

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO SOBRE A COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
EM DIFERENTES TEMPERATURAS**

Gabriela Thaís Lehen

Lajeado, junho de 2015.

Gabriela Thaís Lehen

## **ESTUDO SOBRE A COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, junho de 2015.

Gabriela Thaís Lehen

## **ESTUDO SOBRE A COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos -  
orientador  
Centro Universitário UNIVATES

Eng. Civil Me. Adriano Pereira  
Conpasul Construção e Serviços Ltda.

Eng. Civil Luciano Faustino da Silva  
Superintendente da 11ª Superintendência  
Regional DAER - Lajeado

Lajeado, junho de 2015.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência da temperatura de compactação de misturas asfálticas em relação ao seu desempenho, simulando a aplicação destas misturas em obras de pavimentação fora da sua temperatura ideal. O estudo contemplou a moldagem e a compactação de corpos de prova em temperaturas de 100°C, 130°C e 160°C, aplicando energia de compactação de 75 golpes por face, em misturas asfálticas convencionais e com adição de polímero, utilizando os ligantes asfálticos CAP 50/70 e Flexpave 55/75, respectivamente. Para a obtenção dos resultados, realizou-se a determinação das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas, além da análise da relação da vida útil do pavimento com as diferentes temperaturas de compactação. As propriedades volumétricas deram-se através da obtenção da densidade aparente, do grau de compactação e do volume de vazios. Já as propriedades mecânicas foram obtidas com a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência. Por fim, utilizou-se o programa SisPav para a verificação do comportamento de um determinado pavimento, possibilitando a análise da influência da temperatura de compactação na duração da sua vida útil. Os resultados permitiram concluir que as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas sofrem incidência direta da temperatura de compactação das mesmas. Isto porque a elevação da temperatura proporciona uma melhor compactação da mistura, aumentando sua densidade, grau de compactação e conseqüentemente, reduzindo o seu volume de vazios. Além disso, o aumento da temperatura resulta em uma maior resistência à tração e um maior módulo de resiliência da mistura asfáltica. Quanto à vida útil do pavimento, a temperatura de compactação incide diretamente sobre esta, proporcionando reduções de até 90% no seu valor quando as misturas são compactadas abaixo da temperatura ideal.

**Palavras-chave:** Misturas asfálticas. Compactação. Temperatura. Vida útil.

Aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

Meus pais, Airton e Adriana, por todo amor e incentivo durante toda a minha vida.

Meu namorado, Felipe, por todo apoio, paciência, e principalmente por ser um exemplo de dedicação para mim.

Meu professor orientador, Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos, pelo conhecimento repassado e pela disposição em me ajudar sempre que precisei.

E por fim, à Conpasul Construção e Serviços Ltda. por fornecer todo o material necessário para a realização deste trabalho.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de cargas em pavimentos rígidos e flexíveis.....	19
Figura 2 - Esforços em camadas do pavimento .....	20
Figura 3 - Camadas genéricas de um pavimento.....	21
Figura 4 - Classificação de revestimentos.....	22
Figura 5 - Classificação de bases e sub-bases .....	23
Figura 6 - Refinarias Petrobras que produzem asfalto .....	27
Figura 7 - Cimento asfáltico de petróleo (CAP) .....	28
Figura 8 - Polímero utilizado em misturas asfálticas .....	32
Figura 9 - Distribuição granulométrica.....	35
Figura 10 - Localização da pedreira .....	41
Figura 11 - Britas.....	41
Figura 12 - Separação dos agregados .....	47
Figura 13 - Estufa utilizada.....	48
Figura 14 - Separação dos agregados .....	48
Figura 15 - Composição granulométrica.....	49
Figura 16 - Aquecimento dos agregados.....	49
Figura 17 - Adição do ligante asfáltico.....	50
Figura 18 - Execução da mistura.....	51
Figura 19 - Aspecto final da mistura .....	51
Figura 20 - Acomodação da mistura no molde.....	52
Figura 21 - Compactação da mistura .....	53
Figura 22 - Corpos de prova prontos em repouso.....	53
Figura 23 - Medição do corpo de prova.....	54
Figura 24 - Pesagem do corpo de prova seco.....	55

Figura 25 - Pesagem do corpo de prova submerso .....	55
Figura 26 - Pesagem do corpo de prova saturado com a superfície seca .....	56
Figura 27 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico .....	60
Figura 28 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico .....	61
Figura 29 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico .....	61
Figura 30 - Corpos de prova rompidos .....	62
Figura 31 - Ensaio de módulo de resiliência.....	64
Figura 32 - Ensaio de módulo de resiliência.....	64
Figura 33 - Estrutura do pavimento .....	66
Figura 34 - Aba <Estrutura> .....	67
Figura 35 - Aba <Carregamento>.....	67
Figura 36 - Aba <Resultados>.....	68
Figura 37 - Função <Calcular>.....	69
Figura 38 - Comparativo entre a aparência dos corpos de prova de 100°C e 160°C	80

### **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Representação convencional das curvas granulométricas .....	37
Gráfico 2- Densidade x Temperatura .....	72
Gráfico 3 - Densidade x Temperatura .....	73
Gráfico 4 - Grau de compactação x Temperatura .....	74
Gráfico 5 - Grau de compactação x Temperatura .....	75
Gráfico 6 - Volume de vazios x Temperatura .....	76
Gráfico 7 - Volume de vazios x Temperatura .....	77
Gráfico 8 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75 .....	78
Gráfico 9 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70 .....	79
Gráfico 10 - Resistência à tração x Temperatura .....	82
Gráfico 11 - Módulo de resiliência x Temperatura.....	83
Gráfico 12 - Relação MR/RT x Temperatura .....	84
Gráfico 13 - Deflexão x Temperatura .....	85
Gráfico 14 - Tensão de tração x Temperatura.....	86
Gráfico 15 - Deformação de tração x Temperatura .....	87

Gráfico 16 – Vida útil x temperatura .....	88
--	----

### **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Granulometria e percentual de ligante asfáltico em relação às faixas de mistura.....	25
Quadro 2 - Valores limites para características das misturas.....	25
Quadro 3 - Características dos diversos tipos de CAP.....	30
Quadro 4 - Características dos diversos tipos de AMP .....	33
Quadro 5 - Especificações das peneiras .....	36
Quadro 6 - Composição da mistura asfáltica.....	39
Quadro 7 - Especificação da mistura asfáltica .....	39
Quadro 8 - Propriedades finais da mistura .....	40
Quadro 9 - Especificações técnicas do CAP 50/70 .....	42
Quadro 10 - Especificações técnicas do Flexpave 55/75 .....	43
Quadro 11 - Temperaturas convencionais de misturas e compactação - Ligantes asfálticos .....	43
Quadro 12 - Estrutura e características do pavimento .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica de um corpo de prova .....	46
Tabela 2 - Características volumétricas das amostras moldadas - Densidade .....	71
Tabela 3 - Densidade x Temperatura .....	72
Tabela 4 - Grau de compactação x Temperatura .....	74
Tabela 5 - Grau de compactação x Temperatura .....	75
Tabela 6 - Volume de vazios x Temperatura .....	76
Tabela 7 - Volume de vazios x Temperatura .....	77
Tabela 8 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75 .....	78
Tabela 9 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70 .....	79
Tabela 10 - Resistência à tração x Temperatura .....	81
Tabela 11 - Módulo de resiliência x Temperatura .....	83
Tabela 12 - Relação MR/RT x Temperatura .....	84
Tabela 13 - Deflexão x Temperatura .....	85
Tabela 14 - Tensão de tração x Temperatura .....	86
Tabela 15 - Deformação de tração x Temperatura .....	87
Tabela 16 – Vida útil x temperatura .....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ADP - Asfalto Diluído de Petróleo  
AMB - Asfalto Modificado por Borracha  
AMP - Asfalto Modificado por Polímero  
ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres  
ASTM - *American Society for Testing and Materials*  
AR - Agente Rejuvenescedor  
BIT - Banco de Informações e Mapas de Transportes  
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo  
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado à Quente  
cm - centímetro  
cm<sup>2</sup> - centímetro quadrado  
CNT - Confederação Nacional do Transporte  
d - densidade aparente  
D - diâmetro  
DMT - densidade máxima teórica  
DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem  
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
EAP - Emulsão Asfáltica de Petróleo  
F - carga  
G - densidade real  
Gc - grau de compactação  
Gmb - densidade relativa aparente  
Gmm - densidade máxima

H - altura

kgf - quilograma-força

LPAV - Laboratório de Pavimentação

m<sup>3</sup> - metro cúbico

MPa - mega pascal

MR - módulo de resiliência

P - peso do material constituinte

N - newton

RT - resistência à tração

SSF - Saybolt-Furol

t - tonelada

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Vv - volume de vazios

Wd - peso ao ar ou peso seco

Wssd - peso medido na condição saturada de superfície seca

Wsub - peso medido na condição saturada imerso em água

°C - graus Celsius

$\epsilon_t$  - deformação específica recuperável

$\mu$  - coeficiente de Poisson

Y<sub>s</sub> - massa específica obtida em campo

Y<sub>s máx</sub> - massa específica máxima obtida no laboratório

$\sigma_R$  - resistência à tração

$\sigma_T$  - tensão de tração

$\Delta$  - deformação elástica ou resiliente

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Objetivos .....	16
1.1.1	Objetivos gerais .....	16
1.1.2	Objetivos específicos .....	16
1.2	Estrutura do trabalho .....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
2.1	Introdução .....	18
2.2	Conceituação de pavimento .....	18
2.3	Caracterização de pavimento .....	19
2.4	Estrutura do pavimento flexível .....	20
2.5	Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) .....	24
2.5.1	Ligantes .....	26
2.5.2	Agregados .....	33
3	MATERIAIS E MÉTODO .....	38
3.1	Introdução .....	38
3.2	Materiais .....	38
3.2.1	Projeto da mistura asfáltica .....	38
3.2.2	Agregados .....	40
3.2.3	Ligantes .....	41
3.2.4	Programa Sispav .....	44
3.3	Método .....	45

3.3.1	Introdução.....	45
3.3.2	Preparo dos agregados .....	46
3.3.3	Dosagem Marshall.....	47
3.3.4	Determinação da densidade aparente.....	56
3.3.5	Determinação do índice de vazios.....	57
3.3.6	Determinação do grau de compactação .....	58
3.3.7	Determinação da resistência à tração por compressão diametral .....	59
3.3.8	Determinação do módulo de resiliência.....	62
3.3.9	Ensaio no Sispav .....	65
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
4.1	Introdução .....	70
4.2	Resultados volumétricos .....	71
4.3	Resultados mecânicos .....	80
5	CONCLUSÕES .....	89
	REFERÊNCIAS.....	94
	ANEXOS .....	97
	Anexo I - Projeto da mistura asfáltica.....	98

## 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.

Para Bernucci (2008), apenas 12% da malha rodoviária nacional é pavimentada, e desta parcela aproximadamente 95% é composta por revestimento asfáltico. A predominância desta utilização, de modo que pavimentos asfálticos antigos continuem sendo restaurado deve-se não só pelo baixo custo na sua execução se comparado a outros tipos de revestimento, mas também pela facilidade e disponibilidade de usinas asfálticas ligada ao domínio das técnicas construtivas.

A predominância do transporte rodoviário gera conseqüentemente, uma grande demanda na construção de novas vias de acesso, bem como a necessidade de pavimentação, duplicação e restauração das existentes. Porém, não é nenhuma novidade o fato de que o pavimento tem sua vida útil extremamente afetada devido às tensões causadas por veículos com excesso de carga.

A fim de retardar o processo de deterioração do pavimento, bem como torná-lo mais resistente, tem se optado ultimamente pela utilização de modificadores que, segundo Balbo (2007) tem por objetivo "tornar o material mais rígido ao receber esforços (sofrendo menores deformações) e mais mole ao aliviar os mesmos esforços (apresentando maior recuperação elástica)". A adição de polímero no ligante asfáltico aumenta sua excelência, todavia, os asfaltos modificados por polímero necessitam de um rigoroso controle de qualidade, uma vez que as temperaturas de usinagem e aplicação deste divergem das adotadas para asfaltos convencionais.

Ceratti et al (2007) explica que as temperaturas de usinagem e de compactação da mistura asfáltica devem respeitar aquelas determinadas anteriormente em projeto. A temperatura não pode estar nem abaixo nem acima da estabelecida em projeto, uma vez que esta alteração implica diretamente nas demais características da mistura, como por exemplo, a viscosidade.

Na prática, é mais frequente a ocorrência da massa asfáltica chegar na obra a uma temperatura abaixo da correta, do que acima. Isto ocorre porque algumas situações favorecem este acontecimento, como locais com baixa temperatura, distâncias elevadas das usinas até a obra, etc. Tudo isto faz com que a mistura asfáltica seja submetida a um maior período de resfriamento.

Birman apud Ceratti et al (2007) afirma que a densidade aparente da mistura asfáltica é influenciada principalmente pela temperatura desta. Para ele, a grande maioria dos problemas causados durante a execução dos pavimentos seriam solucionados se fosse possível fazer com que as misturas asfálticas fossem todas compactadas dentro dos limites de temperaturas estabelecidos no seu projeto.

Soares, Silveira e Motta (2001), concluíram que à medida que a mistura asfáltica é submetida às temperaturas mais elevadas, sua densidade também aumenta. Ou seja, a temperatura está diretamente ligada com o desempenho da compactação da mistura asfáltica.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos gerais**

Estudo sobre o comportamento das misturas asfálticas convencionais e com adição de polímero quando submetidas a diferentes temperaturas de compactação, analisando o impacto sobre a vida útil do pavimento.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Simular, através da compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas, a aplicação destas em obras de pavimentação fora do intervalo de temperatura estabelecido em projeto. O estudo possibilitou a análise do impacto causado na vida útil do pavimento e das propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas, analisando o comportamento das misturas convencionais e com adição de polímero, utilizando os ligantes asfálticos CAP 50/70 e Flexpave 55/75, respectivamente. Para tanto, determinou-se em laboratório as seguintes propriedades das misturas asfálticas moldadas:

- ✓ Densidade aparente;
- ✓ Volume de vazios;
- ✓ Grau de compactação;
- ✓ Resistência à tração por compressão diametral;
- ✓ Módulo de resiliência.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos, descritos brevemente abaixo:

O Capítulo 1 introduz o tema da monografia, fazendo uma breve análise sobre a atual situação da malha rodoviária brasileira, a utilização de técnicas que melhoram o desempenho dos pavimentos e também apresentando os objetivos e a estrutura do referido trabalho.

O Capítulo 2 contempla o referencial teórico utilizado como embasamento para a formulação do estudo, abrangendo a caracterização e estrutura dos pavimentos, características de ligantes e agregados, dentre outros temas pertinentes à pesquisa.

O Capítulo 3 expõe o procedimento utilizado no método de pesquisa do estudo, contemplando desde a coleta dos materiais utilizados até a elaboração dos ensaios das misturas asfálticas.

O Capítulo 4 consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos, iniciando pela apresentação dos resultados volumétricos das misturas asfálticas, seguidos dos resultados mecânicos e por fim a aplicação no programa Sispav.

O Capítulo 5 refere-se às conclusões obtidas, bem como as sugestões para trabalhos futuros que deem continuidade ao presente estudo.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Introdução**

Devido à atual situação caótica de grande parte das estradas brasileiras, a busca pela utilização de tecnologias alternativas para o aumento da resistência e durabilidade dos pavimentos vem sendo cada vez maior. Por este motivo, o presente trabalho busca em seu referencial teórico, apresentar os principais conceitos utilizados que envolvem a pesquisa, assim como o desenvolvimento de ideias partindo de estudos que embasam o tema desenvolvido.

### **2.2 Conceituação de pavimento**

Pavimento é 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 (BERNUCCI et al, 2008, p.9).

Para Pinto (2010) o usuário de uma rodovia conceitua o pavimento como uma estrutura capaz de suportar o tráfego, proporcionando-lhe conforto e segurança. Porém, do ponto de vista técnico, o pavimento é uma estrutura de uma ou mais camadas, que tem por finalidade suportar e distribuir as cargas aplicadas em sua superfície, de modo que as tensões resultantes permaneçam abaixo das tensões admissíveis pelos materiais que o compõe.

## 2.3 Caracterização de pavimento

Pinto (2010) classifica os pavimentos em três categorias:

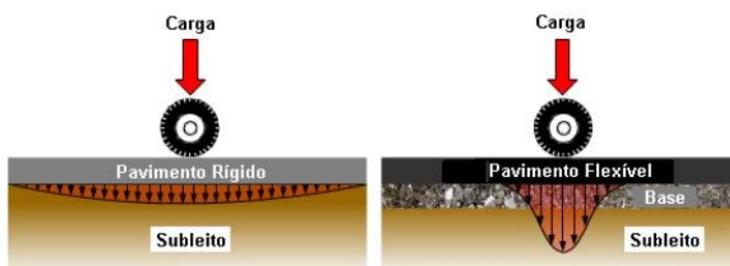
**Rígido:** É o pavimento que possui camada de revestimento com elevada rigidez se comparado às camadas subjacentes, absorvendo a grande maioria das tensões nele aplicadas. São estes os pavimentos construídos com placas de concreto de cimento *portland*.

**Flexível:** É o pavimento em que todas as camadas sofrem deformação elástica ao serem submetidas a carregamentos. Com isto, a carga se distribui em proporções equivalentes ao longo da estrutura. Este pavimento constitui-se de revestimento asfáltico sobre base granular.

**Semirrígido:** É o pavimento composto por base de material cimentício, coberto por revestimento asfáltico.

Já Bernucci et al (2008) destaca os pavimentos rígidos e os pavimentos flexíveis como os principais tipos existentes. A distribuição de cargas nestes dois tipos de pavimento está ilustrada abaixo na Figura 1.

Figura 1 - Distribuição de cargas em pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: Departamento de Transportes da UFPR (2009)

Como é possível visualizar, o pavimento rígido é capaz de absorver e distribuir as tensões, funcionando como camada de rolamento e também estrutura, diminuindo e minimizando a tensão transferida à fundação. Já o pavimento flexível, não absorve os carregamentos da mesma forma, sendo a fundação responsável por recebê-los (BIANCHI ET AL 2008).

## 2.4 Estrutura do pavimento flexível

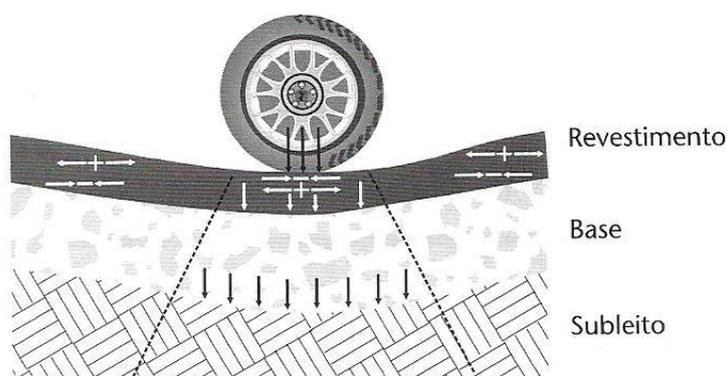
Balbo (2007) explica que o funcionamento adequado de um pavimento ocorre quando toda a sua estrutura sofre deformações compatíveis com a natureza de cada material que a compõe. Isto é fundamental para que não ocorram rupturas e danificações precoces no pavimento, pois assim as tensões são transmitidas à fundação de forma suave e regular, evitando a ocorrência de estados de tensão superiores aos projetados.

Para o autor, cada camada que compõe a estrutura de um pavimento possui uma ou mais funções específicas. O resultado da aplicação de uma carga na superfície do pavimento dependerá muito do comportamento mecânico isolado e simultâneo de todas as camadas da estrutura.

Bernucci et al (2008) acrescenta que além da interação entre as diferentes camadas do pavimento, o comportamento da estrutura depende também da espessura destas camadas bem como a rigidez de cada uma.

A Figura 2 ilustra o comportamento das camadas da estrutura de um pavimento quando submetidas às tensões provenientes do tráfego.

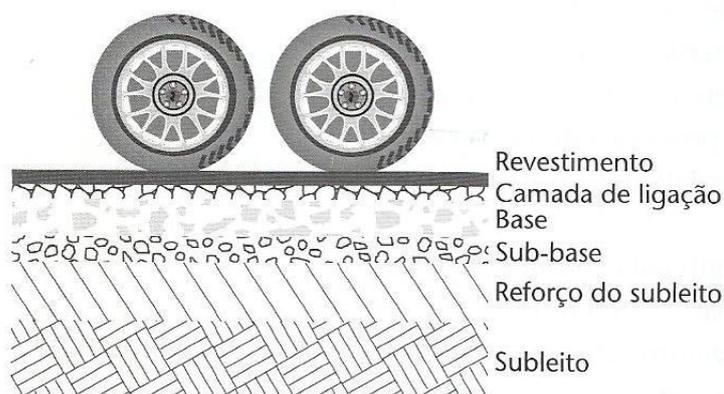
Figura 2 - Esforços em camadas do pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 35)

A Figura 3 aponta as diversas camadas que podem compor a estrutura de um pavimento flexível. São elas: revestimento, camada de ligação, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, as quais serão descritas a seguir.

Figura 3 - Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 36)

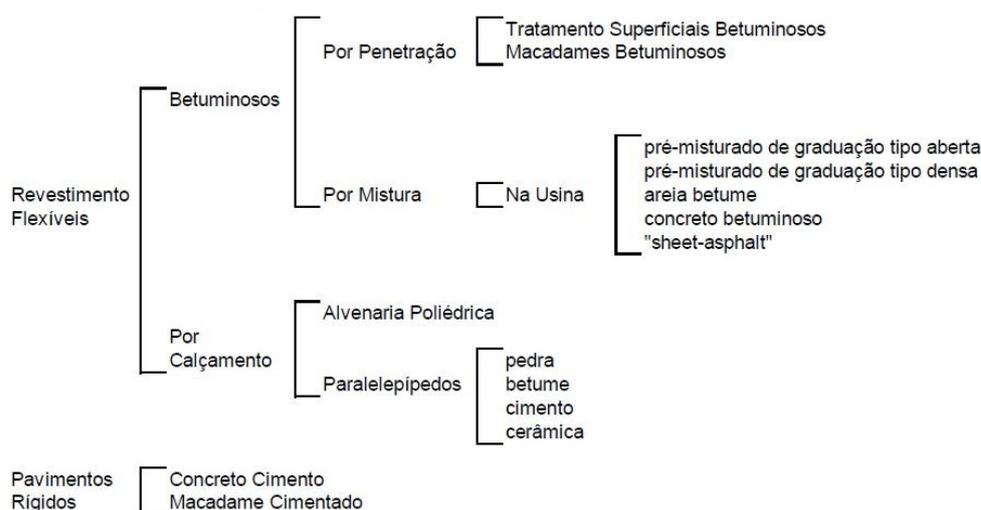
A escolha pelo tipo de revestimento a ser utilizado está condicionada a inúmeros fatores, como a localidade na qual o pavimento será executado, as características climáticas e a disponibilidade de materiais e recursos na região. Porém, no país, incide na grande maioria das obras o revestimento asfáltico conhecido como CBUQ - Concreto betuminoso usinado a quente. A composição do revestimento asfáltico, feita através da mistura de agregados e ligante asfáltico, deve ser suficientemente adequada a fim de que "garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local". (BERNUCCI et al, 2008, p. 157)

Balbo (2007) explica que "camada de ligação" e "camada de rolamento" são expressões utilizadas para classificar a subdivisão do revestimento asfáltico em mais de uma camada. Essa subdivisão ocorre não só por questões técnicas, mas também visando a redução de custos na execução de uma obra de pavimentação. A "camada de ligação", conhecida como *binder*, é uma camada intermediária, localizada entre a "camada de rolamento" e a base do pavimento. Por sua vez, a chamada "camada de rolamento" compõe a superfície do pavimento, estando

diretamente exposta ao recebimento dos carregamentos provenientes do tráfego. Existe ainda a expressão conhecida como "camada de regularização", a qual é executada sobre superfície antiga e irregular a fim de nivelar o greide.

O Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006) apresenta um esquema representativo do modo como os diversos tipos de revestimento podem ser classificados e agrupados, conforme a Figura 4. Em virtude do presente estudo referir-se apenas às misturas asfálticas betuminosas quentes em pavimentos flexíveis, os demais tipos de revestimento não serão abordados.

Figura 4 - Classificação de revestimentos



Fonte: DNIT (2006a, p. 98)

Logo abaixo do revestimento, situa-se a camada de base. Esta pode sobrepor a camada de sub-base ou estar diretamente sobre o subleito. Bernucci et al (2008) explica que a ausência de uma ou mais camadas na estrutura de um pavimento pode ocorrer devido às características dos materiais nele empregados e do volume de tráfego.

A principal função desta camada para Pinto (2010), é a absorção e conseqüente redução e distribuição das tensões de compressão nas camadas subjacentes à base, promovendo a resistência e a minimização de deformações na estrutura. Utiliza-se normalmente materiais britados para execução desta camada.

A camada de sub-base está locada entre a base e o subleito, estando sempre presente em estruturas de pavimentos que estejam submetidos à tráfego intenso e que não possuam subleito de excelente qualidade. (PINTO, 2010)

Ainda segundo o autor, esta camada difere-se da camada de base, por absorver as tensões em proporções menores e por ser constituída de materiais que diferem na granulometria. Assim como a sua camada adjacente, a sub-base é executada com materiais britados.

Para a classificação e agrupamentos dos diversos tipos existentes de bases e sub-bases, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) contém um esquema que representativo, apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Classificação de bases e sub-bases



Fonte: DNIT (2006a, p. 96)

Executado sobre o leito regularizado, o reforço de subleito, diferentemente das camadas sobrepostas a ele, é constituído por material argiloso. Sua utilização dá-se sempre que o solo natural do leito que abrigará o pavimento não possuir resistência suficiente para suportar as tensões oriundas do tráfego. Para Balbo (2007), o aumento da espessura das camadas adjacentes poderia suprimir a utilização do reforço de subleito, porém, esta camada apresenta-se como uma solução economicamente mais viável.

Por fim, o subleito constitui-se de material natural estável e compacto, executado sob forma de corte ou aterro ainda na fase de terraplenagem. O subleito

assume grande importância, uma vez que, estando em más condições, compromete todo o pavimento. Para a execução das camadas adjacentes, é necessária a regularização do subleito, proporcionando uma superfície regular transversalmente e longitudinalmente. A regularização em leitos antigos pode ocorrer através de pequenos aterros, "permanecendo intacta a compactação já executada pelo tráfego por vários anos" (PINTO, 2010, p. 8)

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

É considerado como o mais comum e tradicional entre os tipos de revestimento asfáltico utilizado no país, segundo Balbo (2007). O CBUQ nada mais é do que mistura homogeneizada de agregados minerais e de ligante asfáltico, fabricada a quente em usina misturadora.

No Brasil, normalmente adota-se as especificações do DNIT para embasamentos técnicos e normatização dos serviços, devido ao seu cunho nacional. A especificação DNIT 031 (2006), define o CBUQ como "mistura executada a quente, com características específicas, composta de agregado graúdo, material de enchimento (filer) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente".

O cimento asfáltico de petróleo (CAP), é utilizado como ligante na mistura. Possui diversos tipos, sendo comumente utilizado o CAP 50/70. O agregado graúdo pode ser pedra britada, escória ou seixo rolado, enquanto o agregado miúdo pode ser areia ou pó de pedra. Além destes, outros materiais que respeitem as normas regentes podem ser empregados, adaptando-se às necessidades de cada projeto.

A especificação classifica ainda as faixas de mistura em A, B ou C quanto à sua granulometria e percentual de ligante asfáltico utilizado, conforme pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 - Granulometria e percentual de ligante asfáltico em relação às faixas de mistura

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série	Abertura	A	B	C	Tolerâncias
ASTM	(mm)				
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	2,0	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	± 0,3%

Fonte: DNIT (2006b, p. 5)

Também, devem ser respeitados os limites de resistência à tração e percentual de vazios da mistura, conforme indicação do Quadro 2.

Quadro 2 - 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)

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)

### 2.5.1 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.

Estes ligantes, derivados do petróleo cru, são produzidos em nove conjuntos da Petrobras, distribuídos em todo o país, conforme indicado na Figura 6.

Figura 6 - Refinarias Petrobras que produzem asfalto



Fonte: Bernucci et al (2008, p. 40)

### 2.5.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O CAP, apresentado na Figura 7, é utilizado como ligante na pavimentação por possuir boa aderência aos agregados. É um produto do refinamento do petróleo cru, apresentando coloração negra ou marrom escuro. Muito viscoso, age como ligante na pavimentação, apresentando a temperaturas ambientes, consistência sólida a semissólida, necessária para manter o envolvimento dos agregados. (ASPHALT INSTITUTE apud BALBO, 2007)

Figura 7 - Cimento asfáltico de petróleo (CAP)



Fonte: Bernucci et al (2008)

De acordo com Balbo (2007), O CAP é composto por hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, além de enxofre, nitrogênio e oxigênio em pequenas quantidades. Os asfaltenos contribuem para a rigidez do CAP, enquanto os maltenos representam a sua parte oleosa, proporcionando plasticidade e viscosidade.

Por possuir caráter termossuscetível, o CAP tem sua consistência alterada quando submetido a diferentes temperaturas. Bernucci et al (2008) explica que o produto é semissólido à baixas temperaturas, visco elástico quando em temperatura ambiente e líquido se aquecido.

Porém, se exposto a temperaturas excessivas, pode apresentar patologias. À altas temperaturas sofre oxidação, apresentando-se menos viscoso e quebradiço. Já em temperaturas mais baixas sofre retração térmica, propiciando fissuramentos. (BALBO, 2007)

Apresenta, favoravelmente a seu uso, propriedades como flexibilidade, relativa durabilidade e grande resistência à maior parte dos ácidos, sais e álcalis, além de ser insolúvel em água. É um material termoplástico, de comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que, com o intemperismo, se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e frágil. (BALBO, 2007, p. 111)

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. Segundo Bernucci et al (2008), "a penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C". O resultado final obtém-se da média de três ensaios de penetração, quando a diferença entre eles estiver dentro do estipulado pela norma regente.

As características dos diversos tipos de CAP existentes estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características dos diversos tipos de CAP

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.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
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>							
Varição 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)

### 2.5.1.2 Asfalto modificado por polímero (AMP)

Para Bernucci et al (2008), os polímeros tem como principal objetivo melhorar o desempenho dos ligantes asfálticos, aumentando sua resistência. Cada vez mais utilizados, proporcionam melhoria ao tráfego, como conforto e segurança. O uso de asfaltos modificados tem por finalidade também o prolongamento da vida útil de um pavimento, reduzindo a frequência com que ocorrem as manutenções, sendo comumente utilizados em pontos com maior intensidade de tráfego.

A adição de polímeros ao ligante asfáltico, segundo Brûlé apud Balbo (2007) desde o início teve como princípio:

- ✓ Elevar a coesão do material;
- ✓ Reduzir a suscetibilidade térmica do CAP;
- ✓ Baixar a viscosidade à temperatura de aplicação;
- ✓ Resultar em CAP com baixa fluência (lenta);
- ✓ O CAP apresentar elevada resistência à deformação plástica, à fissuração e à fadiga;
- ✓ Garantir uma boa adesividade;
- ✓ O CAP ter melhor resistência ao envelhecimento.

Para Bernucci et al (2008), o polímero tem seu comportamento definido por três fatores: materiais de partida, tipo de reação utilizado na sua obtenção e técnica de preparação.

Utilizam-se os seguintes tipos de reação:

- ✓ Poliadição. Exemplo: SBR (borracha estireno-butadieno) e EVA (etileno-acetato de vinila);
- ✓ Policondensação. Exemplo: ER e PET;
- ✓ Modificação química de outro polímero. Exemplo: SBS (estireno-butadieno-estireno).

Quanto a sua propriedade térmica, os polímeros são divididos em:

- ✓ Termorrígidos: Resistem a qualquer ação térmica, não se fundindo. Quando aquecidos endurecem de forma irreversível. Exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- ✓ Termoplásticos: Aqueles que se fundem, tornando-se maleável sob forma reversível quando aquecidos novamente. Incorporados aos asfaltos à altas temperaturas. Exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- ✓ Elastômeros: Se aquecidos, se decompõem antes de amolecer. Exemplo: SBR;
- ✓ Elastômeros termoplásticos: A medida em que são submetidos ao aumento de temperatura passam do comportamento elástico para o termoplástico, sendo comumente utilizados em misturas asfálticas. Exemplo: SBS e EVA.

A Figura 8 ilustra a aparência do polímero utilizado nas misturas asfálticas, enquanto o Quadro 4 apresenta as propriedades dos diversos tipos de polímeros existentes.

Figura 8 - Polímero utilizado em misturas asfálticas



Fonte: Greca Asfaltos (2014)

Quadro 4 - Características dos diversos tipos de AMP

<b>Tipo</b>					
Grau (Ponto de amolecimento mín./ Recuperação elástica a 25°C mín.) (°C/%)	Método ABNT	50/65	55/75	60/85	65/90
<b>Ensaio na amostra virgem</b>					
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, <i>spindle</i> 21, 20 RPM, máx., cP	NBR 15184	1.500	3.000	3.000	3.000
Viscosidade Brookfield a 150°C, <i>spindle</i> 21, 50 RPM, máx., cP	NBR 15184	1.000	2.000	2.000	2.000
Viscosidade Brookfield a 177°C, <i>spindle</i> 21, 100 RPM, máx., cP	NBR 15184	500	1.000	1.000	1.000
Ponto de fulgor, mín., °C	NBR 11341	235	235	235	235
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	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
<b>Ensaio no resíduo após RTFOT</b>					
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)

### 2.5.2 Agregados

Para a execução das camadas constituintes do pavimento asfáltico são utilizados diversos tipos de agregados. Para Bernucci et al (2008) "agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado".

Ainda para o autor, 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.

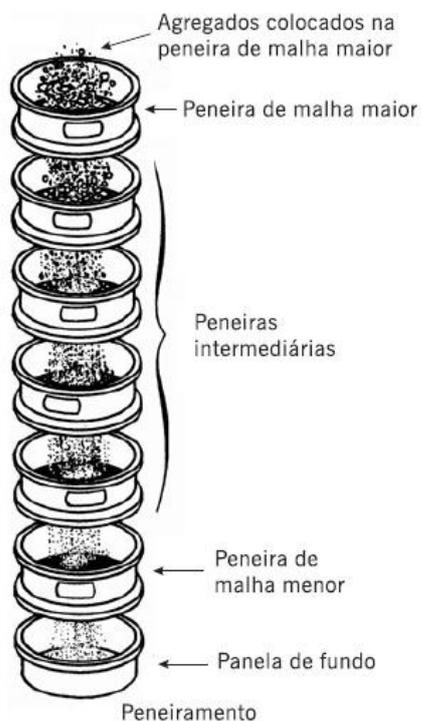
Quanto à distribuição de grãos, Bernucci et al (2008, p. 121) explica que:

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.

A Figura 9 esquematiza a distribuição granulométrica, a qual ocorre através do peneiramento dos agregados, fracionando uma amostra seca, o que resulta em uma percentual de massa retida em cada uma das peneiras calculado sobre a

massa total aplicada nestas. O Quadro 5, apresentado na especificação DNER 035 (1995) regulamenta as dimensões de cada peneira.

Figura 9 - Distribuição granulométrica



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

Quadro 5 - Especificações das peneiras

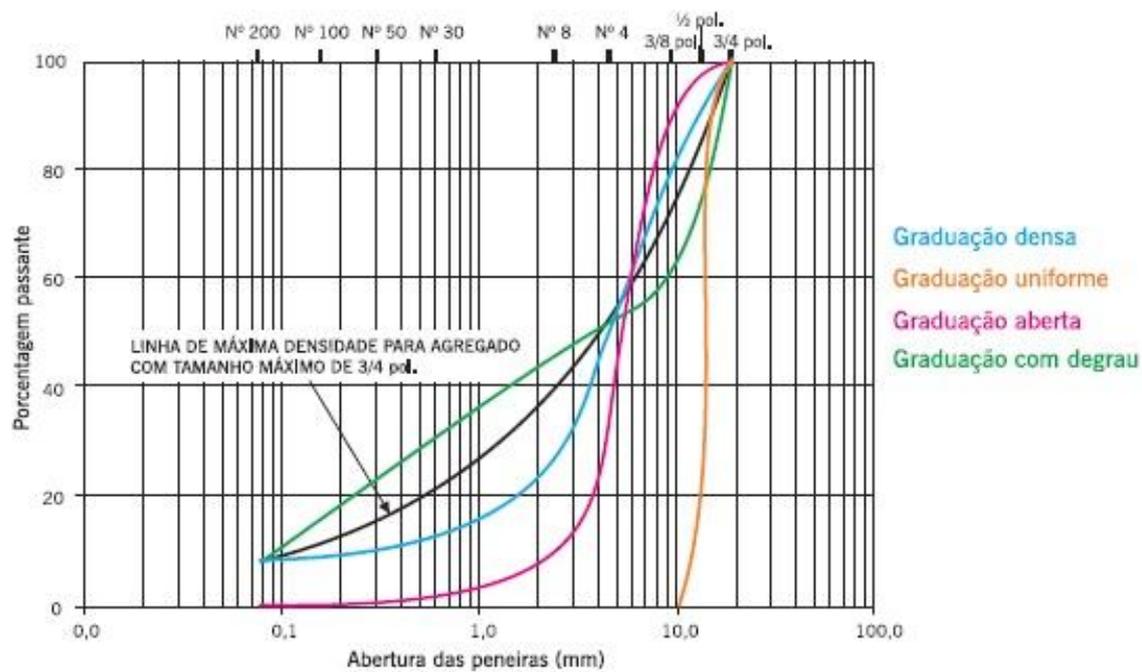
Abertura nominal das malhas		Tolerância da abertura das malhas (mm)			Diâmetro dos fiso da tela ( $\mu\text{m}$ )		
Principal mm	Peneira nº	Individual máxima (+x)	Média ( $\pm y$ )	Máxima até 6% das malhas (+z)	Mínimo $d_{\text{min}}$	Recomendado	Máximo $d_{\text{max}}$
75,00		3,09	2,22	2,65	5,4	6,3	7,2
50,00		2,29	1,49	1,89	4,3	5	5,8
37,50		1,85	1,13	1,49	3,8	4,5	5,2
25,00		1,38	0,76	1,07	3	3,55	4,1
19,00		1,13	0,58	0,83	2,7	3,15	3,6
9,50		0,68	0,30	0,49	1,9	2,24	2,6
4,75	4	0,41	0,15	0,28	1,3	1,6	1,9
2,36	8	0,25	0,08	0,17	0,85	1	1,15
2,00	10	0,23	0,07	0,15	0,77	0,9	1,04
1,18	16	0,16	0,04	0,10	0,54	0,63	0,72
0,600	30	0,101	0,021	0,061	0,340	0,400	0,460
0,425	40	0,081	0,016	0,048	0,240	0,280	0,320
0,300	50	0,065	0,012	0,038	0,170	0,200	0,230
0,150	100	0,043	0,006	0,025	0,085	0,100	0,115
0,075	200	0,029	0,004	0,017	0,043	0,050	0,058

Fonte: DNER (1995, p. 6)

Bernucci et al (2008) destaca quatro principais graduações de agregados, as quais tem suas curvas representadas pelo Gráfico 1:

- ✓ Graduação densa: Apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima a densidade máxima;
- ✓ Graduação aberta: Apresenta distribuição contínua porém, com vazios mal preenchidos;
- ✓ Graduação uniforme: A maioria das suas partículas apresenta tamanhos semelhantes;
- ✓ Graduação com degrau: Possui uma faixa de agregados intermediários, suscetíveis a segregação.

Gráfico 1 - Representação convencional das curvas granulométricas



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

## **3 MATERIAIS E MÉTODO**

### **3.1 Introdução**

Este estudo tem como objetivos específicos a simulação, através da compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas, a aplicação destas em obras de pavimentação em temperatura fora do intervalo estabelecido em projeto. O estudo possibilitou a análise do impacto causado na vida útil do pavimento e das propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas, analisando o comportamento das misturas convencionais e com adição de polímero, utilizando os ligantes asfálticos CAP 50/70 e Flexpave 55/75, respectivamente. Para tanto, determinou-se em laboratório as seguintes propriedades das misturas asfálticas moldadas:

- ✓ Densidade aparente;
- ✓ Volume de vazios;
- ✓ Grau de compactação;
- ✓ Resistência à tração por compressão diametral;
- ✓ Módulo de resiliência.

Este Capítulo é destinado a descrição dos materiais e método de pesquisa utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

### **3.2 Materiais**

#### **3.2.1 Projeto da mistura asfáltica**

O projeto da mistura asfáltica (Anexo I) utilizado no presente estudo foi elaborado pelo Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para a empresa Conpasul Construção e Serviços Ltda. O projeto atende a Faixa C do DNIT, seguindo sua especificação 031/2006. Os Quadros 6 a 8 apresentam, em síntese, a composição e caracterização da mistura constantes no referido projeto.

Quadro 6 - Composição da mistura asfáltica

Composição da mistura				
% Mistura		18%	28%	54%
Peneira	mm	Brita $\frac{3}{4}$ "	Brita $\frac{3}{8}$ "	Pó-de-pedra
$\frac{3}{4}$ "	19,100	18,00	28,00	54,00
$\frac{1}{2}$ "	12,700	2,60	28,00	54,00
$\frac{3}{8}$ "	9,500	0,10	25,00	54,00
Nº 4	4,760	0,10	0,90	51,20
Nº 10	2,000	0,10	0,20	35,00
Nº 40	0,420	0,10	0,20	19,70
Nº 80	0,180	0,10	0,20	13,00
Nº 200	0,074	0,10	0,20	6,70
	Frações	Brita $\frac{3}{4}$ "	Brita $\frac{3}{8}$ "	Pó-de-pedra
	%	18%	28%	54%
			Total	100%

Fonte: Adaptado pela autora com base em UFRGS (2012)

Quadro 7 - Especificação da mistura asfáltica

Especificação e mistura						
Peneira	mm	Limite	Centro faixa	Faixa de trabalho		Mistura
$\frac{3}{4}$ "	19,100	100	100	100,00	100,00	100,00
$\frac{1}{2}$ "	12,700	80 - 100	90	80,00	91,60	84,60
$\frac{3}{8}$ "	9,500	70 - 90	80	72,10	86,10	79,10
Nº 4	4,760	44 - 72	58	45,20	59,20	52,20
Nº 10	2,000	22 - 50	36	30,20	40,20	35,20
Nº 40	0,420	8 - 26	17	15,00	25,00	20,00
Nº 80	0,180	4 - 16	10	8,20	16,00	13,20
Nº 200	0,074	2 - 10	6	4,90	8,90	6,90

Fonte: Adaptado pela autora com base em UFRGS (2012)

### Quadro 8 - Propriedades finais da mistura

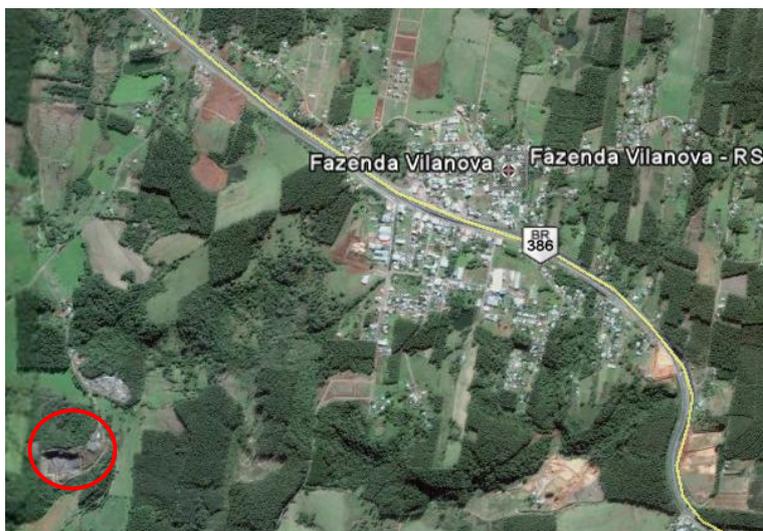
<b>Propriedades finais da mistura - Definido segundo Método da NBR 15.619-A</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>ESP 16/91 DAER</b>	<b>Valor de projeto</b>
Teor de Betume (%)	-	4,90
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00
Relação Volume de Vazios (%)	75 a 82	78,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	17,20
Massa Esp. Max. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,595
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,498
Estabilidade (kgf)	>800	1900
Fluência (1/100 in)	8 a 16	15,90
Resistência à Tração (MPa)	-	1,21
Módulo de Resiliência (MPa)	-	4540
Relação Mr/Rt (adm)	-	3752
Relação Est/Fluência (kgf.m)	-	119
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,6 (Superpave)	1,39

Fonte: Adaptado pela autora com base em UFRGS (2012)

### 3.2.2 Agregados

Para a realização deste estudo, utilizou-se os agregados provenientes da pedreira da Conpasul Construção e Serviços Ltda., localizada em Fazenda Vilanova/RS, conforme indicado na Figura 10. A pedreira é constituída por rocha basáltica, predominante no Estado do Rio Grande do Sul. De acordo com o indicado no projeto (Anexo I), foram empregados os seguintes agregados na mistura asfáltica: pó de pedra, brita 3/8" e brita 3/4", os quais estão representados na Figura 11.

Figura 10 - Localização da pedreira



Fonte: Adaptado pela autora com base em Google Earth (2014)

Figura 11 - Britas



a) pó de pedra



b) brita 3/8"



c) brita 3/4"

Fonte: Conpasul (2014)

### 3.2.3 Ligantes

Os ligantes asfálticos utilizados provêm da refinaria da Petrobras Distribuidora S/A situada em Canoas/RS, sendo esses distribuídos pela Greca Distribuidora de Asfaltos Ltda.

Para o estudo utilizou-se duas misturas asfálticas diferentes. A primeira constituída por CAP 50/70, e a segunda por Flexpave 55/75. Optou-se pela utilização destes ligantes devido ao uso frequente no estado do Rio Grande do Sul, facilitando sua obtenção. As especificações técnicas dos ligantes fornecidas pelo distribuidor são apresentadas nos Quadros 9 e 10, respectivamente.

Quadro 9 - Especificações técnicas do CAP 50/70

Característica	Unidade	Método		Especificação
		ABNT	ASTM	CAP 50-70
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR-6576	D 5	50 a 70
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR-6560	D 36	46
Viscosidade Saybolt Furol	SSF	NBR-14950	E 102	
a 135°C, mín.				141
a 150°C, mín.				50
a 177°C				30 a 150
ou				
Viscosidade Brookfield:	cP	NBR-15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.				274
a 150°C, SP 21, mín.				112
a 177°C, SP 21				57 a 285
Índice de Susceptibilidade Térmica (1)				(-1,5) a (+0,7)
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR-11341	D 92	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	NBR-14855	D 2042	99,5
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	NBR-6293	D 113	60
Efeito do Calor e do Ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos:		NBR-15235	D 2872	
Varição em Massa, máx. (2)	%	NBR-15235	D 2872	0,5
Ductilidade a 25°C, mín.		NBR-6293	D 113	20
Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR-6560	D 36	8
Penetração retida, mín. (3)	%	NBR-6576	D 5	55

Fonte: Adaptado pela autora com base em Greca Asfaltos (2014)

Quadro 10 - Especificações técnicas do Flexpave 55/75

GRAU (ponto de amolecimento min. / Recuperação Elástica min.)		FLEXPAVE
		55/75
<b>ENSAIOS NA AMOSTRA VIRGEM:</b>	<b>MÉTODO ABNT</b>	<b>LIMITE DE ESPECIFICAÇÃO</b>
Penetração (100g, 5s, 25°C)	NBR-6576	45 a 70
Ponto de Amolecimento, mín.	NBR-6560	55
Ponto de Fulgor, mín.	NBR-11341	235
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx., cP	NBR-15184	3000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx., cP	NBR-15184	2000
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx., cP	NBR-15184	1000
Ensaio de Separação de Fase, máx., °C	NBR-15166	5
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín., %	NBR-15086	75
<b>ENSAIO NO RESÍDUO DO RTFOT</b>		
Varição de massa, máx., %	NBR-15235	1
Varição do PA, °C máx.	NBR-6560	-5 a +7
Percentagem de Penetração Original, mín.	NBR-6576	60
Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín.	NBR-15086	80

Fonte: Adaptado pela autora com base em Greca Asfaltos (2014)

Também disponibilizado pelo fornecedor dos ligantes asfálticos, o Quadro 11 exibe as faixas de temperaturas adequadas para a realização da mistura e da compactação das misturas asfálticas, variando de acordo com o tipo de ligante empregado. O atendimento a estas temperaturas estabelecidas é necessário para garantir a qualidade do produto final.

Quadro 11 - Temperaturas convencionais de misturas e compactação - Ligantes asfálticos

Temperaturas Convencionais de Misturas e Compatação - Ligantes Asfálticos		
Temperaturas (°C)	CAP 50/70	FLEXPAVE 55/75
Ligante asfáltico	150 - 155	157 - 162
Agregado	160 - 165	167 - 172
Compactação (temperatura mínima)	135	145

Fonte: Adaptado pela autora com base em Greca Asfaltos (2014)

### 3.2.4 Programa Sispav

"O programa, SisPav, incorpora a análise de confiabilidade, a análise de tensões e deformações e interfaces gráficas para visualização dos resultados." (FRANCO, 2007)

Para Fonseca (2013), os parâmetros de deformabilidade dos pavimentos, como tensões, deformações e deslocamentos são elementos essenciais de análise da mecânica dos pavimentos. Esta análise dá-se, geralmente, através da utilização de programas computacionais, como o SisPav.

O programa busca a melhoria na elaboração dos projetos de pavimentação, tratando-se da sua eficiência estrutural. Isto dá-se através da utilização de métodos mecanísticos, uma vez que vem se buscando a diminuição do emprego de métodos empíricos para o dimensionamento e análise de pavimentos. Por tratar-se de uma estrutura, o pavimento deve ser avaliado através da resistência dos materiais nele empregado e dos carregamentos nele aplicados (FRANCO, 2007).

Ainda segundo o autor, em síntese, o SisPav tem por objetivo servir como um sistema computacional que "permita dimensionar mecanisticamente as espessuras das camadas com base nas informações detalhadas do tráfego, das condições ambientais e das características dos materiais".

O SisPav é composto por mais de um programa, os quais permitem diferentes análises do pavimento. Para o presente trabalho utilizou-se o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), responsável pelo cálculo de tensões, deformações e deslocamentos existentes no pavimento.

No AEMC a estrutura do pavimento é lançada, sendo necessário informar para cada camada o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson do material que a compõe. Além disso, deve-se informar o tipo de carregamento de se deseja analisar, sendo permitido definir valores para pressão de pneus, carga do eixo, ou a carga de roda, coordenadas das rodas, ou a distância entre elas e entre os eixos. É

possível também definir o local onde se deseja que ocorra a análise de tensões, deformações e deslocamento do pavimento.

### **3.3 Método**

#### **3.3.1 Introdução**

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

- ✓ Mistura asfáltica com CAP 50/70;
- ✓ Mistura asfáltica com Flexpave 55/75.

As misturas asfálticas foram compactadas em 3 diferentes temperaturas, respeitando um intervalo de 30°C entre cada uma delas, sendo assim: 100°C, 130°C, e 160°C. A escolha deste intervalo teve por objetivo simular a compactação das misturas asfálticas em obras de pavimentação fora da sua temperatura ideal. Adotou-se, portanto, a temperatura de 160°C por estar um pouco acima da temperatura máxima ideal para a compactação da mistura, de acordo com os ligantes asfálticos utilizados. A temperatura de 130°C foi escolhida por estar um pouco abaixo da temperatura mínima ideal, simulando um pequeno atraso na compactação da mistura. Por fim, optou-se também pela utilização da temperatura de 100°C, simulando assim um atraso ainda maior.

Para a obtenção de maior precisão e atendendo as exigências da especificação DNER-ME 043 (1995), foram produzidos 3 corpos de prova para cada uma das situações citadas anteriormente, totalizando 18 corpos de prova, conforme a relação abaixo:

- ✓ 3 corpos de prova com CAP 50/70 compactadas à 100°C;
- ✓ 3 corpos de prova com CAP 50/70 compactadas à 130°C;
- ✓ 3 corpos de prova com CAP 50/70 compactadas à 160°C;
- ✓ 3 corpos de prova com Flexpave 55/75 compactadas à 100°C;
- ✓ 3 corpos de prova com Flexpave 55/75 compactadas à 130°C;
- ✓ 3 corpos de prova com Flexpave 55/75 compactadas à 160°C.

Para ambos os tipos de misturas asfálticas, independente do ligante asfáltico utilizado, adotou-se o mesmo projeto (Anexo I), o qual foi originalmente elaborado para a utilização do ligante asfáltico Flexpave 55/75. Deste modo, para todas as misturas manteve-se o mesmo teor de ligante e a mesma faixa granulométrica, além de serem adotadas as mesmas temperaturas de aquecimento e mistura dos ligantes e agregados, tendo como base aquelas exigidas pela especificação do Flexpave 55/75.

### 3.3.2 Preparo dos agregados

Inicialmente, os agregados extraídos da pedreira foram peneirados e separados em 8 diferentes faixas granulométricas, seguindo a composição especificada no projeto (Anexo I). De acordo com DNER-ME 043 (1995), o peso final do corpo de prova deve ficar próximo à 1.200,00 g. O peso calculado para cada corpo de prova do presente estudo foi de 1.250,00 g. Diante disso, a Tabela 1 apresenta juntamente da composição granulométrica da mistura asfáltica, a quantidade em gramas calculada para cada fração de agregado empregada para a confecção de 1 corpo de prova.

Tabela 1 - Composição granulométrica de um corpo de prova

Peneira	Mistura	Percentual (%)	Peso (g)
$3/4$ "	100,00	0,00	0,00
$1/2$ "	84,60	15,40	192,50
$3/8$ "	79,10	5,50	68,75
Nº 4	52,20	26,90	336,25
Nº 10	35,20	17,00	212,50
Nº 40	20,00	15,20	190,00
Nº 80	13,20	6,80	85,00
Nº 200	6,90	6,30	78,75
Passante Nº 200	0,00	6,90	86,25
<b>Total</b>		<b>100,00</b>	<b>1.250,00</b>

Fonte: Adaptado pela autora com base em UFRGS (2012)

Os agregados foram peneirados manualmente, conforme ilustra a Figura 12, e em seguida foram separados em recipientes de acordo com a sua faixa granulométrica.

Figura 12 - Separação dos agregados



Fonte: Autora (2015)

### 3.3.3 Dosagem Marshall

Conforme já citado, a execução dos corpos de prova das misturas asfálticas deve atender a especificação DNER-ME 043 (1995). Deste modo, seguiu-se os critérios apresentados a seguir.

Para a preparação da mistura, realizou-se a secagem dos agregados, através da utilização de uma estufa, a qual é apresentada na Figura 13. Utilizou-se um intervalo de temperatura entre 105°C e 110°C para a secagem dos agregados, atendendo as exigências da especificação vigente.

Figura 13 - Estufa utilizada



Fonte: Autora (2015)

Realizou-se na sequencia 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, como mostra a Figura 14.

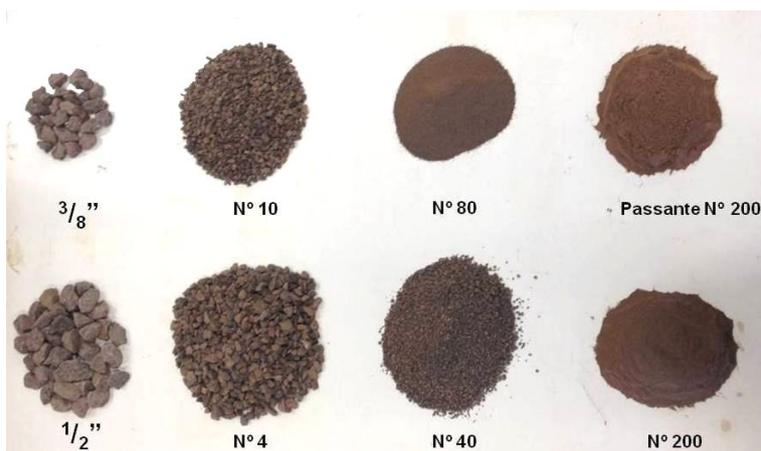
Figura 14 - Separação dos agregados



Fonte: Autora (2015)

A composição granulométrica final para a moldagem de 1 corpo de prova é representada pela Figura 15, onde consta logo abaixo de cada agregado a faixa granulométrica a que se refere, permitindo uma melhor visualização da quantidade utilizada de cada agregado.

Figura 15 - Composição granulométrica



Fonte: Autora (2015)

Para o aquecimento dos agregados utilizou-se o recipiente apresentado na Figura 16. Colocado sobre o fogo, 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 16 - Aquecimento dos agregados



Fonte: Autora (2015)

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, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Adição do ligante asfáltico



Fonte: Autora (2015)

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. A execução da mistura e a aparência final desta são mostradas nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

Figura 18 - Execução da mistura



Fonte: Autora (2015)

Figura 19 - Aspecto final da mistura



Fonte: Autora (2015)

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.

Passadas as 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, acomodando-a através de 15 golpes enérgicos no seu interior e extremidade, acrescidos de 10 golpes em seu centro, conforme apresenta a Figura 20.

Figura 20 - Acomodação da mistura no molde



Fonte: Autora (2015)

Com a mistura já acomodada no molde, aplicou-se 75 golpes com o soquete situado a uma altura de 45,72 cm do corpo de prova, e em seguida virou-se o corpo de prova de lado, aplicando mais 75 golpes, de acordo com a ilustração da Figura 21.

Figura 21 - Compactação da mistura



Fonte: Autora (2015)

Cada corpo de prova foi removido do molde cuidadosamente após sua compactação, sendo colocado sobre uma superfície lisa e plana, como mostra a Figura 22, mantendo-o em repouso por 12 horas, à temperatura ambiente.

Figura 22 - Corpos de prova prontos em repouso



Fonte: Autora (2015)

Após a moldagem dos 18 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, e um diâmetro de 100 mm, sendo aceita uma variação de até 2 mm para mais.

De acordo com a Figura 23, 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 23 - Medição do corpo de prova



Fonte: Autora (2015)

Na sequência os corpos de prova foram pesados (Figuras 24 a 26), primeiramente secos e posteriormente submersos na água, estando esta à temperatura de 25°C, conforme exige a especificação vigente. Após serem retirados da água, os corpos de prova tiveram sua superfície imediatamente secada, e novamente foram pesados. A pesagem nestas três modalidades é necessária para a obtenção das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas.

Figura 24 - Pesagem do corpo de prova seco



Fonte: Autora (2015)

Figura 25 - Pesagem do corpo de prova submerso



Fonte: Autora (2015)

Figura 26 - Pesagem do corpo de prova saturado com a superfície seca



Fonte: Autora (2015)

### 3.3.4 Determinação da densidade aparente

Através dos dados obtidos na pesagem dos corpos de prova determinou-se a densidade aparente das misturas asfálticas.

O método da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é hoje utilizado internacionalmente para a determinação da densidade aparente das misturas asfálticas, exceto no Brasil, onde o cálculo utilizado é dado pela NBR e pelo DNER. (ANTT, 2014)

Deste modo, determinou-se a densidade aparente através dos dois métodos existentes. Segundo Marques (2004), o método da ASTM D 2726 considera os vazios superficiais através da utilização do peso úmido, obtido com a secagem da superfície logo após a imersão na água. Já no método adotado tanto pela NBR 12891 (1993) e como pelo DNER 117 (1994) obtém-se o volume do corpo de prova da mistura asfáltica sem considerar os vazios superficiais. As Equações utilizadas

para a determinação destes valores pelo método ASTM D 2726 (1) e método NBR 18291 (1993) / DNER 117 (1994) (2) são apresentadas abaixo, respectivamente.

$$Gmb = \frac{Wd}{W_{ssd} - W_{sub}} \quad (1)$$

Onde:

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado;

Wd: peso ao ar ou peso seco;

Wssd: peso medido na condição saturada de superfície seca;

Wsub: peso medido na condição saturada imerso em água.

$$DMT = \frac{P_{cap} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{cap}}{G_{cap}} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (2)$$

Onde:

DMT: densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;

P: peso do material constituinte;

G: densidade real dos materiais constituintes.

### 3.3.5 Determinação do índice de vazios

*Asphalt Institute* apud Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (2014) define o volume de vazios (Vv) como "a porcentagem de vazios de ar na amostra compactada".

A especificação DNIT 031 (2006) determina o percentual limite de vazios presentes em uma mistura asfáltica:

- ✓ camada de rolamento: de 3 a 5%;
- ✓ camada de ligação (binder): de 4 a 6%.

O volume de vazios é diretamente relacionado com a densidade aparente da mistura asfáltica. Consequentemente, com a existência de dois métodos para a

obtenção desta, é possível determinar o volume de vazios também de duas formas. Porém, ao contrário da densidade aparente, o cálculo do volume de vazios é muito semelhante se comparado o cálculo utilizado pelo *Asphalt Institute apud ANTT* (2014) com o cálculo utilizado pela NBR 16273 (2014). O que difere entre os dois métodos é justamente o modo de obtenção da densidade aparente. Sendo assim, determinou-se também o volume de vazios através destes dois métodos existentes.

Primeiramente seguindo *Asphalt Institute apud ANTT* (2014), a partir da seguinte Equação (3):

$$Vv = 100 \times \frac{(Gmm - Gmb)}{Gmm} \quad (3)$$

Onde:

Vv: volume de vazios;

Gmm: densidade máxima medida da mistura asfáltica solta;

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado.

O segundo método utilizado, é representado através da Equação abaixo (4), sendo esse padronizado pela NBR 16273 (2014):

$$Vv = \frac{(DMT - d)}{DMT} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

Vv: volume de vazios;

DMT: densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;

d: densidade aparente do corpo de prova compactado.

### 3.3.6 Determinação do grau de compactação

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 52), o grau de compactação de uma mistura asfáltica é o "quociente resultante da divisão da massa específica obtida em campo, pela massa específica máxima obtida no laboratório." Realiza-se o controle do grau de compactação das misturas asfálticas a fim de

verificar se a compactação foi realizada de forma adequada. A especificação DNER 385 (1999) determina que o grau de compactação de uma mistura asfáltica não pode ser inferior a 97%.

"A compactação de uma camada asfáltica de revestimento aumenta a estabilidade da mistura asfáltica, reduz seu índice de vazios, proporciona uma superfície suave e desempenada e aumenta sua vida útil." (BERNUCCI ET AL, 2008, p. 389)

Para o presente estudo, adotou-se a massa específica máxima indicada no projeto (Anexo I). Os resultados provêm da utilização da Equação 5, demonstrada abaixo.

$$G_C = \frac{\gamma_s(\text{campo})}{\gamma_{s.máx.}(\text{laboratório})} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$G_C$ : grau de compactação;

$\gamma_s$  (campo): massa específica obtida em campo;

$\gamma_{s.máx.}$  (laboratório): massa específica máxima obtida no laboratório.

Uma vez que se utilizou dois métodos distintos para a determinação da densidade aparente das misturas asfálticas, conforme já mencionado no trabalho, o grau de compactação das misturas asfálticas também foi calculado considerando as diferentes densidades obtidas, apresentando, conseqüentemente diferentes resultados.

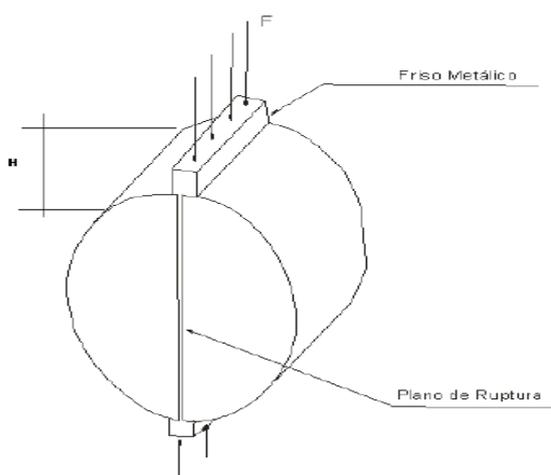
### 3.3.7 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

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. Atendendo as exigências, os corpos de provas foram mantidos em estufa à temperatura de 25°C durante aproximadamente 2 horas, sendo permitida uma variação de 0,10°C tanto para mais quanto para menos.

Na sequência cada corpo de prova foi posicionado sobre uma superfície cilíndrica, composta por dois frisos metálicos, com uma das faces curva e comprimento igual ao corpo de prova. A Figura 27 indica o posicionamento do corpo de prova no ensaio, bem como o ponto de ruptura do mesmo.

Figura 27 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: DNIT (2010, p. 3)

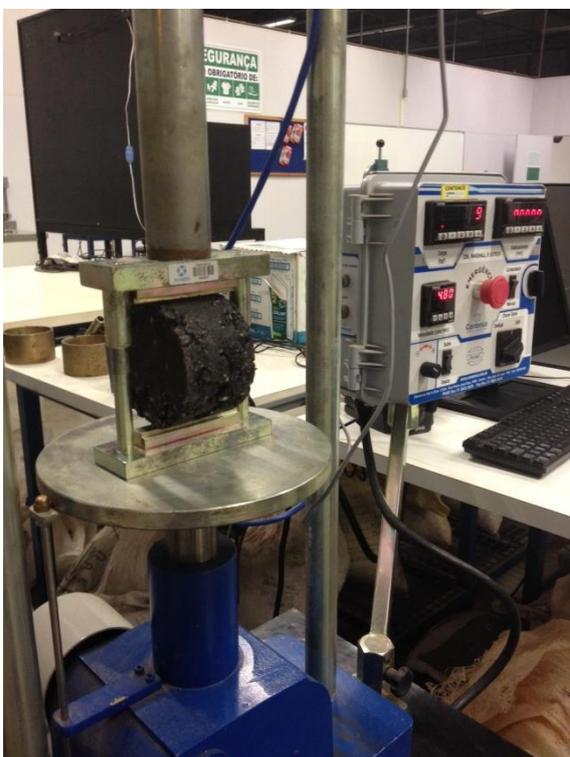
Após o posicionamento correto, aplicou-se uma carga progressiva no corpo de prova, com velocidade de deformação de 0,80 mm/s. A especificação permite uma variação de 0,01 mm/s tanto para mais quanto para menos. A carga foi aplicada até o momento de ruptura do corpo de prova, dividindo-o em duas metades, segundo o plano diametral vertical. As Figuras 28 e 29 demonstram o ensaio realizado, enquanto a Figura 30 apresenta os 18 corpos de provas já rompidos.

Figura 28 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Autora (2015)

Figura 29 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Autora (2015)

Figura 30 - Corpos de prova rompidos



Fonte: Autora (2015)

Com o valor obtido no ensaio calculou-se a resistência à tração, através da seguinte Equação (6):

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (6)$$

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.

### 3.3.8 Determinação do módulo de resiliência

Hveem apud Bernucci et al (2008), define o módulo de resiliência como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida

quando cessam as tensões causadoras das deformações". 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 ( $\varepsilon_t$ ) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T).

O módulo de resiliência é expresso pela Equação abaixo (7).

$$MR = \left( \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right) \quad (7)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência

$\sigma_t$ : tensão de tração;

$\varepsilon_t$ : deformação específica recuperável.

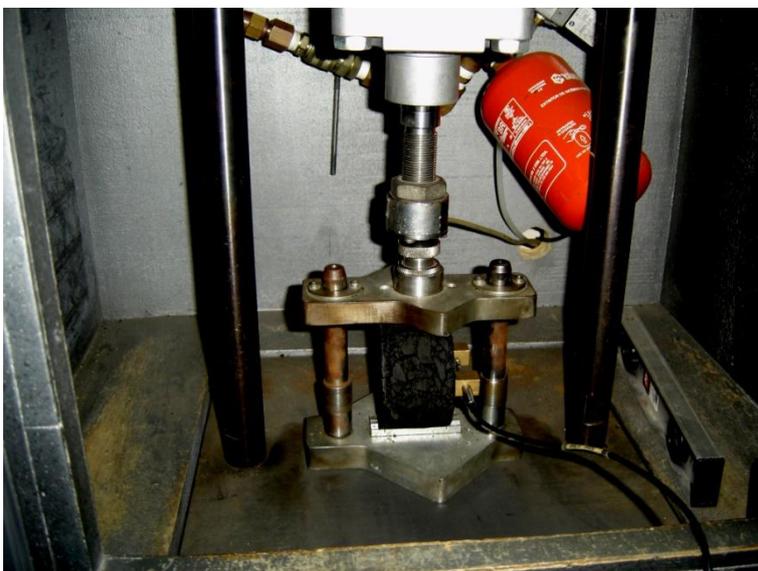
Primeiramente posicionou-se o corpo de prova no interior do suporte para fixação dos transdutores. Em seguida, colocou-se o corpo de prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos. É necessário sempre fixar e ajustar os transdutores de modo a se obter o registro no oscilógrafo, observando o perfeito encaixe das partes. As Figuras 31 e 32 representam a realização do ensaio, com o corpo de prova já posicionado no equipamento.

Figura 31 - Ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Autora (2015)

Figura 32 - Ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Autora (2015)

O ensaio deu-se através de uma carga vertical repetida aplicada 200 vezes diametralmente no corpo de prova, obtendo-se uma tração menor ou igual a 30% daquela obtida no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A carga

foi aplicada a uma frequência de 60 ciclos por minuto, com duração de 0,10 segundo. Na sequência registrou-se no oscilógrafo a deformação resiliente para 300, 400 e 500 aplicações de carga.

A partir dos valores obtidos utilizou-se a Equação abaixo (8) para calcular o módulo de resiliência.

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (8)$$

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.

### 3.3.9 Ensaio no Sispav

Utilizou-se o programa Sispav para a determinação da deflexão, tensão de tração e tensão de deformação das misturas asfálticas a partir dos valores de módulo de resiliência obtidos anteriormente.

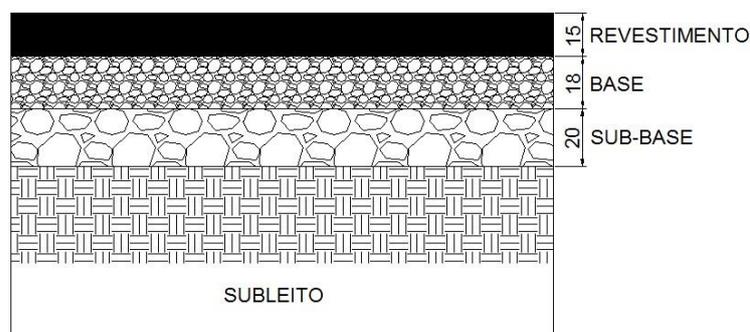
Utilizou-se o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que consiste em um programa específico que visa calcular tensões, deformações e deslocamentos do pavimento. (FRANCO, 2007).

Independentemente do método aplicado para o dimensionamento de um pavimento, seja ele empírico ou mecanístico, os mecanismos de ruptura são utilizados como um meio de constatação da eficiência do pavimento quanto à sua capacidade de suportar o tráfego. No método empírico, determina-se a estrutura do pavimento utilizando os valores do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e número N, que consiste no número de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas

que o pavimento é capaz de suportar. Já no método mecanístico determina-se as tensões e deformações do pavimento e compara-se com as características dos materiais que o constituem através da realização de ensaios laboratoriais e utilização de equações mecanísticas empíricas. (MOTTA *apud* Pontifícia Universidade Católica - Rio de Janeiro, 2015)

Tratando de uma análise mecanística empírica, para a sua realização, arbitrou-se uma estrutura de um pavimento flexível qualquer, ilustrado na Figura 33. Os materiais utilizados na composição da estrutura do pavimento bem como as propriedades de cada um deles, estão apresentados no Quadro 12.

Figura 33 - Estrutura do pavimento



Fonte: Autora (2015)

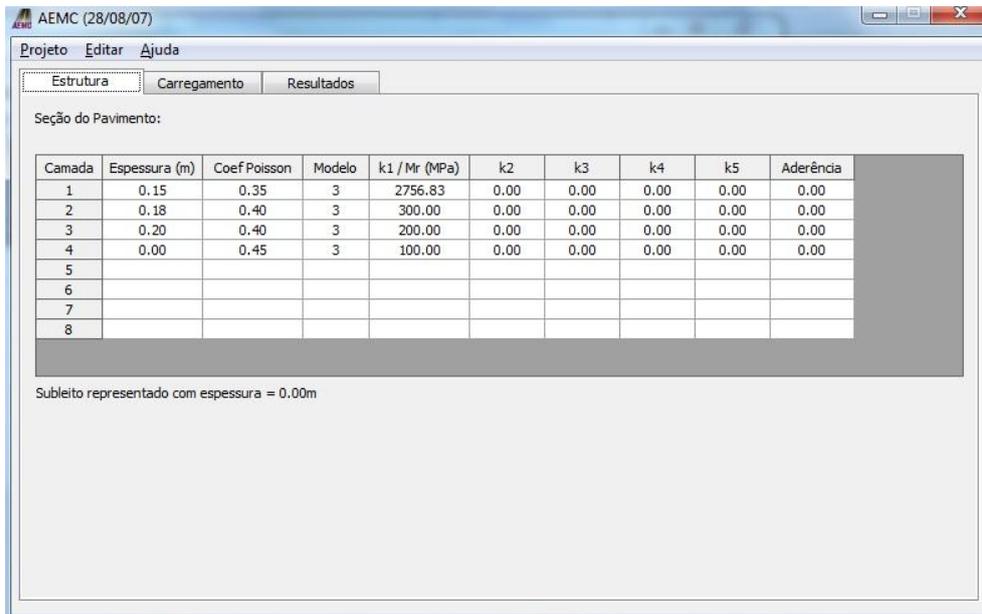
Quadro 12 - Estrutura e características do pavimento

Material	Espessura da camada (m)	Módulo de resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )
CBUQ	0,15	Variável	0,35
Base de brita graduada	0,18	300,000	0,40
Macadame Seco	0,20	200,000	0,40
Subleito	-	100,000	0,45

Fonte: Autora (2015)

Diante da estrutura adotada realizou-se o lançamento desta e de suas características no programa, conforme mostra a Figura 34. Na aba <Estrutura> determinou-se a espessura de cada camada e os parâmetros elásticos e de rigidez dos materiais constituintes de cada uma delas: coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) e módulo de resiliência (MR). Seguindo Franco (2007), para a espessura da camada de subleito adotou-se um valor nulo.

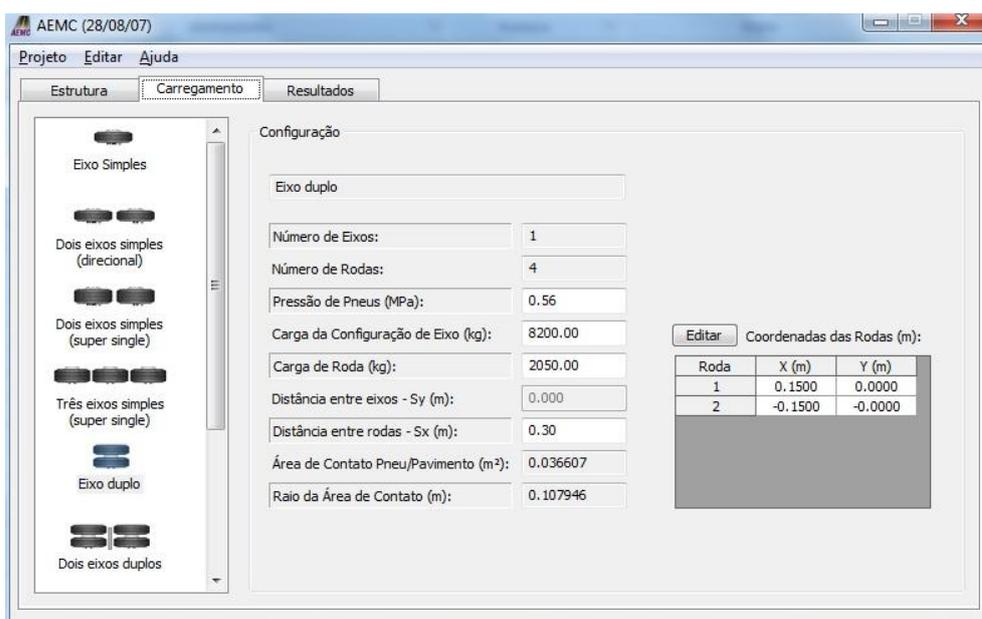
Figura 34 - Aba &lt;Estrutura&gt;



Fonte: Modificado pela Autora com base em Sispav (2015)

Em seguida, seguiu-se para a aba <Carregamento>, onde foi lançada a pressão de pneus em MPa, a carga da configuração de eixo em kg e a distância entre rodas em m. Os demais valores apresentados na Figura 35, foram calculados automaticamente pelo programa.

Figura 35 - Aba &lt;Carregamento&gt;



Fonte: Modificado pela Autora com base em SisPav (2015)

Por fim, na aba última aba, <Resultados>, aplicou-se os pontos do pavimento onde se desejou que a análise fosse realizada. É nesta aba que ocorrem os cálculos de tensões, deformações e deslocamentos nos pontos definidos pelo usuário, indicados nas colunas X(m), Y(m), Z(m), conforme ilustra a Figura 36.

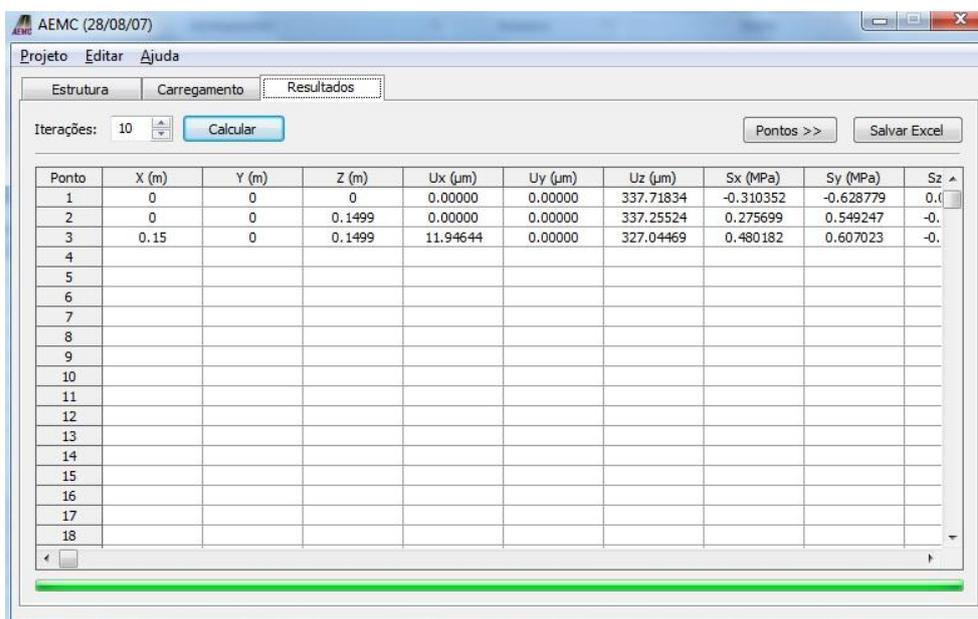
Figura 36 - Aba <Resultados>

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sz
1	0	0	0						
2	0	0	0,1499						
3	0,15	0	0,1499						
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

Fonte: Modificado pela Autora com base em SisPav (2015)

Ao clicar em <Calcular>, o programa SisPav processou os dados informados, apresentando-os ao longo da tabela, permitindo que estes fossem exportados diretamente para o Excel, de acordo com a Figura 37. Através dos dados resultantes desta janela, obteve-se a deflexão, a tensão de tração e a tensão de deformação do pavimento.

Figura 37 - Função &lt;Calcular&gt;



Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sz
1	0	0	0	0.00000	0.00000	337.71834	-0.310352	-0.628779	0.0
2	0	0	0.1499	0.00000	0.00000	337.25524	0.275699	0.549247	-0.0
3	0.15	0	0.1499	11.94644	0.00000	327.04469	0.480182	0.607023	-0.0
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

Fonte: Modificado pela Autora com base em SisPav (2015)

Realizou-se esta mesma análise tanto para as misturas asfálticas com CAP 50/70 quanto para as com Flexpave 55/75, em todas as temperaturas de compactação, variando em cada análise apenas o valor do módulo de resiliência da mistura.

Através desta análise no SisPav obteve-se os dados referentes à tensão de tração, tensão de deformação e deflexão do revestimento asfáltico, possibilitando a determinação da vida de fadiga do pavimento. Segundo Franco (2007), a vida de fadiga consiste na determinação da quantidade de repetições do eixo padrão que os pavimentos tem capacidade de suportar. Sua obtenção deu-se através da utilização da Equação de Pinto e Preussler (2002) (9), representada abaixo.

$$N = 10^5 \times 1,21 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_h}\right)^{2,66} \quad (9)$$

Onde:

N: Vida de fadiga

$\varepsilon_h$ : tensão de deformação

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Introdução

Para a realização dos ensaios das misturas asfálticas com CAP 50/70 e com Flexpave 55/75, foram adotadas 3 diferentes temperaturas de compactação: 100°C, 130°C, e 160°C, respeitando assim um intervalo de 30°C entre elas. Em todos os casos, a energia de compactação aplicada foi de 75 golpes por face. Para cada tipo de mistura, associou-se 3 amostras de cada temperatura, totalizando 18 corpos de prova.

Os dados obtidos através da realização dos ensaios são apresentados a seguir, através de tabelas e gráficos, contemplando a análise das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas confeccionadas, além da análise sobre o impacto na vida útil do pavimento causado pela alteração da temperatura de compactação das misturas asfálticas.

As características volumétricas das misturas asfálticas são apresentadas através da densidade aparente, do volume de vazios e do grau de compactação. Tratando-se das características mecânicas, estas são demonstradas pela resistência à tração por compressão diametral e pelo módulo de resiliência. A análise da vida útil, por sua vez, está relacionada com os dados obtidos através do programa SisPav, apresentados nos resultados de deflexão, tensão de tração e tensão de deformação.

## 4.2 Resultados volumétricos

De acordo com *Asphalt Institute apud ANTT* (2014), a verificação dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas compactadas em laboratório é necessária para se ter um indicativo do desempenho provável que estas misturas apresentarão posteriormente em campo. Deste modo, apresenta-se a seguir os resultados obtidos para os principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas: densidade aparente, grau de compactação e volume de vazios.

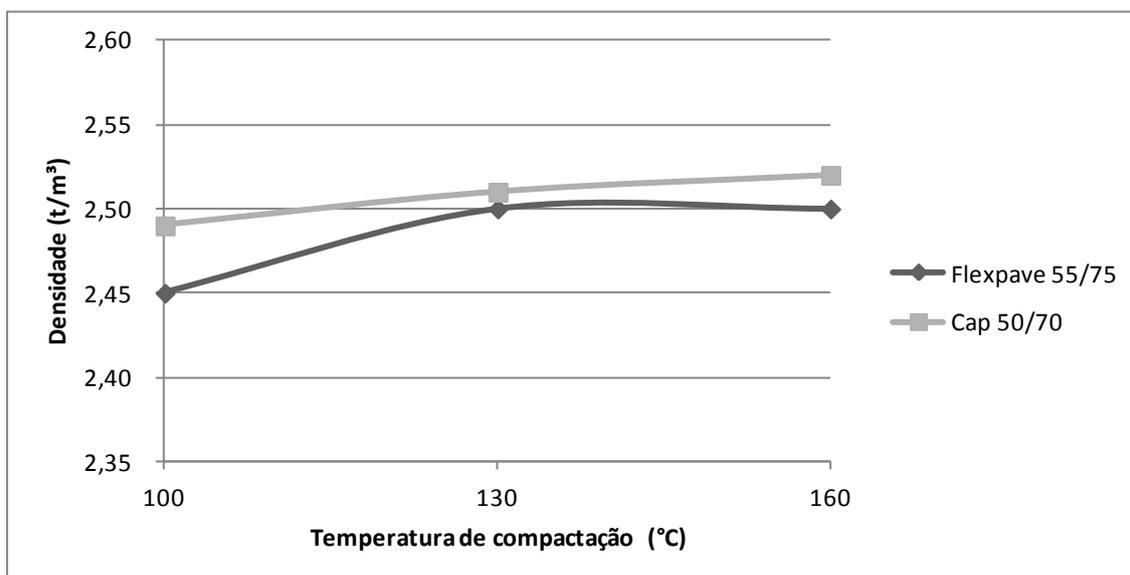
A primeira análise realizada refere-se à densidade aparente das misturas asfálticas. A Tabela 2 e o Gráfico 2 apresentam os resultados obtidos utilizando o método de cálculo empregado no Brasil, pela NBR 12891 (1993) e pelo DNER 117 (1994). Percebe-se que tanto nas misturas com CAP 50/70, quanto nas misturas com Flexpave 55/75, há um aumento na densidade aparente em relação à temperatura de compactação das misturas asfálticas. Quando maior a temperatura de compactação, maior a densidade aparente. Porém, percebe-se que a densidade pouco aumenta entre as misturas compactadas em 130°C e 160°C, as quais estão mais próximas da temperatura ideal de compactação. Além disso, comparando os resultados dos dois tipos de misturas asfálticas, percebe-se que as misturas com CAP 50/70 apresentam densidade aparente mais elevada que as misturas com Flexpave 55/75 em todas as temperaturas de compactação testadas.

Tabela 2 - Características volumétricas das amostras moldadas - Densidade

Ligante	Temperatura (°C)	Densidade (t/m <sup>3</sup> )
CAP 50/70	100	2,49
	130	2,51
	160	2,52
Flexpave 55/75	100	2,45
	130	2,50
	160	2,50

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 2- Densidade x Temperatura



Fonte: Autora (2014)

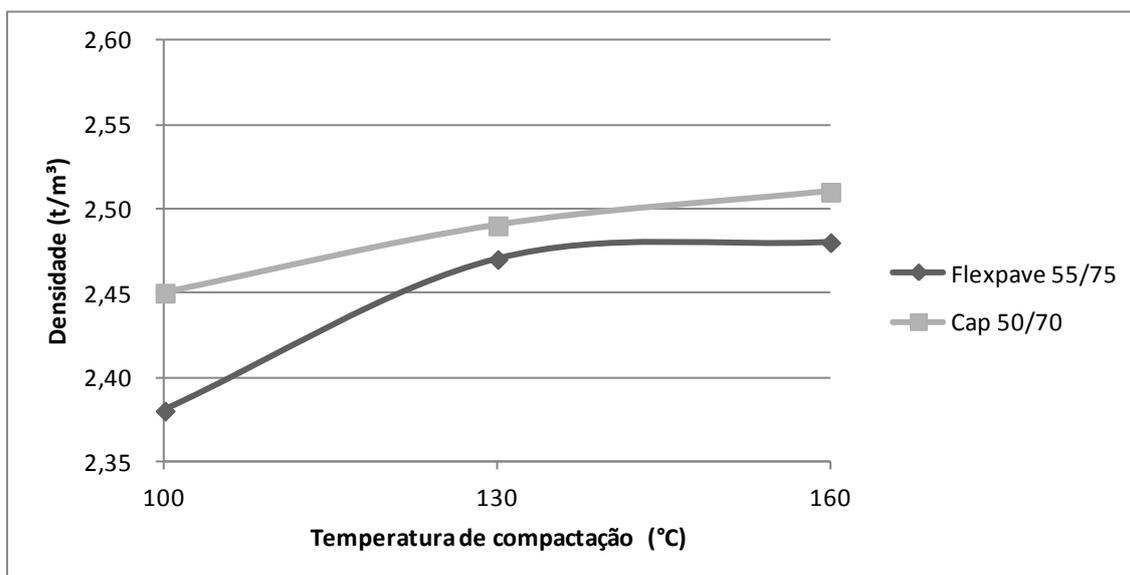
Enquanto isso, a Tabela 3 e o Gráfico 3 indicam os valores encontrados com a utilização do método de cálculo regido pela ASTM D 2726. Diferentemente dos resultados encontrados com a utilização do método anterior, onde a densidade pouco varia nas temperaturas entre 130°C e 160°C, estes apresentam um aumento maior na densidade aparente à medida que a temperatura de compactação é elevada, em todas as temperaturas de compactação para ambos os tipos de misturas asfálticas. Porém, tratando-se do tipo de misturas asfáltica que apresenta maior densidade aparente, em ambos os métodos as misturas asfálticas com CAP 50/70 indiferentemente da temperatura de compactação apresentam densidade aparente maior do que as misturas asfálticas com Flexpave 55/75.

Tabela 3 - Densidade x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Densidade (t/m³)
CAP 50/70	100	2,45
	130	2,49
	160	2,51
Flexpave 55/75	100	2,38
	130	2,47
	160	2,48

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 3 - Densidade x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Na sequência, a Tabela 4 e o Gráfico 4 indicam os resultados obtidos em relação ao grau de compactação das misturas. Assim como para a análise anterior, para o grau de compactação também se analisou os resultados através dos dois métodos de obtenção da densidade aparente das misturas asfálticas.

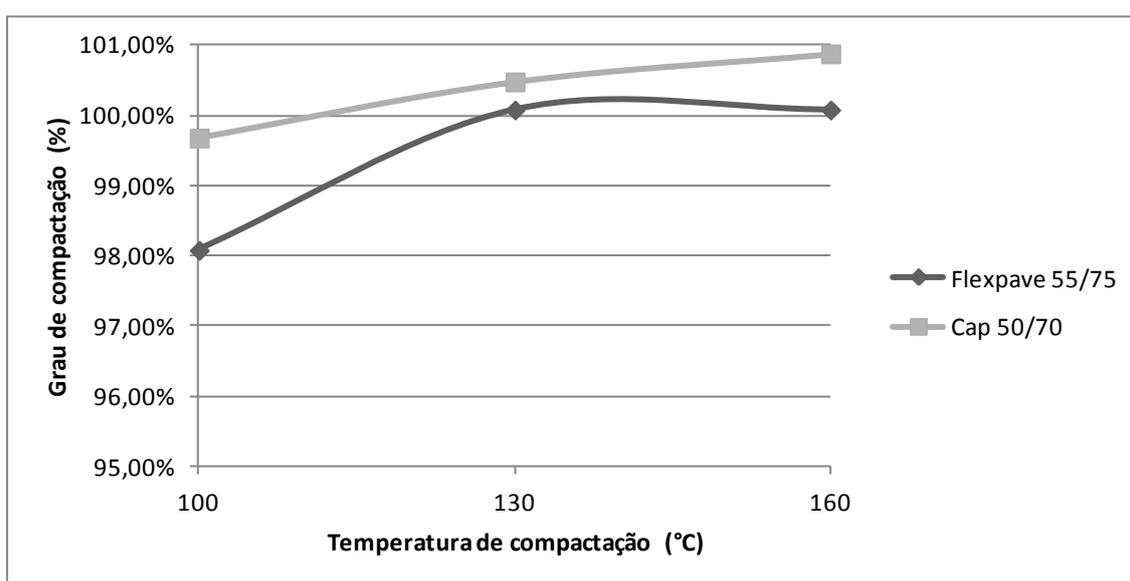
Primeiramente, com a utilização da densidade aparente obtida através do método da NBR, observa-se um grau de compactação acima do limite máximo em quase todas as misturas. Exceto nos corpos de prova compactados à 100°C, onde tanto as misturas com CAP 50/70 quanto as misturas com Flexpave 55/75 apresentam grau de compactação dentro do limite permitido pela especificação vigente, entre 97% e 100%, os demais corpos de prova moldados em 130°C e 160°C, para os dois tipos de misturas asfálticas apresentam um grau de compactação acima do limite máximo. Em todas as temperaturas de compactação, as misturas asfálticas com CAP 50/70 apresentam grau de compactação superior de comparado às misturas com Flexpave 55/75.

Tabela 4 - Grau de compactação x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Grau de compactação (%)
CAP 50/70	100	99,68%
	130	100,48%
	160	100,88%
Flexpave 55/75	100	98,08%
	130	100,08%
	160	100,08%

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 4 - Grau de compactação x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

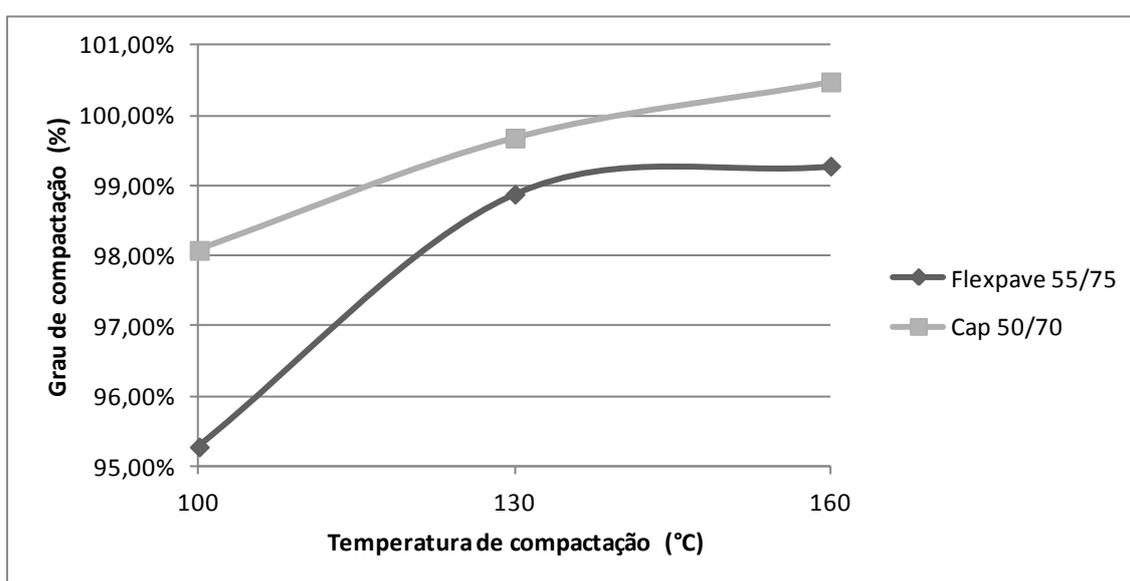
Já nos resultados obtidos através da utilização do método ASTM para determinação da densidade aparente, encontrou-se resultados que se enquadram em sua grande maioria dentro dos limites estabelecidos pela especificação vigente. De acordo com os valores apresentados pela Tabela 5 e Gráfico 5, é possível verificar que a única mistura asfáltica que apresenta grau de compactação inferior ao limite mínimo de 97% é a mistura com Flexpave 55/75 compactada à 100°C. Tratando-se do limite máximo de 100%, a mistura com CAP 50/70 compactada à 160°C é a única a apresentar valor que supera o referido limite. Assim como no método anterior, as misturas asfálticas com CAP 50/70 apresentam grau de compactação maior que o das misturas com Flexpave 55/75.

Tabela 5 - Grau de compactação x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Grau de compactação (%)
CAP 50/70	100	98,08%
	130	99,68%
	160	100,48%
Flexpave 55/75	100	95,28%
	130	98,88%
	160	99,28%

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 5 - Grau de compactação x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Finalizando as análises em relação às propriedades volumétricas das misturas asfálticas, tem-se a apresentação dos resultados do volume de vazios. Para a presente análise adotou-se a mesma prática aplicada para as análises de densidade aparente e grau de compactação. Empregou-se os dois métodos aqui anteriormente mencionados, proporcionando diferentes resultados.

Analisando o método da NBR 16273 (2014), através da Tabela 6 e do Gráfico 6, pode-se constatar, de um modo geral, que ambas misturas asfálticas apresentam uma diminuição em seus volumes de vazios à medida em que a temperatura de compactação é aumentada, todavia nota-se que há uma oscilação entre as misturas com Flexpave 55/75 compactadas em 100°C e 130°C. Também se constata a partir dos dados apresentados que o volume de vazios das misturas com CAP 50/70 são

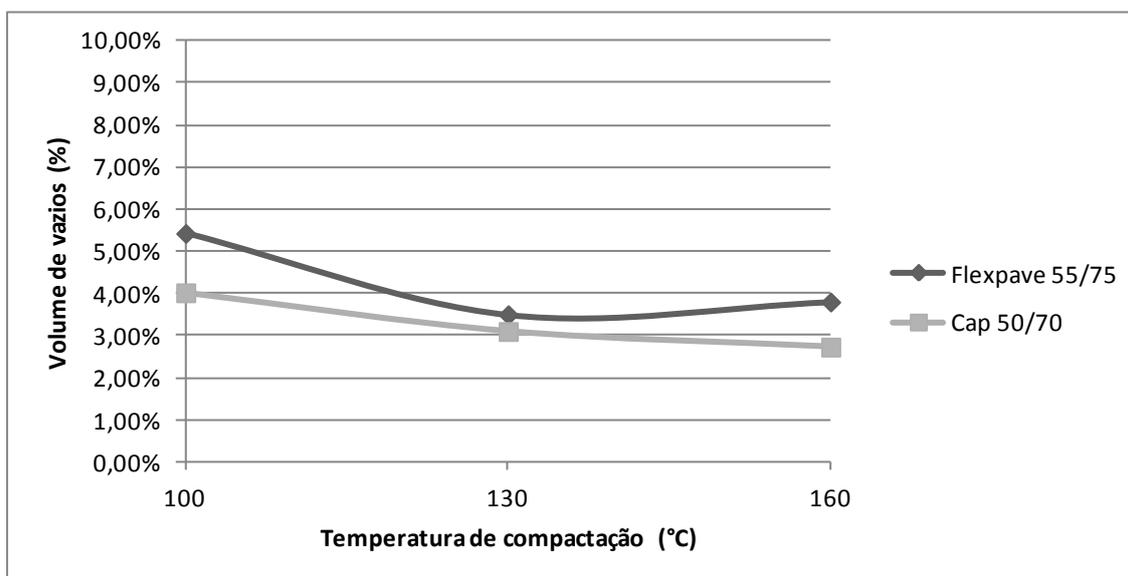
menores em relação às misturas com Flexpave 55/75 em todas as temperaturas de compactação. Tratando-se dos limites mínimos delimitados pela especificação DNIT 031 (2006), observa-se que as misturas com CAP 50/70 compactadas à 100°C estão com Vv abaixo do limite inferior, que é de 3% para camada de rolamento e 4% para camada de ligação (*binder*). Já nas misturas com Flexpave 55/75 compactadas na mesma temperatura, o resultado fica abaixo apenas do limite da camada de ligação (*binder*). Os limites máximos foram superados apenas nas misturas com Flexpave 55/75 compactadas à 160°C, enquadrando-se apenas na camada de rolamento.

Tabela 6 - Volume de vazios x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Volume de vazios (%)
CAP 50/70	100	4,02%
	130	3,10%
	160	2,73%
Flexpave 55/75	100	5,43%
	130	3,50%
	160	3,80%

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 6 - Volume de vazios x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Já nos resultados obtidos seguindo o método do *Asphalt Institute apud ANTT* (2014), conclui-se a partir da apresentação do Gráfico 7 e Tabela 7 que o volume de vazios de ambas misturas asfálticas apresentou um decréscimo no seu percentual

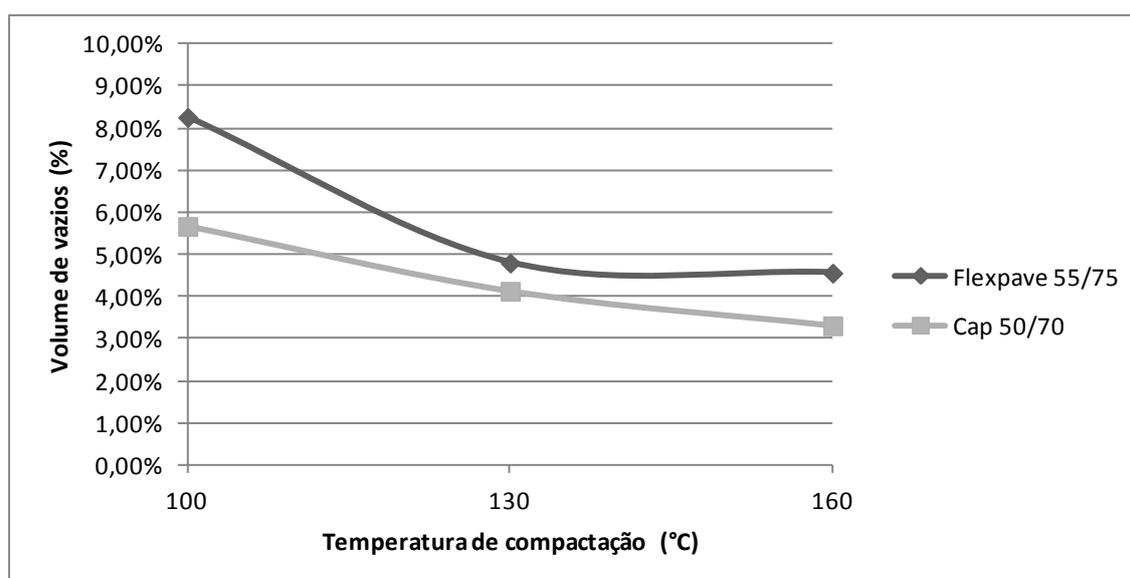
ao passo que a temperatura de compactação das misturas é aumentada, sem nenhuma oscilação, diferentemente dos resultados obtidos pelo método anterior. O Vv das misturas asfálticas compactadas à 100°C com Flexpave 55/75 apresentam-se acima dos limites estabelecidos pelo DNIT 031 (2006), tanto para a camada de rolamento (5%) como também para a camada de ligação (*binder*) (6%), enquanto que as misturas com CAP 50/70 superam apenas o limite de 5%. Enquanto isto, os limites inferiores também apresentam divergências. As misturas com CAP 50/70 apresentam volume de vazios inferior aos 4% necessários para a camada de ligação (*binder*), enquanto que as camadas de Flexpave 55/75 se enquadram em todos os limites inferiores estabelecidos pela especificação.

Tabela 7 - Volume de vazios x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Volume de vazios (%)
CAP 50/70	100	5,67%
	130	4,13%
	160	3,31%
Flexpave 55/75	100	8,26%
	130	4,80%
	160	4,56%

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 7 - Volume de vazios x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

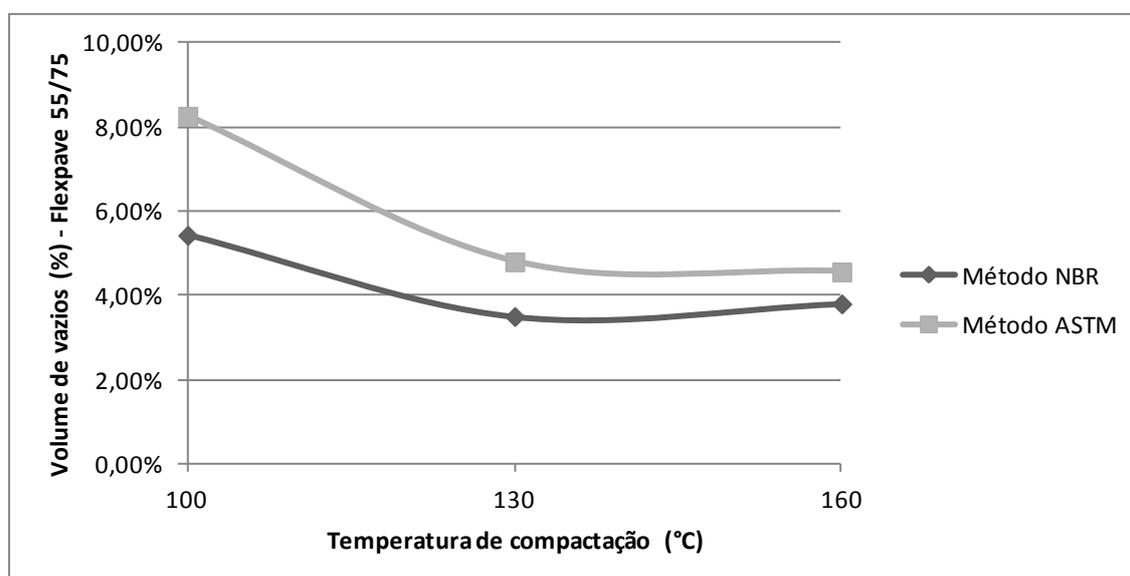
Associando os métodos empregados para análise, conclui-se que ambos tendem à diminuição do volume de vazios se aumentada a temperatura de compactação. Todavia, enquanto o método NBR/DNER apresenta oscilação do volume de vazios nas misturas asfálticas com Flexpave 55/75, o método ASTM apresenta maior coerência nos resultados uma vez que a temperatura decresce a cada redução de temperatura de compactação em ambos os tipos de misturas asfálticas utilizadas, além de apresentar Vv maiores se comparado ao outro método, conforme pode ser visto através da Tabela 8 e Gráfico 8 que apresentam o comparativo do Vv das misturas com Flexpave 55/75 e da Tabela 9 e Gráfico 9, os quais por sua vez apresentam o comparativo do Vv das misturas com CAP 50/70.

Tabela 8 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75

Método	Temperatura (°C)	Volume de vazios (%) - Flexpave 55/75
ASTM	100	8,26%
	130	4,80%
	160	4,56%
NBR	100	5,43%
	130	3,50%
	160	3,80%

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 8 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75



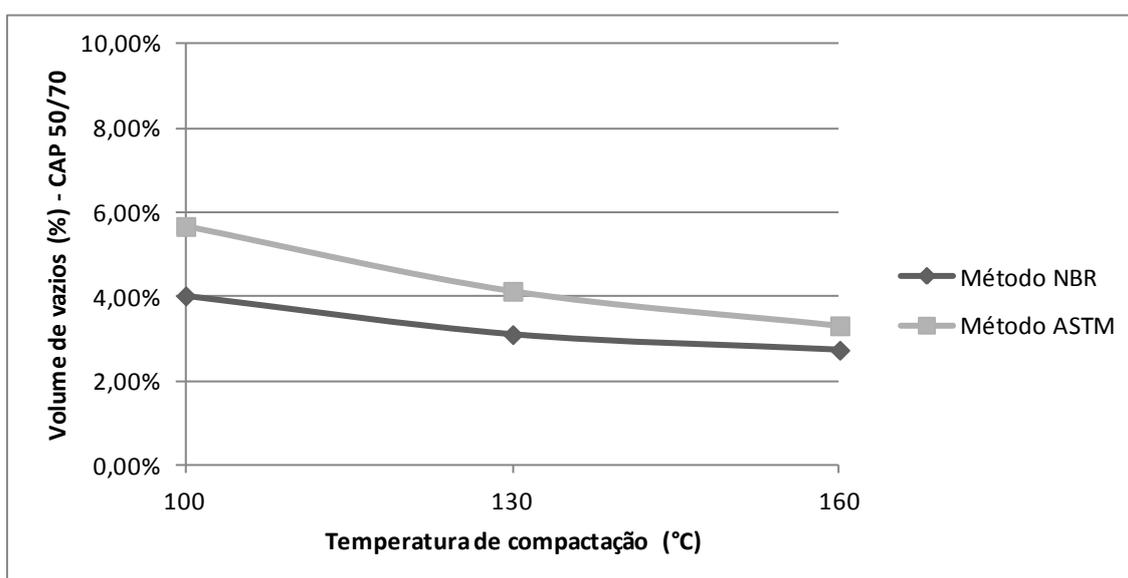
Fonte: Autora (2015)

Tabela 9 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70

Método	Temperatura (°C)	Volume de vazios (%) - CAP 50/70
ASTM	100	5,67%
	130	4,13%
	160	3,31%
NBR	100	4,02%
	130	3,10%
	160	2,73%

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 9 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70



Fonte: Autora (2015)

Em síntese, as misturas com CAP 50/70 se comparadas com as misturas com Flexpave 55/75, apresentaram em todas as temperaturas simuladas densidade aparente e grau de compactação maior e consequentemente, menor volume de vazios. Estes resultados, possivelmente, estão condicionados ao fato de que o projeto empregado para a elaboração das misturas asfálticas (Anexo I) no presente estudo foi originalmente projetado para a utilização do ligante asfáltico Flexpave 55/75, proporcionando resultados mais adequados para as misturas compostas por este ligante.

De um modo geral, analisando as propriedades volumétricas apresentadas, pode-se concluir que existe uma relação direta entre elas, independente do ligante asfáltico utilizado, de modo que, quanto maior a densidade da mistura asfáltica, maior o grau de compactação e menor o seu volume de vazios.

A Figura 38 ilustra claramente um comparativo entre as características volumétricas de misturas asfálticas compactadas em diferentes e extremas temperaturas, 100°C e 160°C. O corpo de prova nº 1 foi compactado à 100°C, enquanto o corpo de prova nº 6 à 160°C, sendo ambos constituídos pelo mesmo ligante, Flexpave 55/75. A diferença é evidente quando comparado o aspecto físico dos dois corpos de prova, sendo possível visualizar que a compactação do corpo de prova nº 6 se mostra muito mais eficiente em relação ao corpo de prova nº 1.

Além dos resultados anteriormente apresentados que comprovam a referida análise, através das imagens é possível visualizar que os agregados do primeiro corpo de prova não estão bem acomodados se comparados aos do segundo. Conseqüentemente, a superfície do corpo de prova nº 1 se apresenta muito mais irregular e sua altura também é maior em relação ao corpo de prova nº 6.

Figura 38 - Comparativo entre a aparência dos corpos de prova de 100°C e 160°C



Fonte: Autora (2015)

### 4.3 Resultados mecânicos

Os corpos de prova moldados foram submetidos a ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR).

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral apresentam-se na Tabela 10 e Gráfico 10. Percebe-se claramente que a resistência à tração aumenta à medida que a temperatura de compactação se eleva. Além disso, os corpos de prova compostos por mistura asfáltica com Flexpave 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.

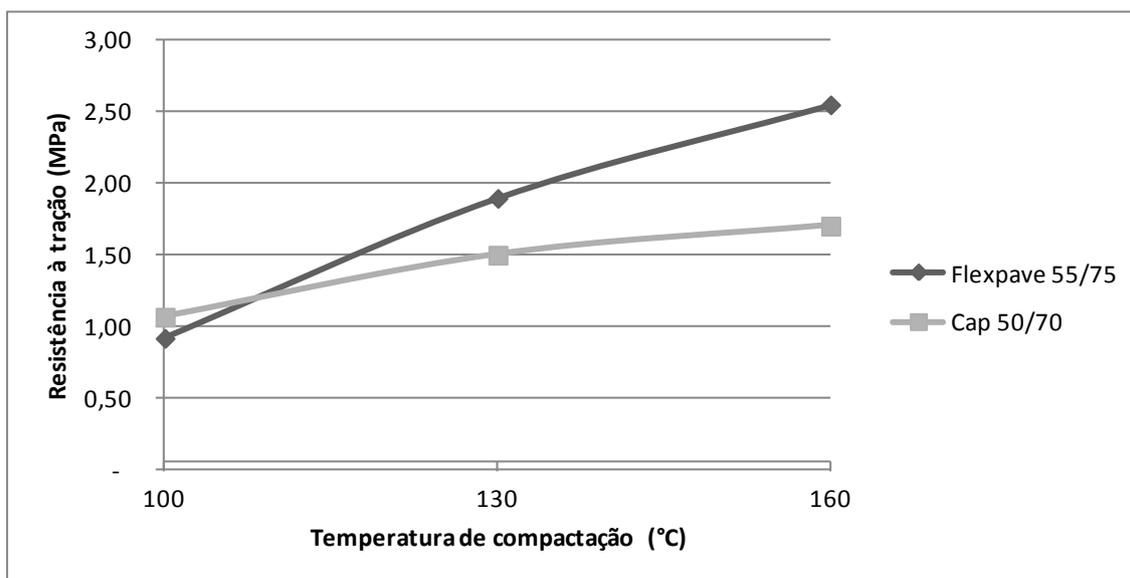
É importante enfatizar que a resistência à tração difere muito entre as temperaturas de compactação. Analisando as temperaturas extremas, observa-se que nas misturas asfálticas com CAP 50/70, a RT da mistura compactada à 160°C é 50% maior do que a RT encontrada na mistura compactada à 100°C. Tratando-se das misturas asfálticas com Flexpave 55/75 essa diferença ganha maiores proporções ainda, uma vez que a RT da mistura asfáltica compactada à 160°C é 170% maior do que a mistura compactada à 100°C. Deste modo, os dados apresentados comprovam que a temperatura de compactação de uma mistura asfáltica é sem dúvida um fator determinante para a resistência à tração que esta mistura irá apresentar.

Tabela 10 - Resistência à tração x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Resistência à tração (RT) (MPa)
CAP 50/70	100	1,07
	130	1,50
	160	1,70
Flexpave 55/75	100	0,92
	130	1,90
	160	2,55

Fonte: Autor (2015)

Gráfico 10 - Resistência à tração x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Examinando os resultados obtidos através do ensaio de módulo de resiliência, através da Tabela 11 e do Gráfico 11, constata-se certa semelhança em relação aos resultados obtidos pelo ensaio de RT, uma vez que o MR aumenta à medida que a temperatura de compactação da mistura asfáltica também 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.

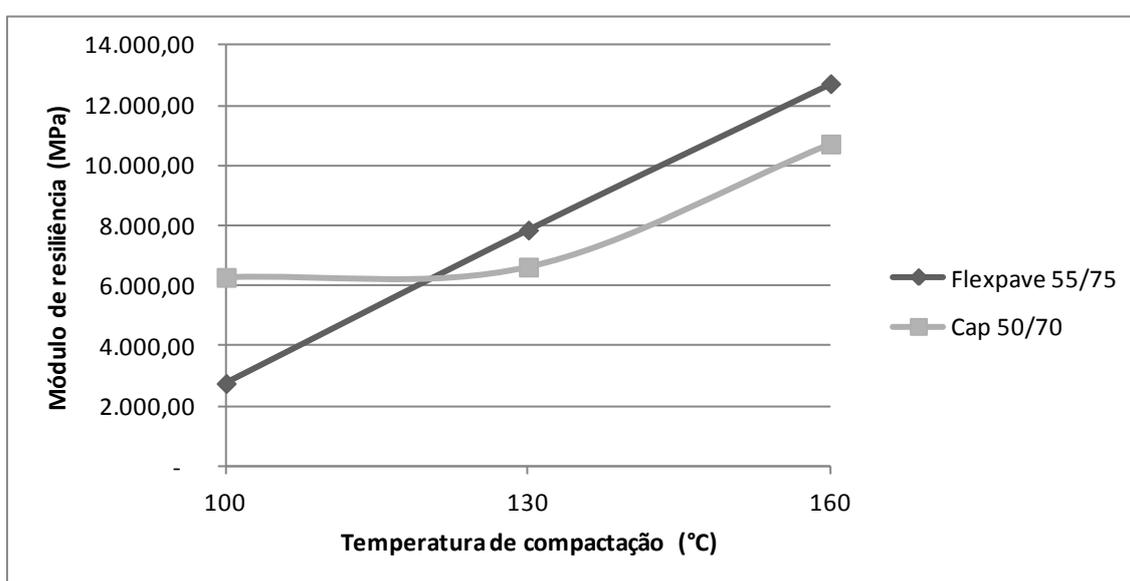
Os resultados indicam que as misturas asfálticas compactadas à 160°C, apresentam MR muito acima do convencional. Para Bernucci et al (2008), as misturas asfálticas que possuem módulo de resiliência entre 12.000 e 20.000 MPa, tem seu módulo considerado elevado, caracterizando a estrutura do pavimento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

Tabela 11 - Módulo de resiliência x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Módulo de resiliência (MR) (MPa)
CAP 50/70	100	6.285,33
	130	6.628,50
	160	10.721,83
Flexpave 55/75	100	2.756,83
	130	7.859,00
	160	12.727,67

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 11 - Módulo de resiliência x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Outro resultado que deve ser analisado é a relação MR/RT, apresentada pela Tabela 12 e Gráfico 12. Segundo Motta et al (2001, p. 12), esta relação consiste em um "parâmetro indicador do balanço adequado entre flexibilidade e resistência das misturas asfálticas". Para Magalhães (2004) uma menor relação MR/RT indica um melhor comportamento mecânico da mistura asfáltica, associado a uma combinação de flexibilidade e resistência à tração.

Devido ao alto módulo de resiliência alcançado pelas misturas asfálticas à medida que a temperatura de compactação é elevada, obtém-se conseqüentemente, uma maior relação MR/RT nas maiores temperaturas de compactação. Esta relação, conforme já citado demonstra uma ausência de equilíbrio entre as propriedades mecânicas da mistura. No presente trabalho, o aumento da relação MR/RT deve-se

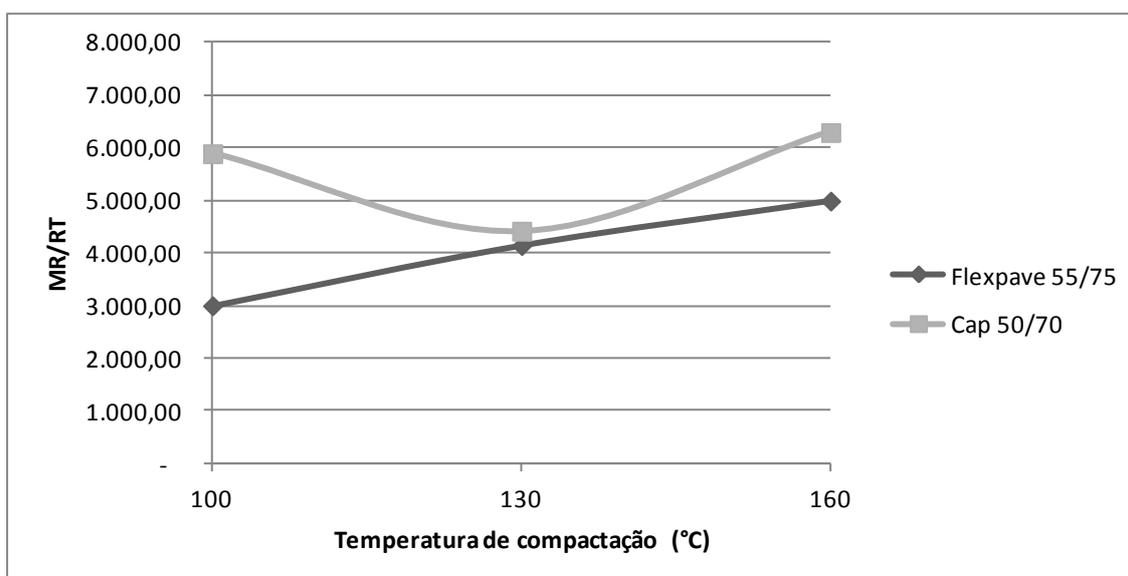
ao aumento do módulo de resiliência das misturas asfálticas nas temperaturas de compactação mais elevadas.

Tabela 12 - Relação MR/RT x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	MR/RT
CAP 50/70	100	5.889,25
	130	4.417,24
	160	6.292,27
Flexpave 55/75	100	2.999,29
	130	4.142,56
	160	4.989,07

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 12 - Relação MR/RT x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Tratando-se da aplicação prática das propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas, apresenta-se a seguir os resultados de deflexão, tensão de tração e tensão de deformação, obtidos com a simulação do pavimento anteriormente apresentado no programa SisPav. A propriedade que incide diretamente sobre os resultados apresentados nesta simulação é o módulo de resiliência das misturas asfálticas.

A Tabela 13 e o Gráfico 13 apresentam o comportamento das misturas asfálticas em relação à sua deflexão. À medida que a temperatura de compactação

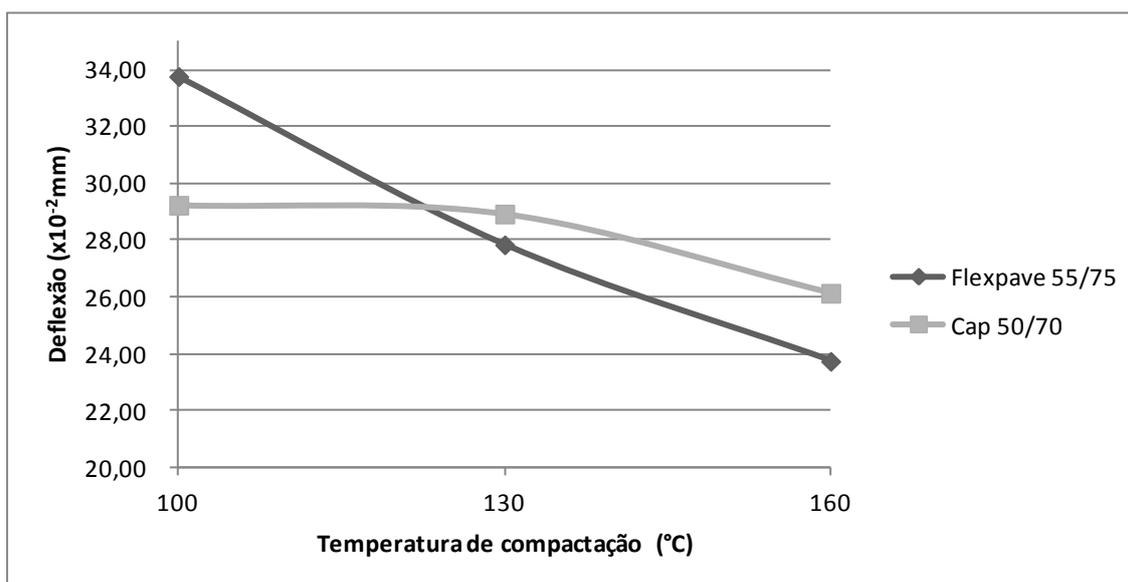
e conseqüentemente o módulo de resiliência são elevados, a deflexão do pavimento diminui, por conseqüência da rigidez adquirida pelo mesmo. Em ambas as misturas, independente do ligante asfáltico empregado ocorre esta redução, sendo mais acentuada nas misturas asfálticas com Flexpave 55/75.

Tabela 13 - Deflexão x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Deflexão (x 10 <sup>-2</sup> mm)
CAP 50/70	100	29,24
	130	28,93
	160	26,14
Flexpave 55/75	100	33,77
	130	27,84
	160	23,74

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 13 - Deflexão x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Enquanto isso a tensão de tração por sua vez, conforme mostra a Tabela 14 e o Gráfico 14, aumenta ao passo que a temperatura de compactação e módulo de resiliência também aumentam. Este aumento está condicionado à ampliação da rigidez do revestimento, conseqüência do aumento do módulo de resiliência, conforme já mencionado. Embora um pavimento mais rígido seja, teoricamente, mais resistente aos carregamentos, seus níveis elevados de tensão de tração

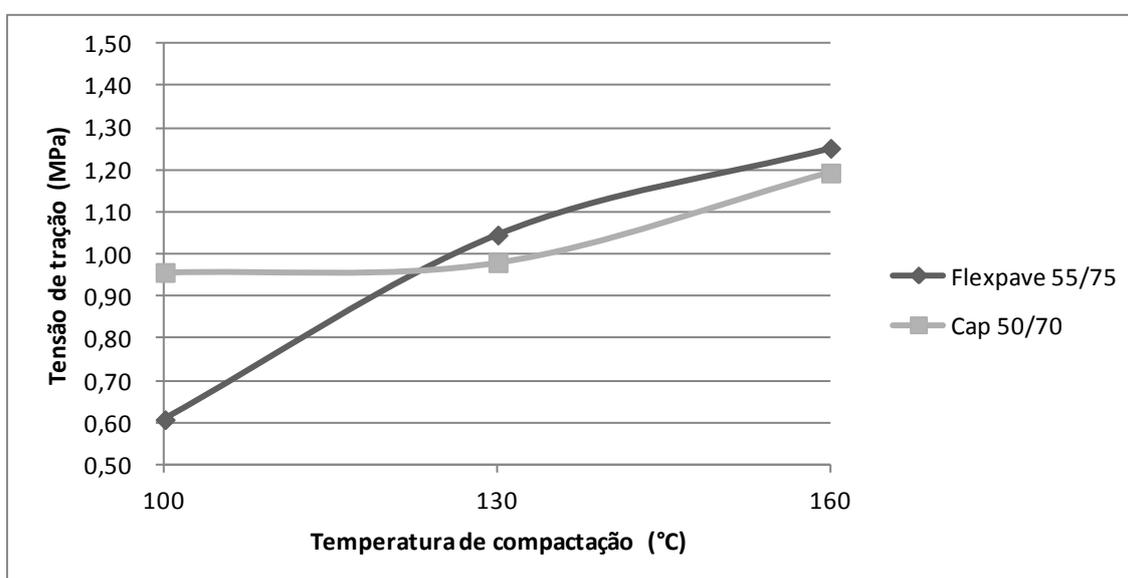
indicam que, no caso da ocorrência de uma ruptura, esta ocorrerá de forma acentuada. As misturas asfálticas com Flexpave 55/75 apresentam-se com maior tensão de tração do que as misturas com CAP 50/70 nas temperaturas de 130°C e 160°C, diferentemente do que acontece na temperatura de 100°C, onde ocorre justamente o contrário.

Tabela 14 - Tensão de tração x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Tensão de tração (MPa)
CAP 50/70	100	0,96
	130	0,98
	160	1,19
Flexpave 55/75	100	0,61
	130	1,05
	160	1,25

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 14 - Tensão de tração x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

Por fim, a deformação de tração é demonstrada pela Tabela 15 e Gráfico 15. Esta, por sua vez, reduz conforme é elevada à temperatura de compactação da mistura asfáltica e conseqüentemente, seu módulo de resiliência. As misturas asfálticas com Flexpave 55/75 apresentam menor deformação para as misturas compactadas a 130°C e 160°C, ao oposto do que ocorre para as misturas compactadas a 100°C. A deformação de tração atua diretamente no

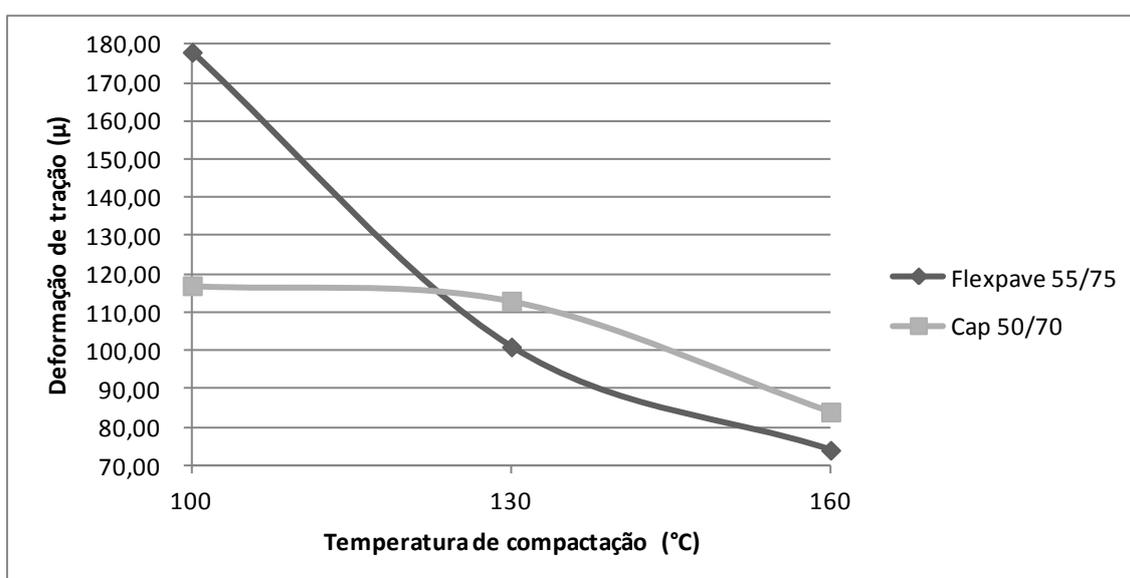
dimensionamento da vida de fadiga ou também chamada vida útil do pavimento, sendo aplicada na equação de Pinto e Preussler (2002).

Tabela 15 - Deformação de tração x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Deformação de tração ( $\mu$ )
CAP 50/70	100	117,00
	130	113,00
	160	84,00
Flexpave 55/75	100	178,00
	130	101,00
	160	74,00

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 15 - Deformação de tração x Temperatura



Fonte: Autora (2015)

A Tabela 16 e o Gráfico 16 ilustram os resultados encontrados com a aplicação dos resultados da deformação de tração das misturas asfálticas na equação de Pinto e Preusser (2002) para a determinação da vida útil dos pavimentos. Sabendo que o aumento a temperatura e do módulo de resiliência do revestimento proporcionam um decréscimo da deformação de tração do mesmo, é possível notar a partir dos dados apresentados que esta condição faz com que a vida útil do pavimento se eleve com o aumento da temperatura. Ou seja, quanto maior a temperatura, maior é o módulo de resiliência e menor é a deformação de tração do pavimento, tendo por consequência uma maior vida útil. Para as misturas

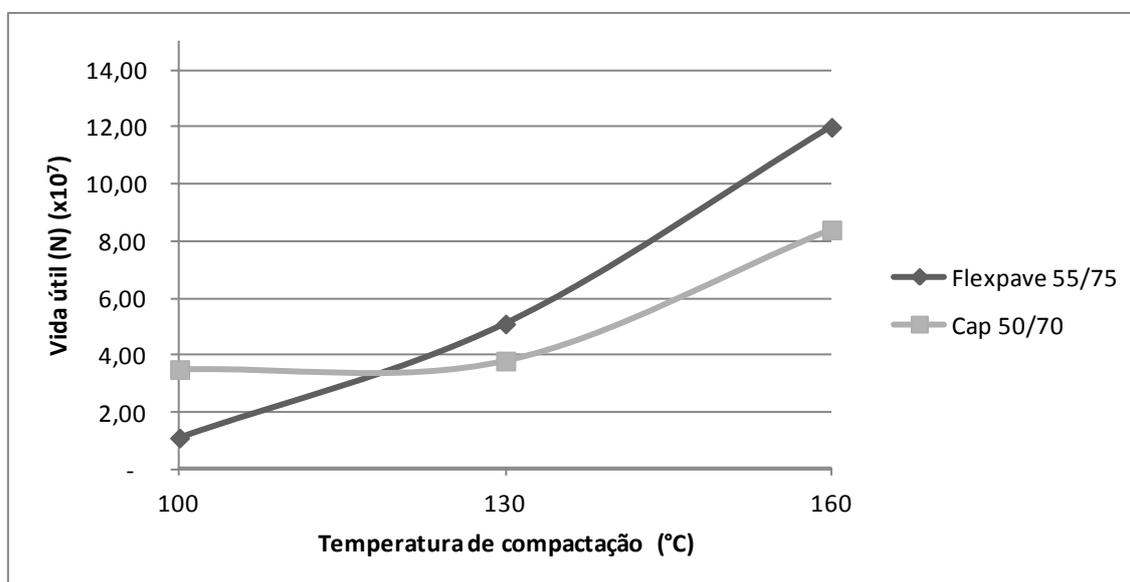
asfálticas compostas por CAP 50/70 tem-se um aumento da vida útil do pavimento maior que 2 vezes se comparadas às misturas compactadas à 100°C e 160°C. Já no caso das misturas com Flexpave 55/75, a vida útil das misturas compactadas à 160°C supera em mais de 10 vezes a vida útil das misturas compactadas à 100°C, comprovando a necessidade da compactação das misturas asfálticas na temperatura adequada.

Tabela 16 – Vida útil x temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Vida útil (N) ( $\times 10^7$ )
CAP 50/70	100	3,50
	130	3,80
	160	8,40
Flexpave 55/75	100	1,10
	130	5,10
	160	12,00

Fonte: Autora (2015)

Gráfico 16 – Vida útil x temperatura



Fonte: Autora (2015)

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo simular, através da compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas, a aplicação destas em obras de pavimentação fora do intervalo de temperatura estabelecido em projeto. O estudo possibilitou a análise do impacto causado na vida útil do pavimento e das propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas, analisando o comportamento das misturas convencionais e com adição de polímero, utilizando os ligantes asfálticos CAP 50/70 e Flexpave 55/75, respectivamente, através da determinação em laboratório das propriedades mecânicas e volumétricas das mesmas.

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, pôde-se chegar a uma série de conclusões e sugestões para futuros trabalhos que deem sequência ao presente estudo. A seguir apresentam-se as conclusões obtidas:

i) A temperatura de compactação incide diretamente nas propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas, tanto nas misturas com CAP 50/70 como também nas misturas com Flexpave 55/75;

ii) A utilização do método ASTM para obtenção da densidade aparente mostrou maior coerência nos resultados se comparado com o método NBR/DNER. Esta coerência se deu pelo fato dos resultados obtidos através da utilização do método ASTM não apresentarem oscilações como os resultados obtidos pelo método da NBR/DNER. Conclui-se que o método ASTM mostra-se mais próximo do real, uma vez que considera os vazios superficiais das misturas asfálticas;

iii) As densidades aparentes obtidas através da utilização dos dois métodos apresentaram um aumento à medida que a temperatura de compactação foi elevada, sendo que em ambos os métodos as misturas com CAP 50/70 apresentaram maiores densidades se comparadas às misturas com Flexpave 55/75. Os resultados através do método ASTM indicaram que as misturas com CAP 50/70 apresentaram uma variação na densidade de 2,45 t/m<sup>3</sup> para 2,51 t/m<sup>3</sup> entre 100°C e 160°C, enquanto que as misturas com Flexpave 55/75 apresentaram maior variação, passando de 2,38 t/m<sup>3</sup> para 2,48t/m<sup>3</sup> no mesmo intervalo de temperatura. Através da utilização do método NBR/DNER obteve-se uma menor variação nos resultados entre os intervalos de temperatura de compactação das misturas asfálticas. Tratando-se das misturas com CAP 50/70, a densidade aparente alterou de 2,49 t/m<sup>3</sup> para 2,51 t/m<sup>3</sup> no intervalo de temperatura de 100°C e 160°C. Já nas misturas com Flexpave 55/75 o aumento foi de 2,45 t/m<sup>3</sup> para 2,50 t/m<sup>3</sup> no mesmo intervalo de temperatura;

iv) As misturas com CAP 50/70 apresentaram grau de compactação maior se comparadas às misturas com Flexpave 55/75 em ambos os métodos de cálculo. Através da utilização do método ASTM, chegou-se a graus de compactação que respeitaram em sua grande maioria os limites estabelecidos em especificação. As misturas com CAP 50/70 tiveram um aumento de 98,08% para 100,48% no grau de compactação entre 100°C e 160°C, enquanto que as misturas com Flexpave 55/75 aumentaram de 95,28% para 99,28% no mesmo intervalo. Já no método da NBR/DNER o grau de compactação das misturas com CAP 50/70 passou de 99,68% para 100,88%, enquanto o das misturas com Flexpave 55/75 passou de 98,08% para 100,08% utilizando as mesmas temperaturas do método anterior;

v) O volume de vazios apresentou um decréscimo no seu percentual à medida que as temperaturas de compactação foram elevadas, sendo que os volumes de vazios das misturas com CAP 50/70 apresentaram-se menores se comparados aos volumes de vazios das misturas com Flexpave 55/75. No método ASTM o volume de vazios reduziu de 5,67% para 3,31% entre 100°C e 160°C nas misturas com CAP 50/70, enquanto que nas misturas com Flexpave 55/75 estes valores passaram de 8,26% para 4,56% respeitando o mesmo intervalo de tempo. No método da NBR/DNER, as misturas com CAP 50/70 tiveram uma variação no volume de vazios de 4,02% para 2,73% entre 100°C e 160°C. Porém, as misturas

com Flexpave 55/75 sofreram oscilações, onde o volume de vazios aos 100°C era de 5,43%, e aos 130°C era de 3,50%, aumentando para 3,80% aos 160°C;

vi) A resistência à tração das misturas asfálticas apresentou-se maior ao passo que a temperatura de compactação foi elevada. As misturas com Flexpave 55/75 apresentaram-se até 50% mais resistentes se comparadas às misturas com CAP 50/70 na maioria das temperaturas de compactação. Nas misturas com CAP 50/70 a resistência aumentou mais de 58% entre os 100°C e 160°C. Já nas misturas com Flexpave este aumento ficou em cerca de 170% no mesmo intervalo de temperatura;

vii) O módulo de resiliência foi elevado juntamente da temperatura de compactação. As misturas com Flexpave 55/75 apresentaram maior módulo e também maior variação deste entre as diferentes temperaturas de compactação. O módulo de resiliência das misturas com CAP 50/70 aumentou de 6.285,33 MPa para 10.721,83 MPa, entre 100°C e 160°C. Já as misturas com Flexpave apresentaram módulo de 2.756,83 MPa aos 100°C, e 12.727,67 MPa aos 160°C. Ambas as misturas apresentaram módulo muito elevado na temperatura máxima de compactação;

viii) A deflexão do pavimento analisado apresentou redução à medida que a mistura asfáltica teve sua temperatura de compactação elevada. Nas misturas com CAP 50/70 a redução ficou em torno de 10% enquanto que nas misturas com Flexpave 55/75 a redução chegou a quase 30%;

ix) A tensão de tração do pavimento foi elevada com o aumento da temperatura de compactação, apresentando para as misturas com CAP 50/70 uma tensão quase 25% maior nas misturas compactadas a 160°C se comparadas às misturas compactadas a 100°. Já para as misturas com Flexpave 55/75 este aumento chegou a superar 100%, comparando o mesmo intervalo de temperatura;

x) A tensão de deformação apresentou decréscimo à medida que a mistura teve sua temperatura de compactação reduzida. Para as misturas com CAP 50/70 a redução ficou em torno de 28% e nas misturas com Flexpave 55/75 em torno de 58%, considerando para ambos os casos a variação de 100°C para 160°C;

xi) A análise da vida útil do pavimento permitiu verificar a incidência direta que a temperatura de compactação tem sobre ela, uma vez que a redução da temperatura de 160°C para 100°C ocasiona uma redução da vida útil do pavimento para as misturas com CAP 50/70 de até 58%, enquanto que para o mesmo intervalo

de temperatura as misturas com Flexpave 55/75 apresentam redução da vida útil de 90%.

Diante das conclusões já apresentadas pôde-se também concluir que:

i) As misturas asfálticas com Flexpave 55/75 apresentaram resultados volumétricos e mecânicos mais satisfatórios se comparados aos resultados das misturas com CAP 50/70, possivelmente pelo fato do projeto utilizado ter sido originalmente elaborado para a utilização do ligante Flexpave 55/75;

ii) As baixas temperaturas de compactação tem influência mais acentuada sobre as propriedades das misturas asfálticas com Flexpave 55/75. Isso demonstra o quão importante é o controle da temperatura de execução das misturas asfálticas com este ligante, uma vez que seu custo de aquisição é maior se comparado aos ligantes convencionais e é justamente empregado em locais que necessitam de um bom desempenho do pavimento;

iii) A compactação das misturas asfálticas fora da temperatura ideal proporciona um volume de vazios fora do limite estabelecido pela especificação vigente, podendo levar ao aparecimento de patologias no pavimento, ocasionadas por situações como a infiltração de água e a desintegração dos agregados;

iv) A compactação das misturas asfálticas a uma temperatura muito elevada pode proporcionar um módulo de resiliência muito alto, gerando uma maior tensão de tração, o que torna o pavimento mais rígido e também mais suscetível a rompimentos bruscos;

v) A vida útil do pavimento está diretamente ligada à correta execução do pavimento, respeitando as temperaturas de compactação da camada de revestimento, uma vez que misturas compactadas em temperaturas inferiores às adequadas influenciam no decréscimo acentuado da vida útil do pavimento.

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos que deem continuidade ao presente estudo sugere-se:

i) Acrescentar novas temperaturas de compactação, inclusive as ideais de compactação, ampliando a gama de resultados, e assim possibilitando uma análise com maior precisão;

ii) Utilizar um projeto específico para as misturas com CAP 50/70, a fim de analisar o comportamento destas misturas em relação as suas propriedades mecânicas e volumétricas, possibilitando um melhor desempenho dos resultados;

iii) Realizar a associação do estudo com uma situação real, utilizando uma rodovia que apresente patologias decorrentes das propriedades analisadas.

## 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. 2015.

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, José Tadeu. **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, Flavia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Veronica Amanda Brombley. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Espírito Santo, 2008.  
<[http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav\\_apresentacoes/ISIS\\_RAQUEL.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/ISIS_RAQUEL.pdf) >. Acesso em: 29 mai. 2015.

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, Jorge Augusto Pereira; 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. 2014.

FONSECA, Luiz Felipe da Silva da. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/1-mestrado/117-2013?start=30](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/1-mestrado/117-2013?start=30)>. Acesso em: 30 mai. 2015.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/28-doutorado/63-2007?start=15](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/28-doutorado/63-2007?start=15)>. Acesso em: 30 mai. 2015.

GRECA ASFALTOS. Disponível em: < <http://www.grecaasfaltos.com.br/menu-esquerda-produtos-asfaltos-cap>>. Acesso em: 12 out. 2014.

GRECA ASFALTOS. Disponível em: < <http://www.grecaasfaltos.com.br/menu-esquerda-produtos-asfaltos-flexpave>>. Acesso em: 12 out. 2014.

MAGALHÃES, Sidlei Teixeira. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2004/Teses/MAGALHAES\\_ST\\_04\\_t\\_M\\_geo.pdf](http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2004/Teses/MAGALHAES_ST_04_t_M_geo.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2015.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < [http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/28-doutorado/60-2004?Itemid=>](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/28-doutorado/60-2004?Itemid=>)>. Acesso em: 01 jun. 2015.

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

SOARES, Jorge Barbosa; SILVEIRA, Márcio Albuquerque; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **O efeito da temperatura e do grau de compactação nas propriedades das misturas asfálticas**. 2001. Disponível em: < [www.antt.gov.br/html/objects/\\_downloadblob.php?cod\\_blob=3240](http://www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=3240)>. Acesso em: 01 jun. 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Departamento de Transportes do Setor de Tecnologia. **Notas de aula: Introdução à pavimentação**. Paraná, 2012. Disponível em: <<http://www.dtt.ufpr.br/pavimentacao/notas/mod1introducao.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2014.

## **ANEXOS**

## Anexo I - Projeto da mistura asfáltica



PROJETO CONPASUL  
DNIT 031/2006-ES Faixa C  
Ligante Asfáltico Flexpave 55/75

PROJETO DE CONCRETO ASFÁLTICO  
Método de Dosagem - MARSHALL  
Camada de Rolamento



**UFRGS**  
UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL

DEZEMBRO | 2012



**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816 Bairro Agronomia. CEP 91501-970.  
Laboratório de Pavimentação - Área de Testes e Pesquisas de Pavimentos  
Telefones: +55 51 3308-7049. Fax: +55 51 3308-3999. lapav1@cpgec.ufrgs.br

### Caracterização dos Agregados

#### 1 - IDENTIFICAÇÃO

Projeto:	Concreto Asfáltico
Operador:	
Data:	
Objetivo:	Projeto de mistura em concreto asfáltico
Obs:	CAP 55/75 E

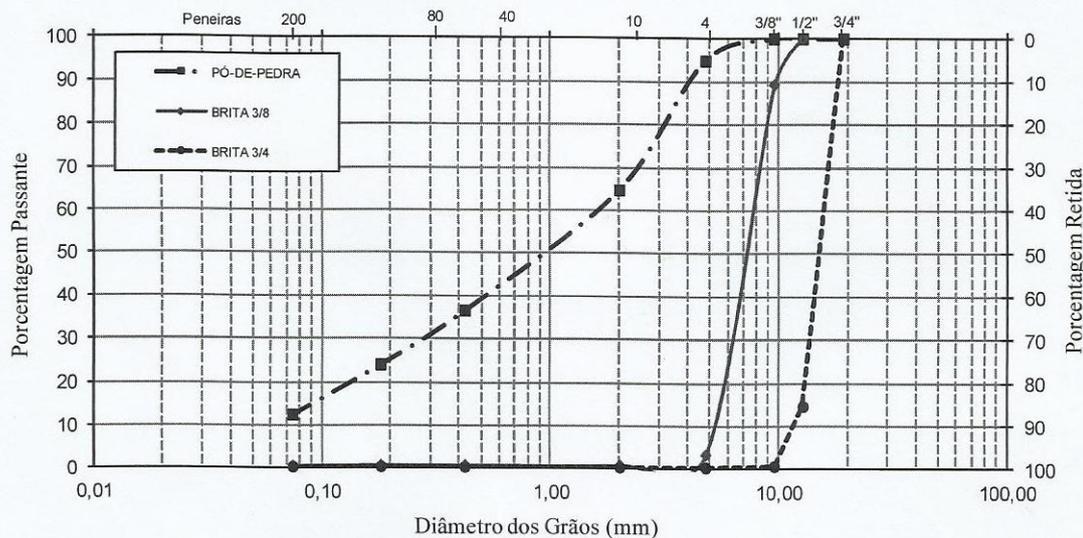
#### 2. PROCEDÊNCIA DOS ABREGADOS MINERAIS

Material	Procedência
BRITA 3/4	
BRITA 3/8	
PÓ-DE-PEDRA	
AREIA	
FÍLER	

#### 3 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

PENEIRA	mm	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FÍLER
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00		
1/2"	12,70	14,61	100,00	100,00		
3/8"	9,50	0,65	89,36	100,00		
n 4	4,76	0,36	3,36	94,87		
n 10	2,00	0,36	0,81	64,73		
n 40	0,42	0,36	0,76	36,53		
n 80	0,18	0,35	0,70	24,05		
n 200	0,07	0,31	0,54	12,48		

Granulometria Material Pétreo



#### 4. ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO GRAÚDO (DAER108/01)

Material	Valor otido no ensaio (utilização da placa de lamelaridade)
BRITA 3/4	
BRITA 3/8	



**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816 Bairro Agronomia, CEP 91501-970  
Laboratório de Pavimentação - Área de Testes e Pesquisas de Pavimentos

Telefones: +55 51 3308-7049, Fax: +55 51 3308-3999.  
lapav1@cpgec.ufrgs.br

### Composição Granulométrica - Projeto CBUQ

SOLICITANTE:

DATA:

#### 1 - GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

PENEIRA	mm	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FÍLER
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	0,00	0%
1/2"	12,7	14,61	100,00	100,00	0,00	0%
3/8"	9,50	0,65	89,36	100,00	0,00	0%
n 4	4,76	0,36	3,36	94,87	0,00	0%
n 10	2,00	0,36	0,81	64,73	0,00	0%
n 40	0,42	0,36	0,76	36,53	0,00	0%
n 80	0,18	0,35	0,70	24,05	0,00	0%
n 200	0,074	0,31	0,54	12,48	0,00	0%

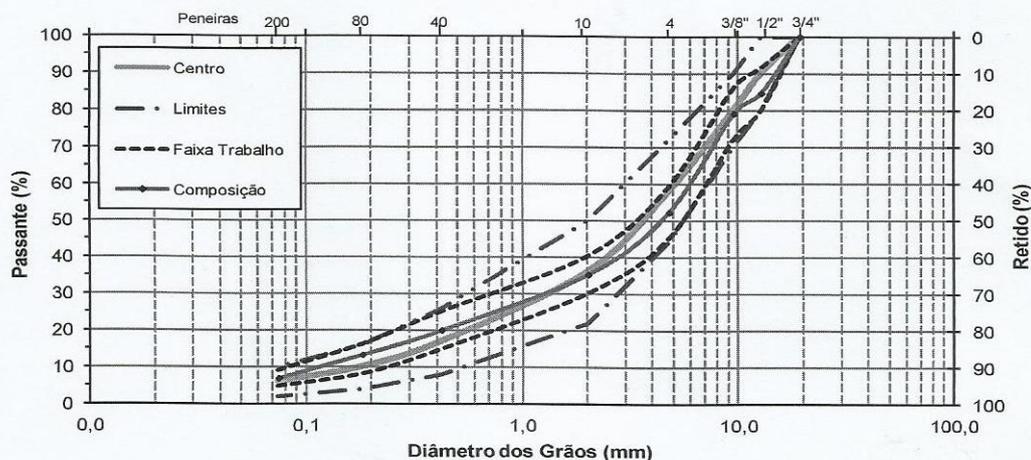
#### 2 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA

% mistura		18%	28%	54%	0%	0%
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FILLER
3/4"	19,1	18,0	28,0	54,0	0,0	0,0
1/2"	12,7	2,6	28,0	54,0	0,0	0,0
3/8"	9,50	0,1	25,0	54,0	0,0	0,0
n 4	4,76	0,1	0,9	51,2	0,0	0,0
n 10	2,00	0,1	0,2	35,0	0,0	0,0
n 40	0,42	0,1	0,2	19,7	0,0	0,0
n 80	0,18	0,1	0,2	13,0	0,0	0,0
n 200	0,074	0,1	0,2	6,7	0,0	0,0
frações		BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FILLER
%		18%	28%	54%	0%	0%
					<b>TOTAL</b>	100%

#### 3 - ESPECIFICAÇÃO E MISTURA

PENEIRA	mm	Limite	centro faixa	Faixa de Trabalho		MISTURA
3/4"	19,1	100	100	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	80 - 100	90	80,0	91,6	84,6
3/8"	9,50	70 - 90	80	72,1	86,1	79,1
n 4	4,76	44 - 72	58	45,2	59,2	52,2
n 10	2,00	22 - 50	36	30,2	40,2	35,2
n 40	0,42	8 - 26	17	15,0	25,0	20,0
n 80	0,18	4 - 16	10	8,2	16,0	13,2
n 200	0,074	2 - 10	6	4,9	8,9	6,9

#### Composição Granulométrica - Faixa C DNIT - 031/2006 ES





**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816  
Bairro Agronomia. CEP 91501-970.

Telefones:  
+55 51 3308-7049. Fax: +55 51 3308-3999.  
lapav1@cpgec.ufrgs.br

## Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall

### 1 - IDENTIFICAÇÃO

<b>Projeto:</b>	Concreto Asfáltico
<b>Operador:</b>	
<b>Ligante:</b>	CAP 55/75 E
<b>Data:</b>	
<b>Mistura:</b>	
<b>Obs:</b>	

### 2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL

	AGREGADOS					CAP	MISTURA MINERAL	
	% retida	D <sub>Real</sub> :	D <sub>ap</sub> :	D <sub>efetiva</sub> :	Absorção	Densidade	D <sub>real</sub> :	2,954
3/4" - n° 10	64,75	2,954	2,824	2,889	1,550	0,999	D <sub>ap</sub> :	2,868
pas n° 10	35,25	2,954					D <sub>efet</sub> :	2,912

### 3 - ESPECIFICAÇÕES

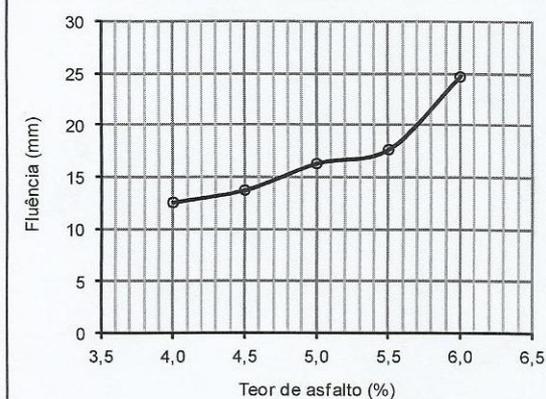
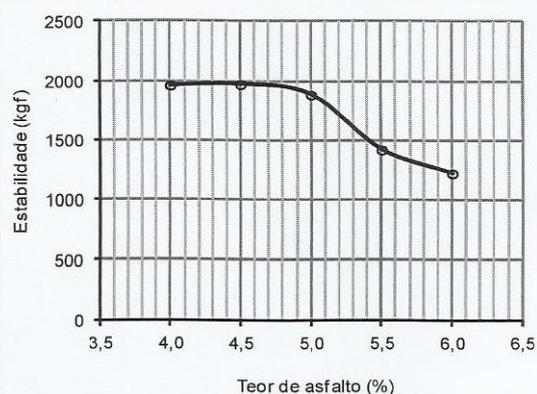
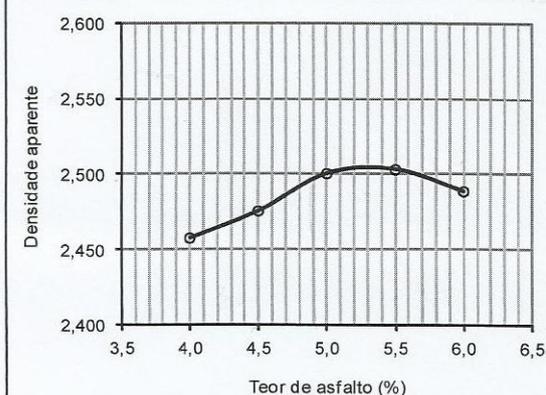
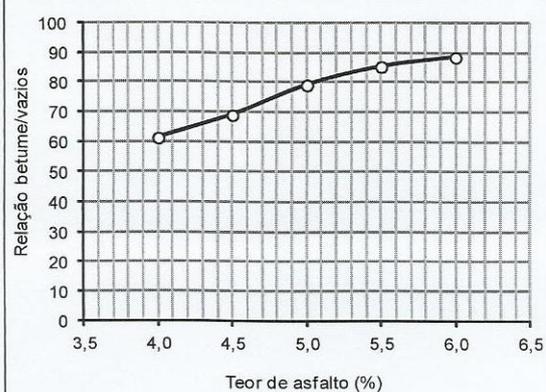
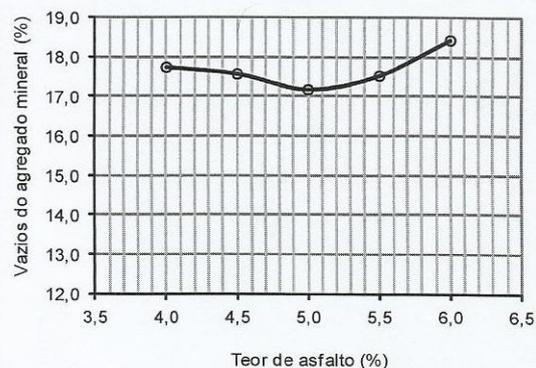
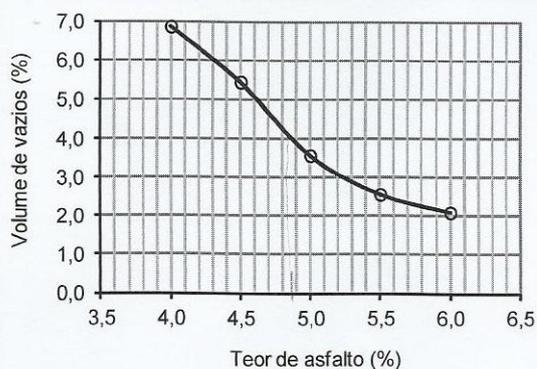
Parâmetro	DNER	DAER - RS
Parâmetro	CAPA	CAPA
Perc. Vazios (%)	3 a 5	3 a 5
RBV (%)	75 a 82	75 a 82
Estabilidade(kgf)	>500	> 800
Fluência (1/100")	8 a 18	8 a 16
VAM para 3/4"	--	> 16

### 4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO

<b>Mistura:</b>	4 cps na cuba
<b>Compactação:</b>	75 golpes por face em compactador mecânico

### 5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

Propriedade	Teor de Ligante (%)					
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
Volume de Vazios (%)	6,4	5,1	3,5	2,5	2,1	
Relação Betume Vazios (%)	61	69	78	85	88	
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,32	16,33	16,00	16,28	17,01	
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	2,639	2,618	2,593	2,569	2,542	
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	2,469	2,484	2,503	2,505	2,490	
Estabilidade (kN)	1964	1976	1888	1423	1228	
Fluência (mm)	13	14	17	18	25	
Relação Est/Fluência (kN.mm)	157	173	208	160	193	

**6 - GRÁFICOS METODOLOGIA MARSHALL - MÉTODO NBR**




**LAPAV**  
 LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816  
 Bairro Agronomia. CEP 91501-970.

Telefones:  
 +55 51 3308-7049. Fax: +55 51 3308-3999.  
 lapav1@cpgec.ufrgs.br

**7 - PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA - Definido Segundo Método da NBR 15.619-A**

<i>Propriedade</i>	<i>ESP 16/91 DAER</i>	<i>Valor de Projeto</i>
<i>Teor de Betume (%)</i>	--	<b>4,90</b>
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	<b>4,00</b>
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	<b>78,00</b>
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	<b>17,20</b>
<i>Massa Esp. Max. Medida (kN/m<sup>3</sup>)</i>	--	<b>2,595</b>
<i>Massa Esp. Aparente (kN/m<sup>3</sup>)</i>	--	<b>2,498</b>
<i>Estabilidade (kgf)</i>	> 800	<b>1900</b>
<i>Fluência (1/100 in)</i>	8 a 16	<b>15,9</b>
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	--	<b>1,21</b>
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	--	<b>4540</b>
<i>Relação Mr/Rt (adm)</i>	--	<b>3752</b>
<i>Relação Est/Fluência (kgf.m)</i>	--	<b>119</b>
<i>Relação Filler/Betume (%)</i>	0,6 a 1,6 (Superpave)	<b>1,39</b>

**Relação Filler/Betume**

% passante na 200	6,96
teor de ligante (%)	5,00
<b>R F/B</b>	<b>1,39</b>

