).

O módulo de resiliência é expresso pela Equação (2).

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (2)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência

$\sigma_t$ : tensão de tração;

$\epsilon_t$ : deformação específica recuperável.

Primeiramente posicionou-se o corpo de prova no interior do suporte para fixação dos transdutores. Em seguida, colocou-se o corpo de prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos. É necessário sempre fixar e ajustar os transdutores de modo a se obter o registro no oscilógrafo, observando o perfeito encaixe das partes. As Figuras 14 e 15 representam a realização do ensaio, com o corpo de prova já posicionado no equipamento.

Figura 14: Ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Autor (2017)

Figura 15: Ensaio módulo de resiliência



Fonte: Autor (2017)

Aplicou-se uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito da história de tensões no valor do módulo de resiliência. A frequência das cargas repetidas é de 1 Hz (60 ciclos por minuto) e a duração é de cerca de 0,10 segundo.

A partir dos valores obtidos utilizou-se a Equação (3) para calcular o módulo de resiliência.

$$MR = \frac{100}{100 \times \Delta H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência, em MPa;

F: carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova, em N;

$\Delta$ : deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F), em cm;

H: altura do corpo-de-prova, em cm;

$\mu$ : coeficiente de Poisson.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos através da realização dos ensaios são apresentados a seguir, através de tabelas e gráficos, contemplando a análise das propriedades mecânicas das misturas asfálticas confeccionadas, sendo resistência à tração diametral e módulo de resiliência.

##### 4.1 Resultado Resistência à tração diametral

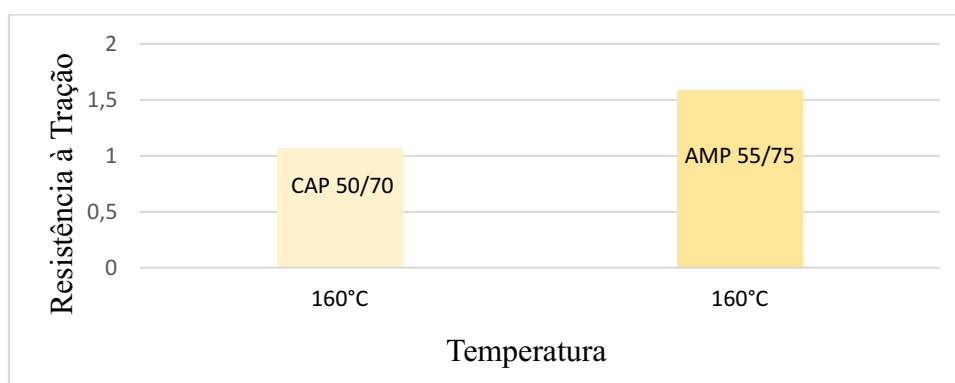
Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral apresentam-se na Tabela 13 e Figura 16.

Tabela 13 - Resistência à tração

Ligante	Temperatura (°C)	Resistência à Tração (MPa)
CAP 50/70	160	1,07
AMP 55/75	160	1,60

Fonte: Autor (2017)

Figura 16 Resistência à tração x Temperatura



Fonte: Autor (2017)

Os corpos de prova compostos por mistura asfáltica com AMP 55/75 apresentam-se, de um modo geral, mais resistentes à tração do que os compostos por mistura asfáltica com CAP



50/70, correspondendo à Bernucci et al (2008) que relaciona o aumento da resistência à tração do pavimento como um dos benefícios provenientes da utilização dos asfaltos modificados por polímero. Em todas as situações a resistência à tração ultrapassa a exigida pela especificação DNIT 031(2006) que é de no mínimo 0,65 MPa, tanto para a camada de ligação (*binder*) como também para a camada de rolamento.

#### 4.2 Resultado módulo de resiliência

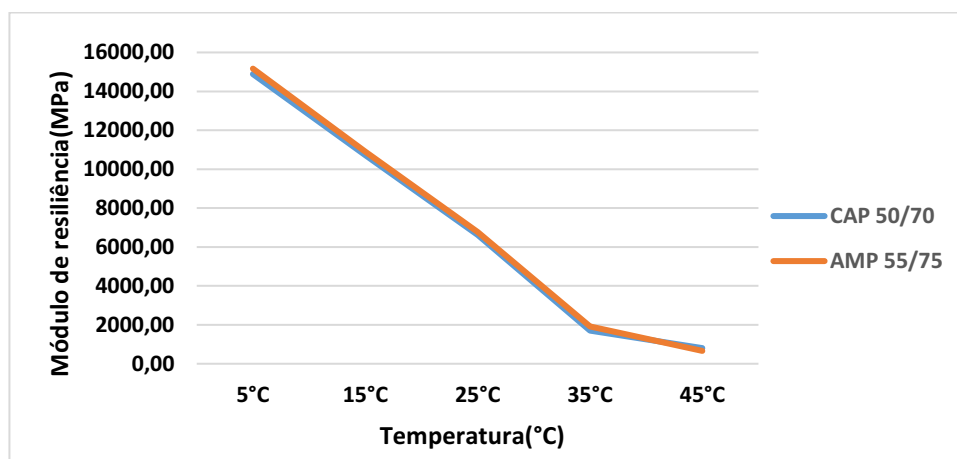
Os resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência apresentam-se na Tabela 14 e Figura 17.

Tabela 14: Módulo de resiliência x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Módulo de resiliência (MPa)	
		ASTM	NBR
CAP 50/70	5	13394,64	14887,67
	15	7560,33	10717,00
	25	4466,00	6621,33
	35	1110,00	1699,67
	45	548,33	803,67
CAP 55/75	5	13533,33	15167,33
	15	9272,00	10908,33
	25	4641,00	6768,33
	35	1238,00	1922,67
	45	432,00	661,00

Fonte: Autor (2017)

Figura 17: Módulo de resiliência x Temperatura



Fonte: Autor (2017)

Examinando os resultados obtidos através do ensaio de módulo de resiliência, através da Tabela 14 e da Figura 17, verifica-se certa semelhança em relação aos resultados obtidos pelo ensaio de RT, uma vez que o MR diminui à medida que a temperatura de realização do ensaio aumenta. Porém, através da bibliografia apresentada, tem-se o conhecimento de que um módulo de resiliência alto, não representa necessariamente a excelência de um pavimento. Ao contrário, um MR muito acima do normal evidencia uma mistura muito rígida, passível de danos que podem ser causados pela instabilidade do subleito. Esta instabilidade se associada a esta rigidez do revestimento, não permite que este atue de forma adequada pela ausência de flexibilidade, causando o seu rompimento, o qual pode ser ligeiramente percebido através do aparecimento de trincas.

Os resultados indicam que as misturas asfálticas compactadas à 160°C, apresentam MR muito acima do convencional. Para Bernucci et al (2008), as misturas asfálticas que possuem módulo de resiliência entre 12.000 e 20.000 MPa, tem seu módulo considerado elevado, caracterizando a estrutura do pavimento como um pavimento semi-rígido em relação a sua deformabilidade.

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O estudo possibilitou a análise da vida útil do pavimento e das propriedades mecânicas, sendo feita a análise do comportamento das misturas convencionais e com adição de polímero, utilizando os ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75.

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, pôde-se chegar a uma série de conclusões:

- i- A resistência à tração das misturas asfálticas feitas com AMP 55/75 são quase 50% maiores que as misturas asfálticas feitas com CAP 50/70;
- ii- O módulo de resiliência diminui com o aumento da temperatura, tanto na mistura com CAP 50/70 como no AMP 55/75.
- iii- A altas temperaturas o MR aumenta muito tornando a estrutura do pavimento semi-rígida; Devendo as camadas subsequentes serem bem dimensionadas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. 2014. Disponível em <[http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/12571/Relatorios\\_de\\_Pesquisa\\_\\_RDT.html](http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/12571/Relatorios_de_Pesquisa__RDT.html)>. Acesso em: 29 mai. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABTN, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16273: Misturas asfálticas - Propriedades volumétricas de concreto asfáltico**. Rio de Janeiro: ABTN, 2014.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ABEDA, 2008.
- BIANCHI, F. R.; BRITO, I. R. T.; CASTRO, V. A. B. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Espírito Santo, 2008.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 035: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Especificação de Material**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 385: Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero**. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNER, 1999.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 117: Mistura betuminosa - determinação da densidade aparente. Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 133: Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência. Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005 - TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. Terminologia. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095 - EM: Cimentos asfálticos de petróleo. Especificação de Material**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** 3ª ed. IPR. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

CERATTI, J. A. P et al. **Estudo de misturas asfálticas mornas.** Estudo laboratorial das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. Porto Alegre, 2007.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

FONSECA, L. F. da S. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.** Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV.** Rio de Janeiro, 2007.

GAMA, D. A. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos.** Tese de doutorado (Doutorado em engenharia de materiais) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) – Campina Grande – PB. 165p.

KALANTAR, Z, N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. **Construction and Building Materials**, Volume 33, August 2012, Pages 55-62.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho.** Rio de Janeiro, 2014.

MARQUES, G. L. de O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** Rio de Janeiro, 2004.

NEGRAO, A. P. **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do tipo RET para Aplicação em Pavimentos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PINTO, S; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro: Synergia, 2010.

SOARES, J. B; SILVEIRA, M. A; MOTTA, L. M. G. **O efeito da temperatura e do grau de compactação nas propriedades das misturas asfálticas.** 2001.

SOUZA, T. M. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do ccbt.** Monografia (Graduação em engenharia civil) – Universidade Federal de Campina Grande(UFCG) – Campina Grande – PB. 67p.