

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Larissa Montagner de Barros**

**DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS COM DIFERENTES LIGANTES:  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DO  
PARÂMETRO *FLOW NUMBER***

Porto Alegre  
dezembro 2014

**LARISSA MONTAGNER DE BARROS**

**DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS COM DIFERENTES LIGANTES:  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DO  
PARÂMETRO *FLOW NUMBER***

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**LARISSA MONTAGNER DE BARROS**

**DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS COM DIFERENTES LIGANTES:  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DO  
PARÂMETRO *FLOW NUMBER***

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
DSc. Pela UFRJ  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Washington Peres Núñez**  
(UFRGS)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul

**Lélio Antônio Teixeira Brito**  
(PUCRS)  
PhD. pela University of Nottingham

**Marlova Grazziotin Johnston**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Jorge Augusto Pereira Ceratti**  
(UFRGS)  
DSc. pela Universidade Federal do Rio de  
Janeiro

Dedico este trabalho a meus pais, Carlos Eduardo e Marlene, e a minha irmã Eduarda que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, pela orientação, incentivo, apoio e conhecimento transmitido ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt, pela dedicação e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos demais professores da Escola de Engenharia, que ensinam muito mais do que sermos bons alunos, mas a sermos bons profissionais.

Agradeço a toda equipe do Lapav que foi de fundamental importância na elaboração deste trabalho, principalmente aos pesquisadores Lélío e Marlova, ao professor Washington, aos funcionários Maria Bernadette, Ivo, Vinícius, Daniel, Lucas P. e Rodrigo, aos bolsistas Lucas A., Caroline, Thomas, Kethelin, Maximiliano, Douglas E., Fábio, Jefferson e Matheus M., aos doutorandos André, Dionísio, Lucas e aos mestrandos Gracieli, William e em especial a Lysiane que se mostrou uma grande amiga e uma ótima companheira de pesquisa.

Agradeço em especial ao Laboratório de Transporte da ESPUSP, à Profa. Liedi Bernucci pela disponibilidade da utilização do laboratório, ao Prof. Edson de Moura, à Diomaria e em especial ao Robson Costa que teve extrema atenção na realização dos ensaios.

Agradeço às empresas fornecedoras dos materiais utilizados no trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, que sempre estiveram do meu lado acompanhando o meu crescimento e torcendo por mim. De uma forma especial agradeço as minhas amigas, Ge, Tami, Guta, Juju e Fê, que sempre estiveram comigo nessa caminhada e aos meninos Gus, Ander, Chico e Zito vocês são presentes que a Civil me proporcionou.

Agradeço aos demais colegas que tive oportunidade de conhecer e dividir momentos, angústias e conhecimentos.

Por fim agradeço a toda a minha família, tios, primos e avôs que sempre me apoiaram e torceram pelo meu sucesso. Em especial aos meus pais, Carlos Eduardo e Marlene que são meu orgulho, meu exemplo e meu porto seguro. Muito obrigado por toda a dedicação e amor. E a minha irmã e amiga Eduarda, que sempre cuidou de mim como uma segunda mãe. Amo muito vocês.

Seu trabalho vai preencher boa parte da sua vida e a única maneira de ser verdadeiramente satisfeito é fazer o que acredita ser um ótimo trabalho. E a única maneira de fazer um ótimo trabalho é amar o que você faz.

*Steve Jobs*

## RESUMO

O modal rodoviário é de grande importância no País, sendo utilizado como meio de locomoção tanto de cargas quanto de passageiros. Das rodovias pavimentadas, a maior parte tem concreto revestimento em concreto asfáltico. Os revestimentos podem apresentar diversas patologias devido às solicitações sofridas. Entre as patologias encontradas no revestimento de concreto asfáltico destaca-se a deformação permanente, que pode ser caracterizada pelo afundamento nas trilhas de roda. Sendo assim, este trabalho versa sobre a comparação de desempenho de misturas asfálticas com diferentes ligantes, através do parâmetro *Flow Number*, que avalia a deformação permanente da mistura. Para a obtenção deste parâmetro foram realizados ensaios uniaxiais de carga repetida. Estes ensaios foram realizados com quatro misturas. Os materiais utilizados nas misturas foram, agregados pétreos de origem basáltica e três diferentes ligantes asfálticos: o ligante convencional CAP 50/70, o ligante modificado por polímeros elastoméricos CAP 60/85-E e o ligante modificado com borracha de pneus CAP AB-8; utilizou-se também o CAP 50/70 com a adição de aditivo para mistura morna. Nas quatro misturas estudadas utilizaram-se agregados enquadrados na faixa-C do DNIT, variando somente o ligante. Assim, esperava-se que os resultados encontrados com a mistura dosada com o CAP AB-8 apresentasse melhores resultados em comparação com os demais. Porém, os resultados encontrados mostraram que o CAP AB-8 obteve FN baixo, demonstrando que a mistura dosada com este CAP não apresenta uma boa resistência à deformação permanente, consideranso-se este parâmetro. Por outro lado, a mistura com o CAP 60/85-E não atingiu FN durante os 10.000 ciclos, demonstrando ser a melhor mistura estudada no presente trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de delineamento da pesquisa .....	22
Figura 2 – Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica .....	37
Figura 3 – Componentes <i>SUPERPAVE giratory compactador</i> .....	40
Figura 4 – Configuração do molde SGC .....	41
Figura 5 – Características de compactação da mistura no SGC .....	41
Figura 6 – Exemplo de deformação permanente no revestimento asfáltico .....	50
Figura 7 – Posicionamento dos LVDT sobre a placa de carregamento .....	52
Figura 8 – Posicionamento dos LVDT acoplados ao corpo de prova .....	52
Figura 9 – Conjunto de mesa compactadora, simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório e placa de mistura asfáltica utilizada em ensaio .....	55
Figura 10 – Equipamento simulador de tráfego de laboratório brasileiro – Sistran .....	55
Figura 11 – Equipamento simulador de tráfego de laboratório norte-americano – APA .	56
Figura 12 – Típico ensaio uniaxial de carga repetida .....	57
Figura 13 – Típica relação entre total cumulativo deformação plástica e ciclos de carregamento .....	58
Figura 14 – Constantes de regressão a e b plotados em uma escala log-log .....	58
Figura 15 – Frações de agregados pétreos utilizados na pesquisa: 3/4”, 3/8” e pó de pedra .....	61
Figura 16 – Ensaio de Adesividade CAP 50/70 .....	62
Figura 17 – Ensaio de Adesividade CAP 50/70 com <i>Evotherm</i> .....	63
Figura 18 – Ensaio de Adesividade CAP 60/85-E .....	63
Figura 19 – Ensaio de Adesividade CAP AB-8 .....	64
Figura 20 – Gráfico do ensaio granulométrico do material pétreo .....	65
Figura 21 – Curva granulométrica utilizada na pesquisa .....	68
Figura 22 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	71
Figura 23 – Ensaio de módulo de resiliência .....	71
Figura 24 – CP compactado no compactador giratório .....	72
Figura 25 – Capeamento do CP com fina camada de gesso .....	73
Figura 26 – CP posicionado para ensaio uniaxial de carga repetida .....	74
Figura 27 – Exemplo de CP após o ensaio uniaxial de carga repetida .....	74
Figura 28 – Gráfico da curva Volume de vazios (%) versus Teor de asfalto (%) – Dosagem Marshall CAP 50/70 .....	77
Figura 29 – Gráfico da curva Volume de vazios (%) versus Teor de asfalto (%) – Dosagem Marshall CAP 60/85-E .....	77



Figura 30 – Gráfico da curva Volume de vazios (%) versus Teor de asfalto (%) – Dosagem Marshall CAP AB-8 .....	77
Figura 31 – Gráfico Vv (%) versus <i>Flow Number</i> (Ciclos) .....	81
Figura 32 – Gráfico das médias dos <i>Flow Number</i> .....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo: Classificação por penetração .....	29
Quadro 2 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Polímeros Elastoméricos .....	30
Quadro 3 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Borracha Moída de Pneus .....	31
Quadro 4 – Valores limites recomendados para os parâmetros de dosagem da mistura ..	38
Quadro 5 – Termos aplicáveis às camadas de revestimentos asfáltico .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas granulométricas para misturas asfálticas densas .....	25
Tabela 2 – <i>SUPERPAVE</i> parâmetros de projeto .....	42
Tabela 3 – Características dos Agregados .....	62
Tabela 4 – Resultado do ensaio de granulometria utilizando as peneiras correspondentes à faixa-C do DNIT .....	64
Tabela 5 – Propriedades do ligante convencional CAP 50/70 .....	66
Tabela 6 – Propriedades do ligante convencional CAP 50/70 modificado com <i>Evotherm</i> .....	66
Tabela 7 – Propriedades do ligante modificado por polímero elastomérico CAP 60/85-E .....	67
Tabela 8 – Propriedades do ligante modificado por borracha de pneu CAP AB-8 .....	67
Tabela 9 – Temperaturas de mistura e compactação .....	69
Tabela 10 – Resumo das características da mistura com CAP 50/70 .....	75
Tabela 11 – Resumo das características da mistura com CAP 60/85-E .....	76
Tabela 12 – Resumo das características da mistura com CAP AB-8 .....	76
Tabela 13 – Resultado dos ensaios de MR e RT .....	78
Tabela 14 – Características dos CP selecionados com o CAP 50/70 .....	79
Tabela 15 – Características dos CP selecionados com o CAP 50/70 com <i>Evotherm</i> .....	79
Tabela 16 – Características dos CP selecionados com o CAP 60/85-E .....	79
Tabela 17 – Características dos CP selecionados com o CAP AB-8.....	79
Tabela 18 – Resultados de <i>Flow Number</i> com o CAP 50/70 .....	80
Tabela 19 – Resultados de <i>Flow Number</i> com o CAP 50/70 com <i>Evotherm</i> .....	80
Tabela 20 – Resultados de <i>Flow Number</i> com o CAP 60/85-E .....	80
Tabela 21 – Resultados de <i>Flow Number</i> com o CAP AB-8 .....	80

## LISTA DE SIGLAS

AB – Asfalto Borracha

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

APA – *Asphalt Pavement Analyser*

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CP – Corpo de Prova

DMT – Densidade máxima teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FN – *Flow Number*

Lapav – Laboratório de Pavimentação UFRGS

LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*

MR – Módulo de Resiliência

RBV – Relação betume/vazios

RT – Resistência à tração

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SGC – *SUPERPAVE Giratory Compactador*

VAM – Volume de vazios nos agregados minerais

VCB – Vazios cheios com betume

V<sub>v</sub> – Volume de vazios

WMA – *Warm Mix Asphalt*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_{ea}$  – massa específica aparente do corpo de prova

$G_{mb}$  – densidade aparente do corpo de prova

$M_{emt}$  – massa específica máxima teórica da mistura

$G_{mm}$  – densidade máxima teórica da mistura

$A$  – massa do corpo de prova seca ao ar

$B$  – massa do corpo de prova imerso em água

$C$  – massa do corpo de prova saturado com a superfície seca ao ar

$A'$  – massa da amostra seca em ar

$B'$  – massa do recipiente com volume completo com água

$C'$  – massa do recipiente contendo a amostra submersa em água

$G_{sb}$  – densidade específica aparente da mistura dos agregados

$P_b$  – razão entre a massa de ligante asfáltico e a massa da mistura asfáltica

$N_{des}$  – número de giros do projeto

$N_{ini}$  – número de giros inicial

$N_{max}$  – número de giros máximo

$\epsilon(t)$  – deformação em função do tempo

$D(t)$  – função fluência

$\sigma_0$  – tensão constante aplicada

$\epsilon_{rel}$  – deslocamento relativo

$\epsilon_c(t)$  – *creep* dinâmico

$\sigma$  – tensão aplicada

a – deformação permanente no ciclo  $N = 1$

b – taxa de variação da deformação permanente em função do número de ciclos

$\epsilon_p$  – deformação plástica

$\epsilon_r$  – deformação resiliente

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	19
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	19
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA .....	19
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	19
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....	19
2.3 HIPÓTESE .....	20
2.4 PRESSUPOSTO .....	20
2.5 PREMISSA .....	20
2.6 DELIMITAÇÕES .....	20
2.7 LIMITAÇÕES .....	20
2.8 DELINEAMENTO .....	21
<b>3 MATERIAIAS</b> .....	23
3.1 AGREGADOS .....	23
3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS .....	26
<b>3.2.1 Ligante Asfáltico Modificado por Polímero Elastomérico</b> .....	27
<b>3.2.2 Ligante Asfáltico Modificado por Borracha de Pneu</b> .....	27
<b>3.2.3 Warm Mix Asphalt</b> .....	27
<b>3.2.4 Especificação do Ligante</b> .....	28
<b>3.2.5 Ensaios de Caracterização</b> .....	32
<b>4 MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	33
4.1 DOSAGEM MARSHALL .....	33
<b>4.1.1 Parâmetros da Dosagem Marshall</b> .....	33
4.1.1.1 Massa específica aparente (Mea) e densidade aparente (Gmb) de corpos de prova compactados .....	34
4.1.1.2 Massa específica (Memt) e densidade (Gmm) máxima teórica em amostras não compactadas .....	35
4.1.1.3 Volume de vazios (Vv) .....	36
4.1.1.4 Volume de vazios nos agregados minerais (VAM) .....	36
4.1.1.5 Vazios cheios com betume (VCB) .....	36
4.1.1.6 Relação betume/vazios (RBV) .....	37
<b>4.1.2 Método Marshall</b> .....	37
4.2 SUPERPAVE GIRATORY COMPACTOR (SGC) .....	39



<b>5 PAVIMENTO FLEXÍVEL .....</b>	<b>44</b>
5.1 REFORÇO DO SUBLEITO .....	44
5.2 SUB-BASE .....	45
5.3 BASE .....	45
5.4 REVESTIMENTO .....	46
<b>6 DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....</b>	<b>48</b>
<b>7 ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....</b>	<b>51</b>
7.1 ENSAIO UNIAXIAL DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE SOB CARGAS ESTÁTICAS .....	51
7.2 ENSAIO UNIAXIAL DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE SOB CARGAS REPETIDAS .....	53
7.3 SIMULADORES DE TRÁFEGO DE LABORATÓRIO .....	54
7.4 ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA .....	57
<b>8 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>61</b>
8.1 MATERIAIS .....	61
<b>8.1.1 Agregados Pétreos .....</b>	<b>61</b>
<b>8.1.2 Ligantes Asfálticos .....</b>	<b>65</b>
8.2 MÉTODOS .....	67
<b>8.2.1 Composição da Curva Granulométrica .....</b>	<b>68</b>
<b>8.2.2 Plano Experimental .....</b>	<b>68</b>
8.2.2.1 Temperatura de Mistura e de Compactação .....	69
8.2.2.2 Metodologia Marshall de Dosagem e Teor de Projeto .....	69
8.2.2.3 Compactador Giratório .....	72
<b>8.2.3 Ensaio Uniaxial de Carga Repetida .....</b>	<b>72</b>
<b>9 RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
9.1 TEOR DE PROJETO .....	75
9.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	78
9.3 <i>FLOW NUMBER</i> .....	78
<b>10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>83</b>
10.1 CONCLUSÕES .....	83
10.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Modal rodoviário é o principal meio de locomoção no País. Segundo a décima sétima Pesquisa CNT de Rodovias (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2013): “No Brasil, cerca de 65% da movimentação de cargas e 90% da movimentação dos passageiros ocorrem pelas rodovias.”. Apenas 12% de um total de 1,7 milhões de quilômetros da malha rodoviária são pavimentados. (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2012). Aproximadamente 95% das vias pavimentadas possuem concreto asfáltico como camada de revestimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2012), evidenciando a importância de estudos do comportamento mecânico deste material.

O desenvolvimento contínuo do País, de distintas formas, vem contribuindo para o aumento da movimentação dos passageiros e para o aumento das cargas transportadas. Isto implica na necessidade de pavimentos com maior conforto, segurança e resistência.

Os pavimentos de concreto asfáltico são dimensionados na sua maioria para que suportem uma vida de serviço próxima de 10 anos. Neste período, o pavimento que inicia numa condição ótima, alcançará uma condição terminal no final do tempo de projeto, caso não passe por um processo de reabilitação intermediário.

No entanto, é frequente observar nas estradas brasileiras o desgaste prematuro dos pavimentos e o surgimento de defeitos. Diminuindo a qualidade e a segurança das rodovias, estas falhas podem surgir por diferentes fatores como: falha na elaboração do projeto estrutural e/ou má execução, escolha incorreta de materiais, crescimento da frota automotora além do previsto e excesso das cargas transportadas, entre outros.

Dentre os defeitos que aparecem frequentemente no revestimento asfáltico, devido aos itens citados, destaca-se a deformação permanente, que junto com a fadiga é uma das principais patologias encontradas. Uma vez que estes problemas devem ser avaliados separadamente, a ênfase deste trabalho é a análise da deformação permanente. Este defeito torna-se mais comum em pavimentos com tráfego de veículos pesados, cujas velocidades são baixas, agravando-se ainda, por temperaturas altas e pelas ações de frenagem e de aceleração,

situação comumente encontrada nas paradas dos corredores de ônibus, pátios de estacionamento de aeronaves e pavimentos de terminais portuários.

Por este motivo procura-se estudar e modelar o comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente, para que seja possível prever o seu comportamento futuro, no intuito de encontrar a mistura que apresente a melhor resposta quanto às solicitações projetadas. Além de conhecer o comportamento quanto à deformação permanente do material, busca-se a redução desta patologia. Uma alternativa encontrada para melhorar o desempenho das misturas asfálticas e reduzir o surgimento desta patologia é a incorporação de aditivos e modificadores nos ligantes asfálticos.

Desta maneira, o presente trabalho busca comparar o desempenho de misturas asfálticas quanto à deformação permanente com diferentes ligantes, identificando entre estes qual apresenta melhor resultado. Para comparar o desempenho das misturas foi escolhido o parâmetro *Flow Number*, que é encontrado através do ensaio uniaxial de carga repetida. Esse ensaio foi utilizado por apresentar parâmetros intrínsecos e pela sua representatividade mecânica comparado ao mecanismo de funcionamento nas situações em campo.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o desempenho, quanto à deformação permanente, de cada uma das misturas asfálticas estudadas?

### 2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### 2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação de desempenho de misturas asfálticas com diferentes ligantes: CAP 50/70 (asfalto convencional), CAP 50/70 com aditivo *Warm mix asphalt* (aditivo para mistura morna), CAP 60/85-E (asfalto com adição de polímero elastomérico) e CAP AB-8 (asfalto com adição da borracha moída de pneus), quanto à deformação permanente através do parâmetro *Flow Number*.

#### 2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é a apresentação dos resultados obtidos através do parâmetro *Flow Number*, para cada uma das misturas asfálticas estudadas.

## 2.3 HIPÓTESE

Tem-se como hipótese deste trabalho que a mistura asfáltica moldada com o CAP AB-8 possui melhor desempenho quanto à deformação permanente através do parâmetro *Flow Number*, em relação às demais misturas estudadas.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o procedimento de ensaio de corpos de prova descrito no seguinte relatório: *NCHRP REPORT 465* é válido para a realização do ensaio uniaxial de cargas repetidas e que o parâmetro *Flow Number* determina o comportamento intrínseco e representativo de campo.

## 2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa, que o surgimento de deformações permanentes em revestimentos asfálticos reduz a vida útil dos pavimentos, tornando-se de grande interesse o estudo de misturas asfálticas, quanto a esta patologia.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios uniaxiais de carga repetida quanto ao parâmetro *Flow Number* em corpos de provas de misturas asfálticas com diferentes ligantes, utilizando uma curva granulométrica usual em misturas asfálticas no Sul do País, sendo esta enquadrada na faixa-C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), para concretos asfálticos.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) as misturas asfálticas e os corpos de prova estudados foram produzidos em laboratório;
- b) a temperatura de ensaio para determinação do *Flow Number* restringiu-se a 60°C;

- c) os ligantes utilizados na pesquisa restringiram-se ao CAP 50/70, ao CAP 60/85-E e ao CAP AB-8.

## 2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, representadas na figura 1, e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) implementação do ensaio uniaxial de carga repetida;
- c) caracterização dos agregados;
- d) caracterização dos ligantes;
- e) definição da curva granulométrica;
- f) elaboração de plano experimental;
- f) dosagem da mistura;
- g) moldagem dos corpos de prova;
- h) execução dos ensaios;
- i) análise dos resultados;
- j) conclusões.

A pesquisa bibliográfica esteve presente durante todo o trabalho e serviu de apoio, aprofundando o conhecimento do tema estudado. Nesta etapa foram abordados aspectos relevantes sobre agregados, ligantes e dosagens utilizados em misturas asfálticas, além de uma abordagem geral sobre pavimentos flexíveis, deformações permanentes e ensaios usuais relacionados a esta patologia.

A implementação do ensaio deu-se através da adaptação de uma rotina em um equipamento modelo *MTS 810 UTM Test System*. Esta rotina permitiu a realização do ensaio uniaxial de carga repetida e a determinação do parâmetro *Flow Number*.

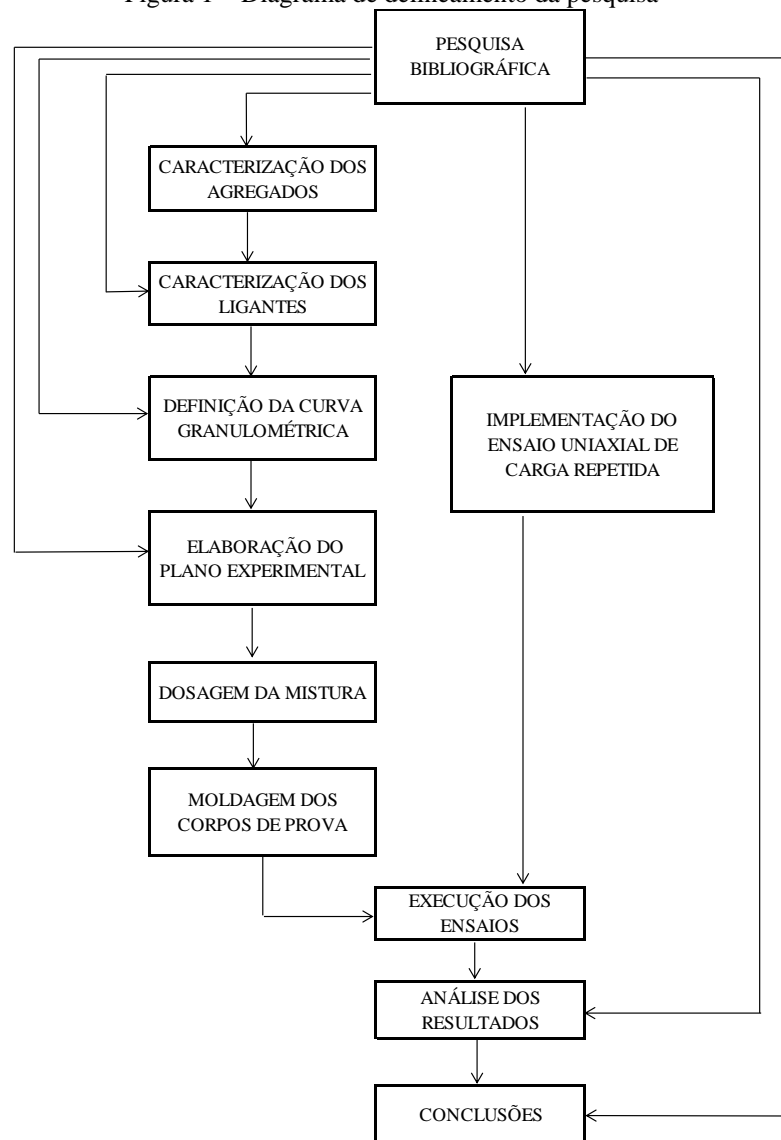
Na etapa de caracterização de agregados e de ligantes foram feitos ensaios dos materiais utilizando normas do DNIT e ABNT, para aceitação dos mesmos e certificação da combinação destes materiais. A fase seguinte foi destinada à obtenção da composição granulométrica, sendo esta enquadrada na faixa-C do DNIT. Posteriormente, foi elaborado um plano experimental, onde foram definidos dados relevantes sobre a dosagem das misturas, a moldagem dos CP (corpos de provas), assim como a execução dos ensaios. A etapa da

dosagem das misturas consistiu na obtenção do teor de ligante de projeto para assim, prosseguir com a confecção dos corpos de prova que foram ensaiados.

Na próxima etapa, foram realizados os ensaios uniaxiais de carga repetida, em cada um dos CP moldados, das diferentes misturas estudadas.

Tendo efetuado os ensaios, foi feita a análise dos resultados para avaliar qual mistura asfáltica obteve melhor comportamento quanto ao parâmetro *Flow Number*. A partir disso, foram feitas as conclusões e algumas considerações sobre como cada mistura pode ser utilizada.

Figura 1 – Diagrama de delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

### 3 MATERIAIS

Nesse capítulo é feita uma revisão sobre os materiais que são empregados na pesquisa, sendo estes os agregados pétreos e os cimentos asfálticos de petróleo (CAP).

#### 3.1 AGREGADOS

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 116):

O nível de desempenho em serviço de um determinado agregado depende também das propriedades geológicas da rocha de origem. São importantes, portanto, informações sobre o tipo de rocha, sua composição mineralógica, sua composição química, sua granulização, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

Além das propriedades da rocha, a distribuição granulométrica dos agregados que compõe a mistura possui grande importância no seu desempenho. Neste sentido, Bernucci et al. (2008, p. 121) relatam que a distribuição granulométrica:

[...] 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 [...].

Segundo Cavalcanti (2010, p. 19), “[...] a distribuição granulométrica do agregado é uma das características que asseguram o intertravamento das partículas, desde as mais graúdas às mais finas. Este intertravamento é responsável pela estabilidade das misturas.”.

Considerando a importância da distribuição granulométrica, são apresentadas as mais importantes classes de graduação de acordo com Bernucci et al. (2008, p. 122-123, grifo do autor):

- a) agregado de graduação **densa** ou **bem graduada** é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima;
- b) agregado de graduação **aberta** é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075 mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de



vazios. Nas frações de menor tamanho a curva granulométrica é abatida e próxima de zero;

- c) agregado de graduação **uniforme** é aquele que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme;
- d) agregado com graduação com degrau ou **descontínua** é aquele que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias. São agregados que devem ser adequadamente trabalhados quando em misturas asfálticas, pois são muito sensíveis à segregação.

Juntamente com a granulometria, as características do agregado também influem no desempenho da mistura. Segundo a especificação de serviço 031/2006 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006b, p. 4), os agregados devem passar por alguns ensaios para serem aceitos:

- a) desgaste de *Los Angeles* – o ensaio é padronizado pela DNER-ME 035/98. No ensaio uma amostra de material é despejada em um tambor com esferas de tamanho e peso especificado e após determinadas rotações o material deve ter desgaste inferior a 50% (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998b).
- b) índice de forma – normatizado pela DNER-ME 086/94. O objetivo do ensaio é avaliar a forma do agregado, para isto é feita análise de uma amostra dos agregados, a qual deve passar por peneiras circulares e após por crivos com aberturas específicas e ter índice de forma superior a 0,5. Quanto mais próximo de 1,0 for este valor mais cúbico é o agregado e quanto mais próximo de 0,0, mais lamelar ele é (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994c).
- c) sanidade – ensaio padronizado pela DNER-ME 089/94. Neste procedimento o agregado é submetido a ciclos de imersão em solução de sulfato de magnésio ou de sódio por determinado tempo à temperatura controlada, após a imersão o material é submetido à secagem em estufa. Ao final a amostra é pesada e a diferença entre a massa inicial e final não pode ser superior a 12% (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994b).
- d) adesividade – normatizado pela DNER-ME 078/94. Nesse ensaio é avaliada a interação entre o agregado e o ligante. O ensaio consiste em envolver o agregado com ligante e deixar a amostra submersa a temperatura controlada por 72 horas. Ao final do período se avalia visualmente se houve um descolamento do ligante (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994a).
- e) equivalente de areia – padronizado pela DNER-ME 054/97. O ensaio é realizado na parcela de agregado miúdo do material e busca analisar a porcentagem de argila ou pó presentes na amostra, o equivalente de areia deve ser maior ou igual a 55% (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1997).

Além dos ensaios feitos para aceitação do agregado são realizados ensaios de caracterização dos agregados como granulometria, absorção e densidade (BERNUCCI et al., 2008):

- a) análise granulométrica – o ensaio é padronizado na DNER-ME 083/98. Consiste na avaliação da distribuição granulométrica do material em estudo através de peneiramento. Uma fração do material limpo e seco é peneirada em peneiras de malhas quadriculadas, ao final é analisada a massa retida em cada peneira. A partir destes dados é possível montar a curva granulométrica que a ser utilizada no projeto. A tabela 1 mostra exemplos de faixas granulométricas de agregados para misturas densas (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998a).
- b) absorção e densidade real de agregado graúdo – o ensaio é normatizado na DNER-ME 081/98. Este procedimento é realizado com a fração graúda do material e determina o quanto de água o material absorve após imersão em água por 24 horas e a densidade real do agregado (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998c).
- c) densidade real do agregado miúdo – padronizado pela DNER-ME 084/95. O ensaio busca encontrar a densidade real do agregado, ou seja, a parte que desconsidera os poros da amostra, o procedimento é realizado através de picnômetros (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995).

Tabela1 – Faixas granulométricas para misturas asfálticas densas

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 – 100	100	-	+ 7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 100	-	+ 7%
¾"	19,1	60 – 90	80 – 100	100	+ 7%
½"	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%
Nº40	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: adaptado de DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES, 2006b, p. 5)

### 3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

De acordo com Balbo (2007, p. 110), “Os asfaltos ou Cimentos Asfálticos de Petróleo [...] são obtidos a partir de processos de refinamento do petróleo cru, para as finalidades específicas de pavimentação, além de outras aplicações.”. Segundo Bernucci et al. (2008, p. 26), “O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo.”.

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 25):

Há várias razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo os principais: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

A utilização da sigla CAP juntamente com um identificador numérico, é normalmente resignada para enquadrar o asfalto em uma determinada classificação, dependendo de propriedades físicas que buscam certificar o desempenho do ligante em pista (BERNUCCI et al., 2008).

Em Bernucci et al. (2008, p. 40) é feita uma descrição dos ligantes asfálticos existentes no mercado brasileiro:

- a) cimento asfálticos de petróleo – CAP;
- b) asfaltos diluídos – ADP;
- c) emulsões asfálticas – EAP;
- d) asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- e) asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- f) agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

Os próximos itens fazem uma breve descrição sobre: o asfalto modificado por polímero; o asfalto modificado por borracha; o aditivo de mistura morna e as especificações encontradas para os ligantes usados na pesquisa.

### 3.2.1 Ligante Asfáltico Modificado por Polímero Elastomérico

Modifica-se o CAP no intuito de buscar um material que resista mais aos esforços (sofrendo menos deformações) e seja ao mesmo tempo mais mole, para sofrer menos quando os mesmos esforços são aliviados, assim apresentaria maior recuperação elástica (BALBO, 2007).

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 63):

Como o asfalto é um material termoviscoelástico, suas características vão influenciar diretamente o desempenho das misturas asfálticas, tanto de deformação permanente quanto de fadiga. As deformações resultantes das cargas aplicadas, ou seja, as respostas da mistura asfáltica aos pulsos de carga gerados pelo tráfego em movimento podem ser bastante modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e de elasticidade do conjunto, para várias faixas de temperatura.

O polímero utilizado na modificação do CAP deve ser resistente à degradação nas temperaturas usuais, ter boa aderência ao asfalto e melhorar as características do ligante para que esse fique mais fluído em altas temperaturas e em baixas temperaturas não fique tão rígido (BERNUCCI et al., 2008).

### 3.2.2 Ligante Asfáltico Modificado por Borracha de Pneu

A borracha proveniente do descarte de pneus inservíveis é utilizada alternativamente como um polímero melhorador do CAP. Além de ser um polímero alternativo, esse processo de reutilização da borracha é uma solução sustentável para o destino final dos pneus (BERNUCCI et al., 2008).

### 3.2.3 *Warm Mix Asphalt*

A tecnologia, conhecida por *Warm Mix Asphalt*, é nova e ainda em estudo no Brasil, sendo aplicada principalmente em pistas experimentais. De acordo com Cavalcanti (2010, p. 56):

As expressões asfalto morno ou mistura morna têm sido usadas no Brasil para representar a sigla WMA (Warm – Mix Asphalt) que agrupa uma série de tecnologias que permite a redução da temperatura na qual as misturas asfálticas são produzidas e aplicadas. Estas tecnologias permitem a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 20 a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Assim há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, há redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante, que é

responsável pelo melhor desempenho em termos de trincas e susceptibilidade da mistura.

No presente trabalho, foi utilizado o *Evotherm*, aditivo químico pertencente à tecnologia WMA. Segundo a MeadWeastvaco Co. (c2012, p. 2, tradução nossa), o *Evotherm* pode ser utilizado em qualquer concreto asfáltico. Esta tecnologia permite a aplicação do asfalto a uma temperatura de 50 a 75°C abaixo da temperatura convencional de compactação. O aditivo é misturado já na usina asfáltica, não necessitando de mudanças nos equipamentos.

Esta tecnologia traz algumas vantagens em relação ao método convencional, como: trabalhabilidade, facilidade de compactação em temperaturas mais baixas e ainda permite que seja utilizada porcentagens maiores de pavimento reciclado na mistura asfáltica reduzindo o custo final para o empreiteiro (MEADWEASTVACO CO., c2012, tradução nossa).

### **3.2.4 Especificação do Ligante**

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estipula especificações de controle para o CAP. Os quadros 2 a 4, trazem respectivamente as especificações para: CAP convencional sem adição de aditivos, CAP modificado por polímero elastomérico e CAP modificado pela adição da borracha de pneus. Quando o CAP é modificado com o aditivo de misturas mornas, não há nenhuma especificação da ANP.

Quadro 1 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo: Classificação por penetração

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybol Furol						NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, mín		192	141	110	80			
a 150 °C, mín		90	50	43	36			
a 177 °C		40-150	30-150	15-60	15-60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(-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			NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em triclorotileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25 °C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25 °C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

(1) – Índice de susceptibilidade térmica =  $\frac{500 * \log PEN + 20 * PA - 1951}{120 - 50 * \log PEN + PA}$

Onde:  
PEN = Penetração  
PA = Ponto de amolecimento

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL, 2005, p. [3]).

Quadro 2 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Polímeros Elastoméricos

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		TIPO	55/75-E	60/85-E	65/90-E	ABNT/NBR
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	45-70	40-70		6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	55	60	65	6560	D 36
Viscosidade Brookfield						
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, max	Cp	3000			15184	D 4402
a 150 °C, SP 21, 50 rpm, máx		2000				
a 177 °C, SP 21, 100 rpm, máx		1000				
Ponto de fulgor, mín.	°C	235			11341	D 92
Ensaio de separação de fase, máx	°C	5			15166	D 7173
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, mín	%	75	85	90	15086	D 6084
<b>Ensaio no Resíduo RTFOT a 163 °C, 85 minutos</b>						
Varição em massa, máx (1)	% massa	1.0			15235	D 2872
Varição do ponto de amolecimento, máx	°C	-5 a +7			6560	D 36
Percentagem de Penetração original, mín.	%	60			6576	D 5
Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C mín.	%	80			15086	D 6084

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2010, p. [3])

Quadro 3 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Borracha Moída de Pneus

CARACTERÍSTICA TIPO	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO	
		AB8	AB22	ABNT/NBR	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30-70		6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	50	55	6560	D 36
Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle3, 20 rpm, máx.	cP	800-2000	2200-4000	15529	D 2196
Ponto de fulgor, mín.	°C	235		11341	D 92
Estabilidade à Estocagem, máx.	°C	9		15166	D 7173
Recuperação Elástica a 25°C, 10cm, mín	%	50	55	15086	D 6084
Varição em massa do RTFOT, máx.	% massa	1		15235	D 2872
<b>Ensaio no Resíduo RTFOT.</b>					
Varição do ponto de amolecimento, máx.	°C	10		6560	D 36
Porcentagem de Penetração original, mín.	%	55		6576	D 5
Porcentagem de Recuperação Elástica Original (25°C, 10cm) mín.	%	100		15086	D 6084

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2008, p. [5])



### 3.2.5 Ensaios de Caracterização

É necessária a caracterização dos ligantes, para certificar-se que estes se enquadrem dentro das especificações da ANP. A seguir estão descritos alguns dos ensaios de caracterização dos CAP, que são utilizados no trabalho (BERNUCCI et al., 2008):

- a) penetração: uma amostra padrão de CAP a temperatura de 25°C é submetida à penetração de uma agulha padrão de 100 g por 5 s, ao final mede-se o quanto da agulha penetrou na amostra em décimos de milímetros. O procedimento de ensaio é normatizado pelas normas: NBR 6576/07 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) e DNIT-ME-155/2010 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010);
- b) viscosidade: é feita a partir de um viscosímetro *Brookfield*, que permite traçar uma curva viscosidade *versus* temperatura, sendo possível assim encontrar a viscosidade aparente do ligante. O procedimento de ensaio é padronizado pela NBR 15184/2004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004);
- c) ponto de amolecimento: ensaio que estabelece uma determinada temperatura a qual o ligante começa a amolecer sobre determinadas condições específicas. O procedimento de ensaio é padronizado na NBR 6560/2008 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008);
- d) massa específica: ensaio realizado para obter a massa específica do ligante, para ser possível transformar volume em massa. O procedimento é realizado com picnômetros e está normatizado na DNER-ME 193/96 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1996);
- e) durabilidade: o ligante asfáltico sofre envelhecimento de curto prazo no processo de usinagem. Para simular este processo é realizado o ensaio de *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), em que uma camada fina de asfalto de aproximadamente 35 g envolta num frasco é submetida a uma temperatura de 163°C por 85 min. No procedimento a amostra fica girando e recebendo jatos de ar, ao final o ligante é coletado do frasco e ensaios de caracterização são refeitos. O procedimento de ensaio é padronizado pela NBR 15235/2009 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009);
- f) recuperação elástica: ensaio realizado apenas nos CAP modificados. Utiliza-se um ductilômetro para medir a recuperação que uma amostra de CAP em molde específico sofre após estiramento de 20 cm em água a 25°C. O procedimento de ensaio é normatizado pela NBR 15086/2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

## 4 MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Cavalcanti (2010, p. 34):

As misturas asfálticas são o produto da adição do ligante ao agregado e eventualmente com modificadores para lhes conferir propriedades diferenciadas ou melhores em relação à mistura convencional. As misturas são utilizadas nas camadas de revestimento do pavimento e há vários métodos de produção e tipos de mistura. Elas podem ser usinadas a quente ou a frio e preparadas na própria pista ou em usinas móveis.

As misturas asfálticas usinadas a quente são o resultado da mistura de agregados e ligantes à temperatura controlada. Elas também se dividem quanto ao tipo de graduação e composição dos agregados. Os três tipos mais usuais em função da graduação do agregado são: misturas a quente de graduação densa, graduação aberta e graduação descontínua. A mistura asfáltica de graduação densa é também conhecida como concreto asfáltico (CA) e é a mais utilizada no País (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 205), “A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito ‘ótimo’ de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida.” Os itens da subseção 4.1 descrevem a dosagem mais utilizada no País.

### 4.1 DOSAGEM *MARSHALL*

O procedimento de dosagem Marshall é o mais utilizado no Brasil. A principal característica do método é a compactação por impacto dos corpos de prova (BERNUCCI et al., 2008).

#### 4.1.1. Parâmetros da Dosagem *Marshall*

Alguns parâmetros importantes para a dosagem *Marshall* são:

- a) massa específica aparente de corpos de prova compactados ( $M_{ea}$ ) e densidade aparente de corpos de prova compactados ( $G_{mb}$ );

- b) massa específica (Memt) e densidade (Gmm) máxima teórica de amostras não compactadas;
- c) volume de vazios (Vv);
- d) volume de vazios no agregado mineral (VAM);
- e) vazios cheios com betume (VCB);
- f) relação betume/vazios (RBV).

Tais parâmetros são explicados nos itens a seguir.

#### 4.1.1.1 Massa específica aparente (Mea) e densidade aparente (Gmb) de corpos de prova compactados

Esse parâmetro é obtido tanto em corpos de prova compactados ou extraídos de campo. A densidade aparente é determinada a partir de três medidas: massa seca, massa imersa e massa superfície seca após imersão, NBR 15573/2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012a). O resultado é encontrado a partir da fórmula 1.

$$Gmb = \frac{A}{C - B} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

Gmb = densidade aparente do corpo de prova;

A = massa do corpo de prova seco ao ar (g);

B = massa do corpo de prova imerso em água (g);

C = massa do corpo de prova saturado com a superfície seca ao ar (g);

Em posse da densidade, calcula-se, através da fórmula 2, a massa específica aparente Mea.

$$Mea = 0,9971 \times Gmb \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

Mea = massa específica aparente do corpo do de prova (g/cm<sup>3</sup>);

Gmb = densidade aparente do corpo de prova;

Constante 0,9971 = massa específica da água a 25°C (g/cm<sup>3</sup>).

#### 4.1.1.2 Massa específica (Memt) e densidade (Gmm) máxima teórica em amostras não compactadas

O ensaio é padronizado pela NBR 15619/2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b), e busca encontrar a massa específica da mistura asfáltica através do método do vácuo. Neste procedimento a interação real dos agregados e do ligante é levada em consideração. A fórmula 3 mostra o cálculo para a obtenção da Gmm (BERNUCCI et. al, 2008):

$$Gmm = \frac{B'}{B' + A' - C'} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

Gmm = densidade máxima teórica da mistura;

A' = massa da amostra seca em ar (g);

B' = massa do recipiente com volume completo com água (g);

C' = massa do recipiente contendo a amostra submersa em água (g).

A fórmula 4, demonstra a determinação da massa específica teórica, a partir da densidade:

$$Memt = 0,9971 \times Gmm \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

Memt = massa específica máxima teórica da mistura (g/cm<sup>3</sup>);

Gmm = densidade máxima teórica da mistura;

Constante 0,9971 = massa específica da água a 25°C (g/cm<sup>3</sup>).

#### 4.1.1.3 Volume de vazios (Vv)

O volume de vazios representa os vazios de ar encontrados na mistura asfáltica após sua compactação. (BERNUCCI et al., 2008) A seguir é apresentado a fórmula 5 para obtenção do Vv, que é função da densidade máxima teórica (Gmm) e da densidade aparente da mistura

asfáltica compactada ( $G_{mb}$ ) a NBR 16273/2014 padroniza esta fórmula (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014):

$$V_v = 100 \times \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$V_v$  = volume de vazios (%);

$G_{mm}$  = densidade máxima teórica da mistura;

$G_{mb}$  = densidade aparente do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

#### 4.1.1.4 Volume de vazios nos agregados mineiras (VAM)

O VAM representa a parcela de ligante que não foi absorvida pelos agregados e as parcelas de ar que ficam na mistura (BERNUCCI et al., 2008). A fórmula 6, demonstra como é obtido o VAM, em função da densidade específica aparente de corpos de prova ( $G_{mb}$ ), da razão entre a massa de ligante e a massa da mistura ( $P_b$ ) e da densidade específica aparente da mistura dos agregados ( $G_{sb}$ ) a NBR 16273/2014 padroniza esta fórmula (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014):

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times (100 - P_b)}{G_{sb}} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

VAM = volume de vazios nos agregados minerais (%);

$G_{mb}$  = densidade específica aparente dos corpos de prova ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_{sb}$  = densidade específica aparente da mistura dos agregados ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P_b$  = razão entre a massa de ligante asfáltico e a massa da mistura asfáltica (%).

#### 4.1.1.5 Vazios cheios com betume (VCB)

Parcela de asfalto absorvido pelos agregados, como também o disponível na mistura.

#### 4.1.1.6 Relação betume/vazios (RBV)

Relação entre a parcela de asfalto e vazios contida na mistura asfáltica (BERNUCCI et al., 2008, p. 222). A fórmula 7, demonstra como é obtido o RBV, que é uma função do VAM e do  $V_v$  a equação é normatizada pela NBR 16273/2014 padroniza esta fórmula (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014):

$$RBV = 100 \times \frac{(VAM - V_v)}{VAM} \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

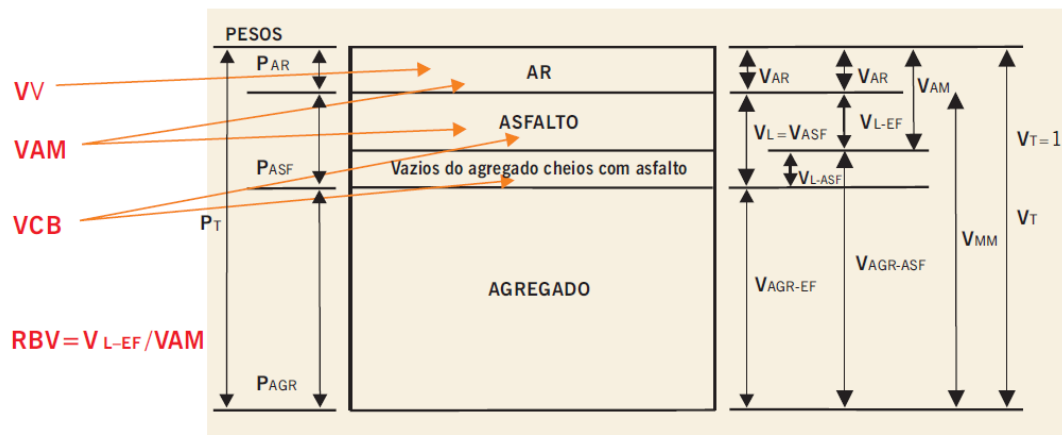
RBV = relação betume/vazios;

VAM = volume de vazios nos agregados minerais (%);

$V_v$  = volume de vazios (%).

A figura 2 apresenta a relação dos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica.

Figura 2 – Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 217)

#### 4.1.2. Método *Marshall*

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 224), “O método de dosagem Marshall pode apresentar diversas alternativas para a escolha do teor de projeto de ligante asfáltico.”.

Ainda de acordo com Bernucci et al. (2008, p. 225):

É comum [...] a escolha se dar a partir da estabilidade Marshall, da massa específica aparente e do Vv. Nesse caso, o teor de projeto é uma média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, à massa específica aparente máxima da amostra compactada e a um Vv de 4% (ou média das especificações).

Ainda outra forma de se obter o teor de projeto é fazendo uso somente de dois parâmetros volumétricos, Vv e Relação Betume-Vazios (RBV) [...].

A especificação de serviço DNIT-ES 031/06, apresenta os valores limites recomendados para os parâmetros de projeto da dosagem da mistura asfáltica. O quadro 4 apresenta estes valores.

Quadro 4 – Valores limites recomendados para os parâmetros de dosagem da mistura

<b>Características</b>	<b>Método de Ensaio</b>	<b>Camada de Rolamento</b>	<b>Camada de Ligação (Binder)</b>
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, mín., MPa	DNER-ME 138	0.65	0.65

(fonte: adaptado de DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE, 2006b, p. 5)

Em Bernucci et al. (2008, p. 218-222), é apresentado um passo a passo das etapas do método *Marshall*:

- a) determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados [...];
- b) seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica [...];
- c) escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida [...]. Ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura. Nota-se que neste momento não se considera ainda o teor de asfalto, portanto,  $\sum \%_n = 100\%$  (onde 'n' varia de 1 ao número de diferentes agregados na mistura). A porcentagem-alvo na faixa de projeto corresponde à composição de agregados escolhida, podendo em campo variar entre um número mínimo e um número máximo em cada peneira

- de acordo com a especificação [...]. Observa-se ainda que a porcentagem-alvo deve estar enquadrada dentro da faixa selecionada [...];
- d) escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade – temperatura do ligante escolhido [...];
  - e) adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de CP a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3CP. Conforme a experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto (T, em %), para o primeiro grupo de CP. Os outros grupos terão teores de asfalto acima (T + 0,5% e T + 1,0 %) e abaixo (T – 0,5 % e T – 1,0 %);
  - f) após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos de prova, obtêm-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura). Determinam-se para cada corpo de prova suas massas secas (Ms) e submersa em água (Msub). Com estes valores é possível obter a massa específica aparente dos corpos de prova (Gmb), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), vai permitir obter as relações volumétricas típicas da dosagem;
  - g) a partir do teor de asfalto do grupo de CP em questão (%a), ajusta-se o percentual em massa de cada agregado, ou seja  $%n = %n^* \times (100 \% - \%a)$ , onde %n é o percentual em massa de cada agregado 'n' na mistura asfáltica já contendo o asfalto. Note-se que enquanto  $\Sigma %n^* = 100 \%$ , após o ajuste,  $\Sigma %n = 100 \% - \%a$  [...];
  - h) com base em %n, %a, e nas massas específicas reais dos constituintes (Gi), calcula-se a DMT correspondente ao teor de asfalto considerado (%a) [...];
  - i) cálculo dos parâmetros de dosagem para cada CP [...];
  - j) após as medidas volumétricas, os corpos de prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos [...]. Retira-se cada corpo de prova colocando-o imediatamente dentro do molde de compressão [...]. Determinam-se, então, por meio da prensa Marshall [...], os [...] parâmetros mecânicos [...] [de estabilidade e fluência];

## 4.2 SUPERPAVE GIRATORY COMPACTOR (SGC)

Outra alternativa para a dosagem e compactação de misturas asfálticas é através do método *Superpave*, que emprega um compactador giratório próprio. O SGC é usado para produção de corpos de prova visando análise volumétrica e também para obter dados mais precisos da densidade durante todo o processo de compactação, através de registro de dados (ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 45, tradução nossa).

Segundo o *Asphalt Institute* (2001, p. 45, tradução nossa), o *SHRP Researchers*, tinha vários objetivos no desenvolvimento de um novo método de compactação em laboratório. Eles desejavam alcançar corpos de prova que apresentassem condição semelhante à condição de campo em termos de clima e de carga. Para isto buscavam um equipamento capaz de acomodar grandes agregados e de medir o grau de compatibilidade, assim a proposta

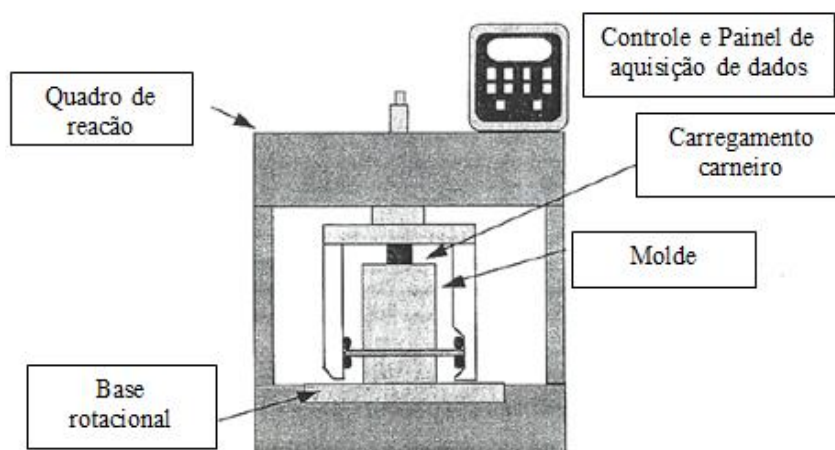


comportamento mistura potencial e problemas de compactação poderiam ser identificados. A prioridade para a *SHRP Reseachers* foi um equipamento portátil o suficiente para o uso nas operações de uma instalação de controle de qualidade da mistura. Como, até então, nenhum compactador existente alcançava estes objetivos foi desenvolvido o compactador giratório *Superpave* (SGC) (ASPHALT INSTITUTE, 2001 p. 45, tradução nossa).

O SGC é composto pelos itens a seguir (ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 46 tradução nossa), e a figura 3 traz uma ilustração destes itens:

- a) quadro de reação, base giratória e motor;
- b) sistema de carregamento, carregamento carneiro e manômetro;
- c) medição da altura e sistema de gravação;
- d) molde e placa de base;
- e) dispositivo de extrusão.

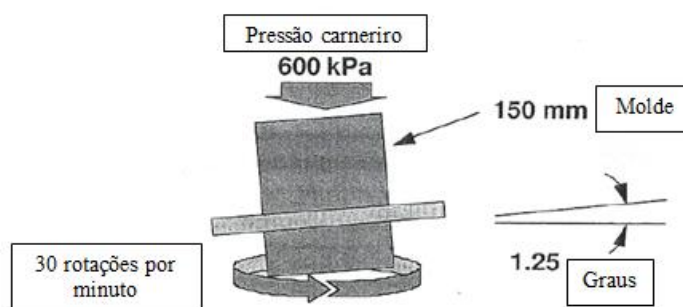
Figura 3 – Componentes SUPERPAVE *giratory compactor*



(fonte: adaptado de ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 46, tradução nossa).

Um mecanismo de carregamento ao pressionar a estrutura de reação aplica uma carga que produz uma pressão de compactação de 600 kPa sobre a amostra. Um medidor de pressão mede a carga carneiro para manter a pressão constante durante a compactação. O molde SGC apresentado na figura 4, possui diâmetro interno de 150 mm. Uma placa de base no leito do molde proporciona confinamento para a compactação. A base SGC gira em uma frequência de 30 rotações por minuto, durante a compactação, com o molde posicionado num ângulo de compactação de  $1,25^\circ$  (ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 46-47, tradução nossa).

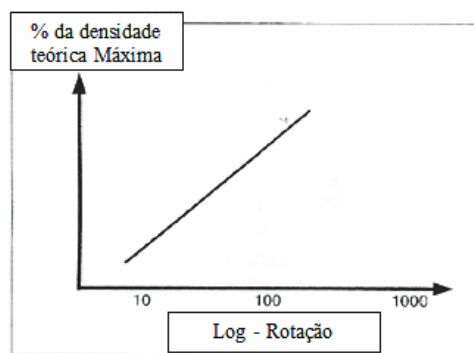
Figura 4 – Configuração do molde SGC



(fonte: adaptado de ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 47, tradução nossa).

A medida da altura do corpo de prova é uma função importante do SGC. A densidade da amostra pode ser estimada durante a compactação por conhecer a massa de material, o diâmetro interior do molde e a altura da amostra. A altura é medida por registro da posição do pistão ao longo do teste. Usando estes parâmetros, a compactação de uma amostra é apresentada na figura 5 (ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 47, tradução nossa).

Figura 5 – Características de compactação da mistura no SGC



(fonte: adaptado de ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 47, tradução nossa)

A figura 5 ilustra como a densidade das misturas de asfalto aumenta com oscilações crescentes. Como em outros procedimentos, as misturas asfálticas são projetadas em um nível específico de esforço de compactação. No *Superpave*, isto é função do número de giros do projeto,  $N_{des}$ . O  $N_{des}$  é usado para variar o esforço de compactação da mistura e é uma função do nível do tráfego. O tráfego é representado pelo ESALs de projeto. O intervalo de valores para  $N_{des}$  é mostrado na tabela 2.

Tabela 2 – SUPERPAVE parâmetros de projeto

<b>SUPERPAVE - Esforço giratório de compactação</b>				
Projeto ESALs (milhões)	Parâmetros de compactação			Aplicações Estradas Típicas
	Nini	Ndes	Nmax	
< 0.3	6	50	75	Tráfego muito leve
0.3 a < 3	7	75	115	Tráfego médio
3 a < 30	8	100	160	Tráfego médio a alto
≥ 30	9	125	205	Tráfego alto

Quando especificado pela agência o topo da camada de projeto é  $\geq 100$  mm da superfície do pavimento e o tráfego de projeto estimado  $\geq 0.3$  milhões ESALs, diminuir o nível de tráfego estimado por um, a menos que a mistura será exposta a linha principal de tráfego significativo antes de ser coberto. Se menos de 25 % da camada é de espessura menor que 100 mm da superfície, a camada pode ser considerada como inferior a 100 mm, para efeitos de projeto de mistura quando os ESALs projetos são entre 3 e 10 milhões ESALs a agência pode, a seu critério, indicar Nini até 7, Nprojeto até 75 e Nmax até 115, baseado em experiência local.

(fonte: adaptado de ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 48, tradução nossa)

Dois outros parâmetros do giratório também são de interesse: o número inicial de giros ( $N_{ini}$ ) e o número máximo de giros ( $N_{max}$ ). Os corpos de prova são compactados usando  $N_{des}$  e uma estimativa da compactabilidade da mistura é determinada usando  $N_{ini}$ . Uma amostra adicional é moldada no  $N_{max}$  como uma verificação a mais para ajudar a proteger o revestimento contra a falha plástica causada por tráfego em excesso, além do previsto no projeto. O  $N_{max}$  e o  $N_{ini}$  são calculados a partir do  $N_{des}$ , usando as fórmulas 8 e 9 (ASPHALT INSTITUTE, 2001, p. 48, tradução nossa):

$$\text{Log } N_{max} = 1,10 \times \text{Log } N_{des} \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$N_{max}$  = número máximo de giros;

$N_{des}$  = número de giros do projeto.

$$\text{Log } N_{ini} = 0,45 \times \text{Log } N_{des} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

$N_{ini}$  = número inicial de giros;

$N_{des}$  = número de giros do projeto.

Os valores de  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$  e  $N_{max}$  são mostrados para os níveis de tráfego definido pelo *Superpave* na tabela 2.

## 5 PAVIMENTO FLEXÍVEL

De acordo com Balbo (2007, p. 35):

O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactadas a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

Os autores Pinto e Preussler (2002, p. 11) definem o pavimento flexível como “[...] aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalente entre as camadas.”.

Segundo Bernucci et al. (2008, p. 9), “Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.”. A seguir é feita uma descrição destas quatro camadas encontradas no pavimento flexível.

### 5.1 REFORÇO DO SUBLEITO

Há necessidade de reforço do subleito quando a camada existente de solo possui baixa resistência ao cisalhamento. Sendo assim, emprega-se o reforço a fim de proporcionar maior resistência compatível à camada de fundação subjacente (BALBO, 2007).

Ainda de acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 13):

O reforço do subleito é a camada de espessura constante e variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento do pavimento, fazendo parte integrante deste e que, por circunstâncias técnicas e econômicas, é executado sobre o subleito regularizado.

## 5.2 SUB-BASE

Sub-base, incluída como parte da estrutura, pode ser composta por mais de uma camada de material devidamente compactado (PINTO; PREUSSLER, 2002). Esta pode ser uma camada de subdivisão da base de menor custo, que a ajude a resistir as suas funções estruturais quando esta necessitaria de uma espessura muito elevada (BALBO, 2007).

São apresentadas algumas funções secundárias da sub-base de acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 14-15):

- a) prevenir a intrusão ou bombeamento do solo do subleito na base [...];
- b) prevenir o acúmulo de água livre no pavimento [...];
- c) proporcionar uma plataforma de trabalho para os equipamentos pesados utilizados na fase de construção do pavimento.

## 5.3 BASE

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 15):

A camada de base é a parte da estrutura do pavimento situada logo abaixo da camada de revestimento acima da sub-base quando existente, ou diretamente sobre o subleito.

Sua principal função do pavimento é o suporte estrutural no pavimento, promovendo a rigidez e a resistência à fadiga da estrutura.

A base deve reduzir as tensões de compressão no subleito e na sub-base a níveis aceitáveis ou seja, deve distribuir as cargas aplicadas na superfície do pavimento de modo a minimizar ou eliminar as deformações de consolidação e cisalhamento no subleito e ou sub-base.

Além disso, deve garantir que a magnitude das tensões de flexão no revestimento não o leve ao trincamento prematuro.

De acordo com Balbo (2007, p. 38), a camada de base também pode “[...] desempenhar papel importante na drenagem subsuperficial dos pavimentos.”, quando utilizada para tal função costuma ser espessa e de materiais apropriados para a função.

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 15), os materiais utilizados na camada de base costumam ter especificações mais rigorosas como: “[...] resistência, plasticidade, graduação e durabilidade.”.

## 5.4 REVESTIMENTO

O revestimento asfáltico é uma mistura basicamente de agregados pétreos e ligante asfáltico que pode ser subdividida em capa de rolamento (camada em contato direto pneu-pavimento) e de *binder* (ou intermediária). A escolha das camadas presentes no pavimento depende do tráfego de projeto e dos materiais disponíveis para construção. (BERNUCCI et al., 2008).

A divisão do revestimento asfáltico em mais de uma camada pode ser feita por diversas razões, tais como, técnicas e econômicas (BALBO, 2007). Isto pode proporcionar um melhor dimensionamento do pavimento asfáltico e proporcionar maior durabilidade tanto a deformações permanentes, quanto à fadiga no revestimento. O quadro 5 apresenta uma descrição entre as diferenças encontradas nas camadas de revestimento asfáltico.

Quadro 5 – Termos aplicáveis às camadas de revestimento asfáltico

DESIGNAÇÃO DO REVESTIMENTO	DEFINIÇÃO	ASSOCIAÇÕES
Camada de rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais	Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento
Camada de ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento	Camada de <i>binder</i> ou simplesmente <i>binder</i>
Camada de nivelamento	Em geral, é a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista [...]	Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem
Camada de reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas	"Recape" e recapeamento são termos populares [...]

(fonte: adaptado de BALBO, 2007, p. 37)

Segundo Bernucci et al. (2008, p. 9), “O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança)”. Já para Pinto e Preussler (2002, p. 18), “A camada de revestimento de uma estrutura flexível consiste de uma mistura de agregados minerais e materiais betuminosos, sobreposta à camada de base.”.

Ainda segundo Pinto e Preussler (2002, p. 18), o revestimento asfáltico deve atender aos critérios a seguir:

- a) resistir às forças abrasivas do tráfego;
- b) reduzir a penetração de água superficial no pavimento;
- c) proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento dos veículos;
- d) proporcionar um rolamento suave e uniforme ao tráfego.

Por fim, também de acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 18), “O sucesso do revestimento, depende da obtenção de uma mistura com uma ótima graduação de agregados e da porcentagem de ligantes betuminoso, de modo a ser durável, resistente a fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas.”.



## 6 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

As deformações permanentes ou afundamentos são causados pela passagem repetida de tráfego. Este defeito se torna mais comum nos meses quentes do ano, quando há uma elevação da temperatura do pavimento, que resiste menos às passagens repetidas dos veículos e agrava-se cada vez mais pelo excesso de cargas transportadas.

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 316-317):

Deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento [...], ou às subcamadas [...] ou ainda a uma combinação de efeitos. As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem representar deformações permanentes principalmente por densificação adicional do tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma seleção dos materiais e compactação adequada e um bom projeto estrutural de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros.

Os afundamentos do revestimento asfáltico, podem ser definidos segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006a, p. 64), como:

[...] uma deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de solevamento, podendo apresenta-se sob a forma de:

- a) afundamento plástico causado pela influência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou de subleito;
- b) afundamento de consolidação causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas de pavimento ou de subleito.

Quando os afundamentos ocorrem com extensões até 6 m são chamados de 'afundamentos locais'. Quando ocorrem com extensões contínuas maiores são chamados de 'afundamentos de trilhas de roda'.

Em Pinto e Preussler (2002, p. 55-57), os afundamentos são subdivididos em três tipos: localizado ou depressão, na trilha de roda e plástico. A seguir, são apresentadas as definições de cada um deles:

- a) afundamento localizado ou depressão,
  - descrição: a depressão é um afundamento localizado cujo nível (ou altura) é mais baixa do que a superfície ao seu redor. Na fase inicial esta falha é percebida após a ocorrência de chuva, devido ao acúmulo de água em seu interior;

- causas prováveis: as depressões podem ser causadas por deficiências construtivas ou geradas por recalque do terreno de fundação ou do material de aterro;
- correção: restabelecer seção transversal com massa betuminosa ou estudos específicos.

b) afundamento na Trilha de Roda,

- descrição: é uma depressão do revestimento que se forma na região onde se dá a passagem das cargas, ou seja, nas trilhas de roda. Em sua fase inicial esta falha só é perceptível após a ocorrência de chuva, pois os sulcos ficam preenchidos por água. Até certos limites estes afundamentos são toleráveis, porém, quando o acúmulo das deformações permanentes formam flechas expressivas nas trilhas de roda, a estrutura estará em um estado terminal e colocando em risco a segurança dos usuários;
- causas prováveis: (1) compactação insuficiente de uma ou mais camadas durante a construção; (2) mistura asfáltica inadequada (com baixa estabilidade); (3) enfraquecimento de uma ou mais camadas devido à infiltração de água;
- correção: restabelecer seção transversal ou estudos específicos.

c) afundamentos Plásticos,

- descrição: é uma depressão caracterizada por um afundamento na região solicitada e um sollevamento lateral;
- causas prováveis: o afundamento plástico é causado pela ruptura de uma ou mais camadas do pavimento ou fluência elevada da massa asfáltica;
- correção: estudos especiais para definir o grau do problema.

Segundo Medina e Motta (2005, p. 282), “O estudo das deformações permanentes das misturas asfálticas é considerado um problema à parte. Consiste em dosar as misturas de modo que resistam aos esforços do tráfego e à solicitação climática.”. Os ensaios de deformação permanente existentes em laboratório buscam simular as condições de campo em dada temperatura. Estes ensaios podem ser realizados com diversas misturas, variando tanto agregados como ligantes, para que se possa realizar uma comparação nos resultados. Pode ser feito a adição de polímeros ou da borracha moída, reciclada de pneus ao ligante (com propriedades que ajudam a diminuir o efeito da deformação permanente no revestimento asfáltico). Ainda, segundo Medina e Motta (2005, p. 282), “Os afundamentos de trilhas de roda são comparados de modo empírico aos observados na pista.”.

Segundo Medina e Motta (2005, p. 296):

[...] a medida de afundamento com simuladores de laboratório tipo LCPC e APA [...] e de *creep* ou deformação axial [...] tem permitido concluir que a grande influência do tipo de cimento asfáltico (CAP) empregado na mistura, mas principalmente da

granulometria do agregado. Quanto mais grossa a granulometria mais consistente o CAP maior resistência a deformação permanente; asfaltos modificados, por polímero ou borracha de pneu tem tendência a gerarem misturas menos deformáveis do ponto de vista plástico.

A figura 6 exemplifica um caso de deformação permanente em estágio avançado, em um corredor de ônibus, localizado na cidade de Porto Alegre.

Figura 6 – Exemplo de deformação permanente no revestimento asfáltico



(fonte: foto da autora)

## 7 ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Uma vez que, a deformação permanente é considerada um dos principais defeitos do pavimento, cresce de importância a realização de ensaios laboratoriais para analisar os revestimentos asfálticos, quanto a este defeito. Estes ensaios, buscam prever o comportamento das misturas asfálticas, quanto a esta patologia. No Brasil, há alguns ensaios com esse objetivo. A seguir é feita uma descrição dos mais utilizados.

### 7.1. ENSAIO UNIAXIAL DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE SOB CARGAS ESTÁTICAS

Este ensaio também é conhecido como ensaio de *creep* estático. É um dos ensaios mais simples realizados hoje em dia. Ele pode ser efetuado tanto por aplicação de cargas compressiva, como por cargas de torção, flexão e tração. A principal forma de sua realização no Brasil é por cargas compressivas, sendo por isso conhecido como ensaio de compressão uniaxial (BERNUCCI et al., 2008).

No ensaio normalmente realizado no País, um corpo de prova cilíndrico, moldado em laboratório ou extraído de campo (com espessura padrão *Marshall*), recebe a aplicação de uma carga de compressão ao longo de um tempo (BERNUCCI et al., 2008).

As leituras de deformações podem ser obtidas tanto por extensômetros *Linear Variable Differential Transformers* (LVDT) acoplados às placas de carregamento ou diretamente aos corpos de prova, como mostrado nas figuras 7 e 8. Desta forma, torna-se importante um paralelismo entre as faces do CP, para uma melhor leitura. Os dados obtidos no ensaio são gravados através de um programa automatizado (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 7 – Posicionamento dos LVDT sobre a placa de carregamento



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2008)

Figura 8 – Posicionamento dos LVDT acoplados ao corpo de prova



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2008)

Segundo Nascimento (2008, p. 31):

Num ensaio de compressão estática (*Creep*) mede-se a relação da deformação total com o tempo para um determinado carregamento, o qual pode ser confinado ou não. Assim, utilizando-se um ciclo de carga e descarga, ou até mesmos ciclos repetidos incrementais de carga, obtém-se informações suficientes para a determinação das componentes elástica (recuperável) e plástica (não-recuperável) independentes do tempo; assim como parâmetros viscoelastoplásticos, que são dependentes do tempo.

Segundo Bernucci et al. (2008, p. 318):

Devido à aplicação da carga estática, o corpo de prova deforma até se estabilizar ou romper (na verdade trata-se de um estado avançado de dano). Essa “ruptura” nem sempre é visível, havendo vários critérios para defini-la como, por exemplo, quando

se ultrapassa uma deformação relativa de 0,008 mm/mm, ao final de 1 hora, então a mistura asfáltica não é adequada para resistir às deformações permanentes.

O que se obtém do ensaio é a deformação ( $\epsilon(t)$ ) do corpo de prova durante o período de ensaio. Com este parâmetro, calcula-se a denominada função fluência, através da fórmula 10 (BERNUCCI et al., 2008).

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

$D(t)$  = função fluência;

$\epsilon(t)$  = deformação em função do tempo;

$\sigma_0$  = tensão constante aplicada.

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 318), a fórmula é “[...] bastante importante na solução de determinados problemas envolvendo materiais como as misturas asfálticas (materiais viscoelásticos lineares)”. Isto ocorre, pois desde que se tenha o histórico de tensão,  $\sigma(t)$  é possível obter o histórico de deformação em qualquer configuração geométrica e de contorno. Ainda segundo Bernucci et al. (2008, p. 318), “Numa analogia simples, a função fluência corresponderia ao inverso do módulo de elasticidade, porém agora como uma função do tempo.”.

Este ensaio, apesar de ser um dos mais utilizados por sua simplicidade não possui boa representatividade dos dados.

## 7.2. ENSAIO UNIAXIAL DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE SOB CARGAS REPETIDAS

O ensaio uniaxial sob cargas repetidas é um aperfeiçoamento do ensaio estático, conhecido também como *creep* dinâmico, este ensaio é realizado em CP *Marshall*. Ele consiste na aplicação de pulsos de carga no corpo de prova, a uma temperatura controlada, o carregamento tem uma duração normal de 0,10 s e intervalos de aplicação de carga de 0,90 s,

a uma frequência de 1 Hz, esta sequência de carregamento é repetida durante 1 hora para cada corpo de prova. Ao final do ensaio, como no ensaio de *creep* estático, é feita a medida dos deslocamentos (BERNUCCI et al. 2008).

A deformação relativa ( $\epsilon_{rel}$ ) ou deslocamento permanente é estimada dividindo-se o deslocamento absoluto ( $\Delta h$ ) pela altura inicial do corpo de prova ( $h_{cp}$ ). A fórmula 11 apresenta o cálculo do *creep* dinâmico, que é obtido através da tensão aplicada pelo deslocamento relativo (BERNUCCI et al., 2008):

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\epsilon_{rel}(t)} \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

$E_c(t)$  = *creep* dinâmico

$\sigma$  = tensão aplicada

$\epsilon_{rel}(t)$  = deslocamento relativo

### 7.3. SIMULADORES DE TRÁFEGO DE LABORATÓRIO

Há vários modelos de simuladores de tráfego, podendo estes ser de laboratório ou em verdadeira grandeza. Os ensaios em simuladores de verdadeira grandeza, são os que se aproximam mais da realidade encontrada em campo, porém possuem a necessidade de uso de um fator laboratório-campo para a previsão das deformações permanentes, o que o torna um ensaio de difícil realização (BERNUCCI et al., 2008, p. 321).

Os simuladores de laboratório também apresentam um bom resultado, mas atualmente o Brasil só possui quatro equipamentos: dois franceses desenvolvidos pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) – um no laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP e outro no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras – CENPES, apresentados na figura 9. Outro equipamento é o desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC em parceria com a iniciativa privada (figura 10), denominado *Sistran*. Por último o Laboratório Central da Petrobras Distribuidora, possui um equipamento norte-americano o APA (*Asphalt Pavement Analyser*) mostrado na figura 11 (NASCIMENTO, 2008).

Figura 9 – Conjunto de mesa compactadora, simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório e placa de mistura asfáltica utilizada em ensaio



(fonte: foto da autora)

Figura 10 – Equipamento simulador de tráfego de laboratório brasileiro – Sistran



(fonte: NASCIMENTO, 2008, p. 40)



Figura 11 – Equipamento simulador de tráfego de laboratório norte-americano – APA



(fonte: adaptado de NASCIMENTO, 2008, p. 40)

O ensaio no simulador de tráfego LCPC, segue a especificações francesas, em que primeiramente a mistura asfáltica é compactada através de amassamento por roda de pneu com cargas e pressão de inflação reguláveis, sob temperatura controlada. A parte da análise da deformação permanente é feita com um equipamento munido de roda pneumática, cuja pressão do pneu e carga no eixo são controláveis, inclusive pode-se ter o controle da temperatura. O ensaio é realizado em duplicidade. O equipamento possui um eixo com dois pneumáticos, ficando sempre em contato com a placa. O pneumático aplica carregamentos em movimentos longitudinais de ida e vinda, em ciclos de 1Hz. No ensaio mede-se o afundamento na trilha de roda em diversos pontos a cada determinado número de solicitações, usualmente utilizados 1.000, 3.000, 10.000, 20.000, e 30.000 ciclos. Ao final, o resultado do ensaio é dado em termos de afundamento em milímetros ou como um percentual da altura da placa original (BERNUCCI et al., 2008).

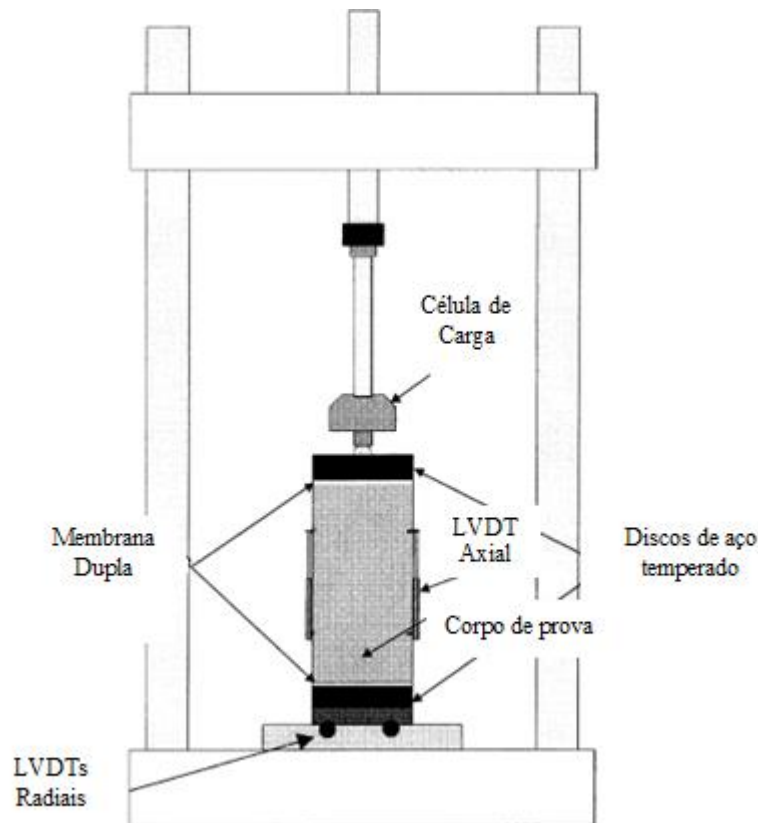
O ensaio com o simulador APA tem similaridades com o LCPC, porém a compactação é feita através de vibração. Este pode ser feito tanto com placas, como com corpos de prova cilíndricos. A carga é transmitida por meio de mangotes de borracha preenchidos com ar e o equipamento ainda permite a saturação dos corpos de prova com água para avaliar o seu efeito deletério durante o ensaio. Por fim, a placa é retirada do equipamento e é feita a medida do afundamento (BERNUCCI et al., 2008).

Além dos ensaios utilizados no Brasil, ainda existem outros ensaios realizados internacionalmente, como o Hamburg e o Pur Wheel.

#### 7.4. ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA

Este ensaio é uma alternativa aprimorada do ensaio apresentado no item 7.2. Neste ensaio, o corpo de prova é submetido a um carregamento cíclico de compressão, como é mostrado na figura 12, em que a deformação permanente é obtida através do número de ciclos. O ciclo consiste em um pulso *haversine* de 0,1 s seguido por um repouso de 0,9 s. O tempo de ensaio tipicamente é de 3 h ou 10.000 ciclos de carga (WITCZAK et al., 2002, p. 12, tradução nossa).

Figura 12 – Típico ensaio uniaxial de carga repetida

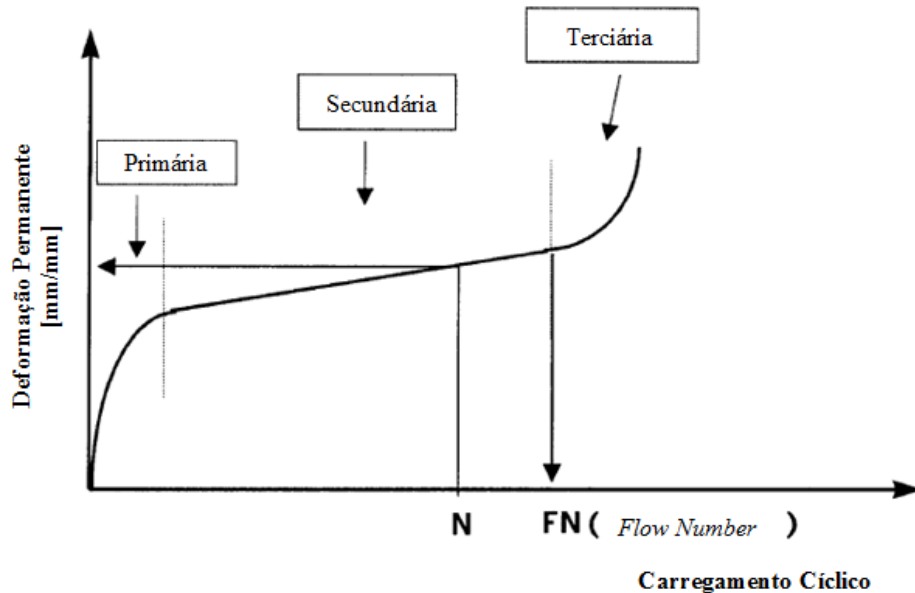


(fonte: WITCZAK et al., 2002, p. 79 tradução nossa)

Os resultados dos ensaios são obtidos através da deformação permanente, acumulada como uma função do número de ciclos de carga (repetições). Durante a realização do ensaio obtém-se a curva Deformação permanente *versus* Número de ciclos. Esta curva pode ser dividida em três zonas: primária, secundária e terciária, conforme mostrado na figura 13. O número de ciclos da segunda para a terceira zona (ponto em que começa a ocorrer cisalhamento

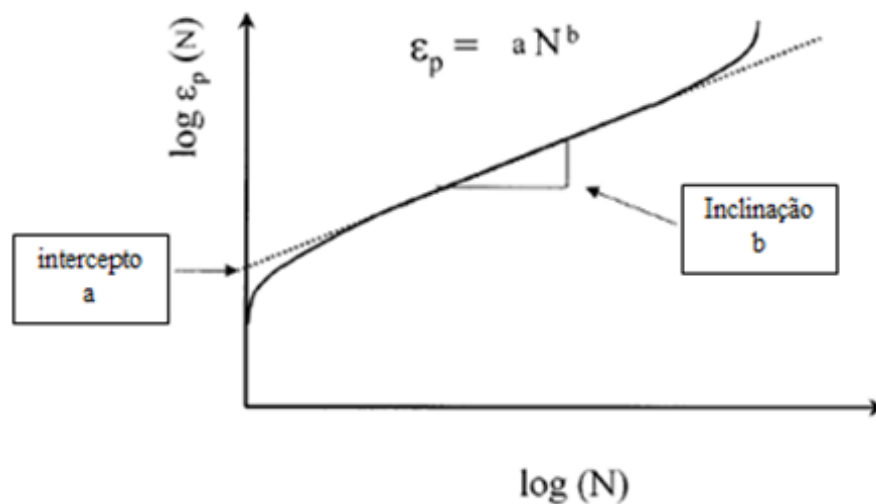
constante) é definido como *Flow Number*. A figura 14 mostra o mesmo comportamento da curva da figura 13, mas em escala log-log (WITCZAK et al., 2002, p. 12, tradução nossa).

Figura 13 – Típica relação entre total cumulativo de deformação plástica e ciclos de carregamento



(fonte: WITCZAK et al., 2002, p. 12 tradução nossa)

Figura 14 – Constantes de regressão a e b plotados em uma escala log-log



(fonte: WITCZAK et al., 2002, p. 12 tradução nossa)

O intercepto **a**, apresentado na figura 13, representa a deformação permanente no ciclo  $N = 1$ , enquanto a inclinação **b** representa a taxa de variação da deformação permanente em função

do número de ciclos. Estes dois parâmetros são derivados da zona secundária (linear). Com estes dados obtém-se a deformação plástica a qual é dada pela fórmula 12 (WITCZAK et al., 2002, p. 12, tradução nossa, grifo nosso):

$$\epsilon_p = a N^b \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

$\epsilon_p$  = deformação plástica;

a = deformação permanente no ciclo  $N = 1$ ;

b = taxa de variação da deformação permanente em função do número de ciclos.

O ensaio é realizado em uma única temperatura efetiva  $T_{eff}$ , em corpos de prova com diâmetro de 100 mm e altura 150 mm, para misturas com tamanho nominal de agregado máximo inferior ou igual a 37,5 mm (WITCZAK et al., 2002, p. 73, tradução nossa). E os CP são moldados para que ao fim atinjam um volume de vazios de  $7\% \pm 0,5\%$  (MAHMOUD; BAHIA 2004<sup>1</sup> apud NASCIMENTO, 2008).

O *Flow Number* pode ser usado como um indicador de desempenho para a deformação permanente, resistência da mistura ou pode simplesmente ser utilizado para comparar a resistência ao cisalhamento de várias misturas betuminosas (WITCZAK et al., 2002, p. 73, tradução nossa).

Segundo Witczak et al. (2002, p. 12, tradução nossa) outros três parâmetros oriundos do ensaio uniaxial de carga repetida foram correlacionados à deformação permanente, o módulo de resiliência (MR), a deformação plástica ( $\epsilon_p$ ) por ciclo de carga e a relação entre a deformação plástica e resiliente (tensão axial recuperável durante o período restante do ciclo de carga) -  $\epsilon_p / \epsilon_r$ .

Em Nascimento (2008, p. 192) ele conclui que:

[...] visando adequado desempenho em termos de deformação permanente, recomenda-se os seguintes critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras:

---

<sup>1</sup> MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. Using the Gyrotory compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures. Madison: Department of Civil and Environmental Engineering University of Wisconsin, 2004.

a) tráfego médio:

[...]

– FN @ 60°C (204 KPa) > 300 ciclos.

b) tráfego pesado:

[...]

– FN @ 60°C (204 KPa) > 750 ciclos.

## 8 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos próximos itens, são apresentados os materiais, sendo estes os agregados pétreos e os cimentos asfálticos de petróleo. Também são descritos sobre os métodos utilizados para o projeto das misturas asfálticas adotadas na pesquisa, para a moldagem dos CP e para a realização do ensaio uniaxial de carga repetida.

### 8.1 MATERIAIS

Os dois itens a seguir, apresentam os materiais utilizados na pesquisa e suas características. Os ensaios para a avaliação destes foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (Lapav) e seguiram as normas citadas.

#### 8.1.1 Agregados Pétreos

Os agregados utilizados na pesquisa são de origem basáltica, formação Serra Geral e foram coletados em uma pedreira localizada na cidade de Santo Antônio da Patrulha – RS em três diferentes frações: 3/4”, 3/8” e pó de pedra. A figura 15 apresenta uma porção destas três frações. O material foi coletado das pilhas de estocagem, sendo necessário para realização dos ensaios de caracterização o quartejamento, a lavagem e a secagem do material.

Figura 15 – Frações de agregados pétreos utilizados na pesquisa:  
3/4”, 3/8” e pó de pedra



(fonte: foto da autora)

Na tabela 3, são apresentados os valores encontrados para os ensaios de caracterização e de aceitação dos agregados que foram realizados no Lapav, assim como as respectivas normas utilizadas. As figuras 16 a 19 apresentam imagens dos ensaios de adesividade para os quatro ligantes utilizados no trabalho, mostrando a satisfação do resultado.

Tabela 3 – Características dos Agregados

Ensaio	Método	Limites	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
Desgaste Los Angeles (%)	DNER-ME 035/98	$\leq 50$	9,51	–	–
Índice de forma	DNER-ME 086/94	$> 0,5$	0,8	0,6	–
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	$\leq 12$	6,1		
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	$\geq 55$	–	–	85
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	–	0,854	1,089	–
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 084/95	–	–	–	2,860
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 081/98	–	2,835	2,831	–
Adesividade	DNER-ME 078/94	Visual	Satisfatório	–	–

(fonte: elaborado pela autora)

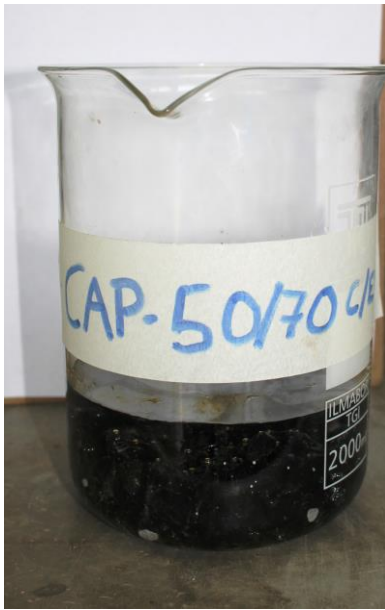
Figura 16 – Ensaio de Adesividade CAP 50/70



(fonte: foto da autora)



Figura 17 – Ensaio de Adesividade CAP 50/70 com Evotherm



(fonte: foto da autora)

Figura 18 – Ensaio de Adesividade CAP 60/85-E



(fonte: foto da autora)



Figura 19 – Ensaio de Adesividade CAP AB-8



(fonte: foto da autora)

Para a realização do ensaio de granulometria foram utilizadas as peneiras correspondentes à faixa-C do DNIT, sendo estas de abertura 19,1 mm, 12,7 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,0 mm, 0,42 mm, 0,18 mm e 0,075 mm.

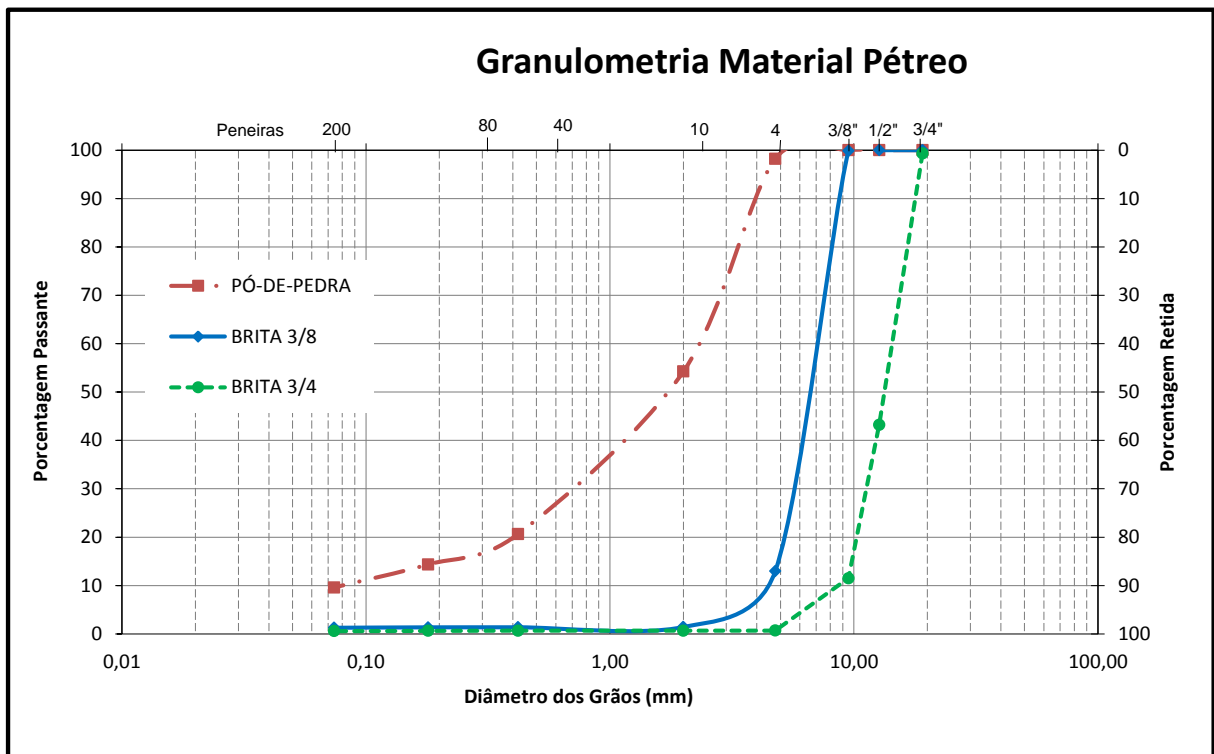
A tabela 4 apresenta a distribuição granulométrica do material e a figura 20 traz o gráfico da curva granulométrica de cada uma das frações.

Tabela 4 – Resultado do ensaio de granulometria utilizando as peneiras correspondentes à faixa-C do DNIT

Peneira		Passante (%)		
n.	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	99,3	100,0	100,0
1/2"	12,7	43,2	100,0	100,0
3/8"	9,5	11,5	99,9	100,0
4	4,76	0,7	13,0	98,2
10	2	0,7	1,4	54,3
40	0,42	0,7	1,4	20,6
80	0,18	0,6	1,4	14,4
200	0,08	0,6	1,3	9,6

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 20 – Gráfico do ensaio granulométrico do material pétreo



(fonte: elaborado pela autora)

### 8.1.2 Ligantes Asfálticos

Os ligantes asfálticos utilizados neste trabalho foram:

- CAP 50/70 – ligante convencional;
- CAP 50/70 com adição de *Evotherm* – ligante convencional com aditivo para mistura morna;
- CAP 60/85-E – ligante modificado por polímero elastomérico;
- CAP AB-8 – ligante modificado por borracha de pneu moída.

Estes materiais são especificados pela ANP, conforme já apresentado no capítulo 3. Nas tabelas 5 a 8 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização segundo as normas brasileiras juntamente com os limites estabelecidos pela ANP.

Tabela 5 – Propriedades do ligante convencional CAP 50/70

Ensaio	Método	Especificação (ANP)	Resultado
Viscosidade Brookfield 135°C SP21, 20 rpm, mín. (cP)	NBR 15184/04	274	300
Viscosidade Brookfield 150°C SP21, mín. (cP)		112	155
Viscosidade Brookfield 177°C SP21, (cP)		57-285	59,5
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/08	46	48
Penetração a 25°C, 100 g, 5s (0,1 mm)	NBR 6576/07	50-70	56
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193/96	-	1,01
Índice de susceptibilidade térmica	-	(-1.5) a (+0.7)	-1,45
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.			
Aumento do ponto de amolecimento, máx. (°C)	NBR 6560/08	8	1
Penetração retida, mín. (%)	NBR 6576/07	55	77

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 6 – Propriedades do ligante convencional CAP 50/70 com *Evotherm*

Ensaio	Método	Especificação (ANP)	Resultado
Viscosidade Brookfield 135°C SP21, 20 rpm, mín. (cP)	NBR 15184/04	274	480
Viscosidade Brookfield 150°C SP21, mín. (cP)		112	242
Viscosidade Brookfield 177°C SP21, (cP)		57 - 285	91
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/08	46	48
Penetração a 25°C, 100 g, 5s (0,1 mm)	NBR 6576/07	50 - 70	57
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193/96	-	1,02
Índice de susceptibilidade térmica	-	(-1.5) a (+0.7)	-1,41
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.			
Aumento do ponto de amolecimento, máx. (°C)	NBR 6560/08	8	5
Penetração retida, mín. (%)	NBR 6576/07	55	88

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 7 – Propriedades do ligante modificado por polímero elastomérico  
CAP 60/85-E

Ensaio	Método	Especificação (ANP)	Resultado
Viscosidade Brookfield 135°C SP21, 20 rpm, máx. (cP)	NBR 15184/04	3000	1102
Viscosidade Brookfield 150°C SP21, 50 rpm, máx. (cP)		2000	529
Viscosidade Brookfield 177°C SP21, 1000 rpm, máx. (cP)		1000	201
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/08	60	67
Penetração a 25°C, 100 g, 5s (0,1 mm)	NBR 6576/07	40-70	67
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193/96	—	1,010
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, mín. (%)	NBR 15086/06	85	95
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.			
Varição do ponto de amolecimento, máx. (°C)	NBR 6560/08	(-5) a (+7)	7
Porcentagem de penetração original, mín. (%)	NBR 6576/07	60	100
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín. (%)	NBR 15086/06	55	98

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 8 – Propriedades do ligante modificado por borracha de pneu  
CAP AB-8

Ensaio	Método	Especificação (ANP)	Resultado
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/08	50	52
Penetração a 25°C, 100 g, 5s (0.1 mm)	NBR 6576/07	30-70	70
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 193/96	—	1,030
Recuperação elástica a 25°C, 10cm, mín. (%)	NBR 15086/06	50	83
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.			
Varição do ponto de amolecimento, máx.	NBR 6560/08	10	4
Porcentagem de penetração original, mín.	NBR 6576/07	55	84
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín. (%)	NBR 15086/06	100	105

(fonte: elaborado pela autora)

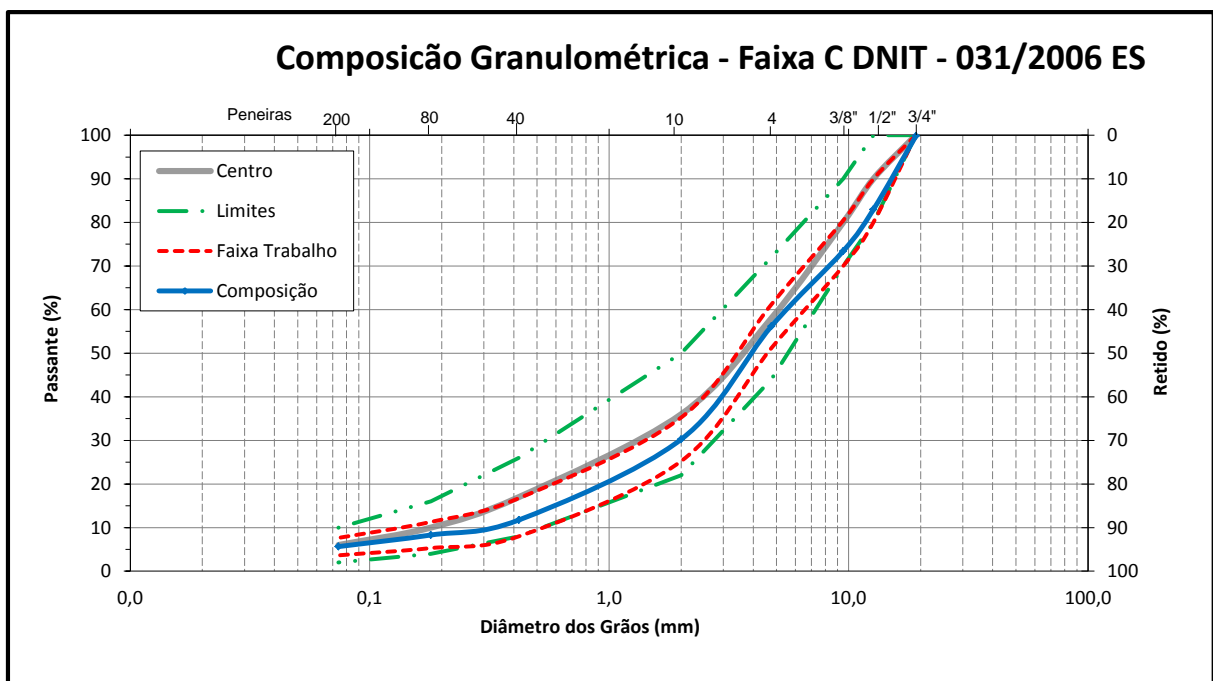
## 8.2 MÉTODOS

Nos itens a seguir, são descritas as etapas necessárias para a composição da curva granulométrica utilizada na pesquisa, e para a dosagem das misturas asfálticas, assim como a definição de um plano experimental e os processos utilizados na execução do ensaio de *Flow Number*.

### 8.2.1 Composição da Curva Granulométrica

Com os resultados obtidos na granulometria dos agregados pétreos, foi possível estabelecer uma curva granulométrica que se enquadrou na faixa-C do DNIT. Adotou-se esta faixa por se tratar de uma graduação convencional utilizada em camadas de rolamento nas estradas do sul do Brasil. Na figura 21 é apresentada a curva granulométrica escolhida, a qual foi usada em todas as misturas asfálticas estudadas.

Figura 21 – Curva granulométrica utilizada na pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

### 8.2.2 Plano Experimental

Durante a pesquisa foi elaborado um plano experimental que serviu de base para estabelecer alguns dos passos futuros do trabalho, como: a dosagem das misturas asfálticas, a compactação dos CP e a quantidade de CP que seria moldada para cada uma das misturas asfálticas estudadas.

### 8.2.2.1 Temperatura de Mistura e de Compactação

As temperaturas de mistura e de compactação utilizadas nas dosagens das misturas asfálticas foram propostas pela empresa fornecedora dos ligantes asfálticos e são apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Temperaturas de mistura e de compactação

<b>Temperaturas (°C)</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>CAP 60/85</b>	<b>CAP AB8</b>
Ligante Asfáltico	153	165	175
Agregado	163	175	185
Compactação	140	155	175

(fonte: adaptado empresa fornecedora dos ligantes asfálticos)

Para a mistura com CAP 50/70 com *Evotherm*, foram utilizadas temperaturas sugeridas pelo fornecedor do aditivo, sendo estas: temperatura de mistura do ligante asfáltico 153 °C; temperatura de mistura do agregado 133 °C e temperatura de compactação 110 °C.

### 8.2.2.2 Metodologia *Marshall* de Dosagem e Teor de Projeto

A dosagem *Marshall* foi utilizada para a obtenção do teor de projeto das misturas asfálticas. Adotou-se esse método por ainda ser o mais empregado no País.

Fez-se a dosagem para a mistura com o CAP 60/85-E e para o CAP AB-8. O teor de projeto utilizado para o CAP 50/70, sendo este também empregado para a mistura com o *Evotherm*, foi obtido de outra pesquisa<sup>2</sup> em desenvolvimento no Lapav na qual a autora também tem participação. Desta forma, executaram-se duas dosagens.

Para a execução das misturas, dispôs-se os agregados pétreos e o ligante asfáltico aquecidos nas temperaturas recomendadas, em uma cuba térmica com misturador eletrônico com capacidade de até 10 L.

---

2 Projeto de Pesquisa: Desempenho de Misturas Asfálticas Mornas Utilizando a Tecnologia *Evotherm*. O objetivo geral é estabelecer um protocolo para dosagem de misturas asfálticas mornas a partir da tecnologia já existente.

Após, a mistura foi posta em estufa por 2 horas na temperatura de compactação para simular o envelhecimento de curto prazo que acontece na usinagem, permitindo a melhor absorção do agregado pelo ligante, além de proporcionar a escolha mais adequada do teor de projeto.

Para cada um dos teores de ligantes asfálticos, foram misturadas quantidades suficientes para a compactação de 3 CP de 102 mm de diâmetro e 65 mm de altura +5 ou -5 mm, e para a realização do ensaio de densidade máxima teórica (Gmm), conforme a NBR 15619/2012. Os CP foram compactados com 75 golpes por face. Para cada uma das quatro misturas estudadas dosou-se de 3 a 5 teores diferentes de ligante variando de +0,5 a -0,5 %.

No dia seguinte à compactação, extraiu-se os CP e realizou-se o ensaio para a obtenção da densidade aparente (Gmb) de cada um dos CP segundo a NBR 15573/2012. Com os resultados de Gmb e Gmm calculou-se o Vv, VAM, RBV.

Em posse dos dados, traçou-se a curva porcentagem de ligante *versus* volume de vazios, para cada uma das três misturas. Através desta curva foi possível encontrar o teor de ligante que garantiu volume de vazios próximo a 4% para a mistura asfáltica.

A porcentagem de ligante que proporcionou os 4 % de volume de vazios foi selecionada e chamada de teor de projeto da mistura asfáltica. Portanto o volume de vazios é o principal parâmetro para a escolha do teor de projeto.

Por fim foram realizados ensaios em prensa *Marshall* para a determinação da Estabilidade e Fluência dos CP.

Com os teores de projeto selecionados, foram moldados três CP para cada mistura. Entre esses CP, um de cada mistura foi selecionado para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RT). A figura 22 mostra um CP sendo ensaiado. Este ensaio foi realizado segundo a NBR 15087/2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012c). O ensaio é caracterizado pela aplicação de um esforço de compressão no plano diametral do CP, até que esse rompa. Assume-se que a ruptura aconteça devido às tensões de tração geradas no plano perpendicular ao plano de aplicação da carga.

Os outros dois CP primeiramente foram ensaiados quanto ao módulo de resiliência para misturas asfálticas, como mostra a figura 23. O ensaio foi realizado segundo a NBR 16018/2011 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011). Este ensaio

compreende a relação carga aplicada e o deslocamento (recuperável). Este pode ser um dos parâmetros utilizados para o dimensionamento de pavimentos no País. Ele verifica a capacidade da deformação recuperável que a mistura tem quando submetida a carregamentos cíclicos, simulando as condições do que ocorre em campo. Posteriormente os CP também foram ensaiados a RT.

Figura 22 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



(fonte: foto da autora)

Figura 23 – Ensaio de módulo de resiliência



(fonte: foto da autora)



### 8.2.2.3 Compactador Giratório

O compactador giratório foi utilizado para a confecção dos CP utilizados no ensaio de *Flow Number*. Esta compactação foi escolhida, pois necessitava-se de amostras com diâmetros de 100 mm e altura de 150 mm. Realizou-se a compactação dos CP diretamente nestas dimensões. Para a compactação destes CP, fixou-se o número de giros de compactação e buscou-se volume de -se vazios de 7 % + ou - 0,5 % para cada CP. A figura 24 apresenta CP moldados no compactador giratório.

Figura 24 – CP compactado no compactador giratório



(fonte: foto da autora)

### 8.2.3 Ensaio Uniaxial de Carga Repetida

Ensaio uniaxiais de carga repetida são executados para a determinação da resistência a deformação permanente através do parâmetro *Flow Number* das misturas asfálticas. Os ensaios foram realizados em uma prensa modelo *MTS 810 UTM Test System*. Para a realização dos ensaios foi necessário a implementação de uma rotina que seguiu as especificações da *NCHRP Report 465*.

Devido problemas mecânicos ocorridos com a prensa UTM do Lapav, os CP foram ensaiados no Laboratório de Transporte da Escola Politécnica da USP, onde foi seguida a rotina de ensaio estabelecida por este laboratório. No apêndice A encontra-se a rotina implementada durante o presente trabalho pela autora.

Sendo assim, primeiramente o CP foi capeado com uma fina camada de gesso, como ilustrado na figura 25. Esta camada de gesso foi aplicada para possibilitar uma melhor distribuição da carga aplicada no CP. Após, o CP foi condicionado em estufa a 60° C por pelo menos 1 hora e 30 min. Por fim, após o condicionamento em estufa o CP foi transferido para a câmara da MTS e posicionado para o ensaio, como mostra a figura 26. Aguardou-se de 5 a 10 min para equalizar a temperatura e após iniciou-se o ensaio.

O ensaio consistiu em uma aplicação inicial de uma carga de contato de 100 N e após, esta carga foram aplicados carregamentos cíclicos de 1600 N com 0,1 s de pulso de carga e 0,9 s de repouso.

Figura 25 – Capeamento do CP com fina camada de gesso



(fonte: foto da autora)

Figura 26 – CP posicionado para ensaio uniaxial de carga repetida



(fonte: foto da autora)

O ensaio tem duração máxima de 3 horas (10.000 ciclos). Além disto, utilizou-se como critério de encerramento do ensaio a deformação de 3,5 mm. Esta deformação foi adotada como parâmetro de finalização do ensaio, pois nessa fase o FN já foi atingido e para que não houvesse danos aos equipamentos. Durante o ensaio o software do equipamento registrava em tempo real a curva de deslocamento *versus* ciclos, sendo possível acompanhar os estágios de evolução do ensaio a figura 27 apresenta um CP ao final do ensaio.

Figura 27 – Exemplo de CP após o ensaio uniaxial de carga repetida



(fonte: foto da autora)

Ao final do ensaio dados foram coletados. Para a análise dos resultados as curvas de deformação *versus* número de ciclos e da primeira derivada da deformação *versus* o número de ciclos foram traçadas.

## 9 RESULTADOS

Nos próximos itens, são apresentados os resultados encontrados para os teores de projeto das três dosagens utilizadas no presente trabalho, os resultados dos ensaios de MR e RT, assim como os resultados encontrados para os ensaios uniaxiais de carga repetida.

### 9.1 TEOR DE PROJETO

Nas tabelas 10 a 12 são apresentados os resultados encontrados na dosagem *Marshall* para obtenção do teor de projeto de cada uma das misturas estudadas. Ressalta-se que para a mistura estudada com o CAP 50/70 com *Evotherm*, foi utilizado o mesmo teor de projeto encontrado para a mistura com o CAP 50/70 e este teor foi obtido em outro estudo desenvolvido no laboratório, como já mencionado anteriormente.

Tabela 10 – Resumo das características da mistura com CAP 50/70

Propriedade	DNIT-ES 031/2006 (Capa)	Teor de Ligante (%)				
		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Volume de Vazios (%)	3 a 5	8,1	7,0	5,5	4,3	4,2
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	55	62	70	76	78
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	17,95	18,14	18,02	18,26	19,33
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,568	2,556	2,543	2,532	2,513
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,360	2,378	2,404	2,422	2,407
Estabilidade (kgf)	> 500	840,17	798,28	822,54	817,55	850,90
Fluência (1/100")	8 a 18	10,34	9,92	9,12	12,90	11,55
Relação Est/Fluência (kgf.100")	-	55,17	50,29	47,64	66,97	62,40

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 11 – Resumo das características da mistura com CAP 60/85-E

Propriedade	DNIT-ES 031/2006 (Capa)	Teor de Ligante (%)			
		5,0	5,5	6,0	6,5
Volume de Vazios (%)	3 a 5	6,2	5,2	4,5	3,1
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	66	71	76	83
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	17,90	18,15	18,63	18,64
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,525	2,509	2,491	2,490
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,369	2,379	2,379	2,412
Estabilidade (kgf)	> 500	898,37	953,45	880,68	1156,43
Fluência (1/100")	8 a 18	13,44	16,54	17,26	17,24
Relação Est/Fluência (kgf.100")	-	76,66	100,11	96,51	126,63

(fonte: elaborado pela autora)

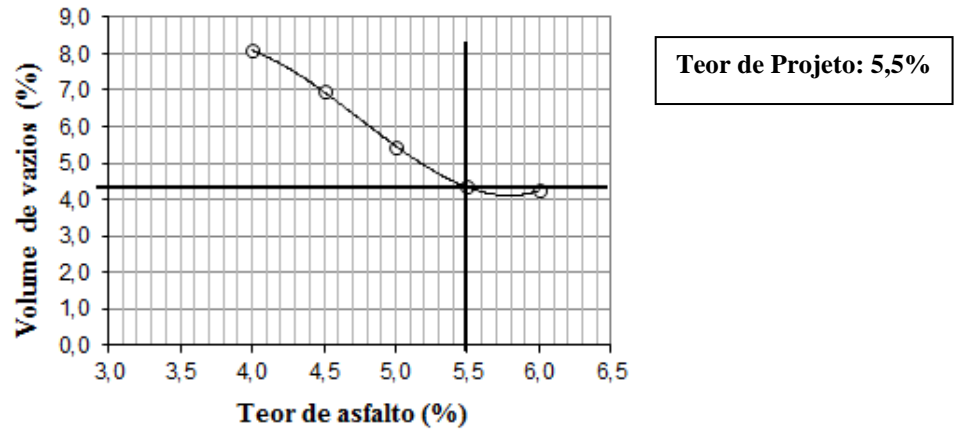
Tabela 12 – Resumo das características da mistura com CAP AB-8

Propriedade	DNIT-ES 031/2006 (Capa)	Teor de Ligante (%)		
		5,5	6,0	6,5
Volume de Vazios (%)	3 a 5	7,4	4,9	3,2
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	63	74	82
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	19,99	18,84	18,47
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,539	2,521	2,495
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	-	2,350	2,398	2,414
Estabilidade (kgf)	> 500	810,80	875,20	850,25
Fluência (1/100")	8 a 18	10,88	12,31	13,04
Relação Est/Fluência (kgf.100")	-	56,01	68,41	70,43

(fonte: elaborado pela autora)

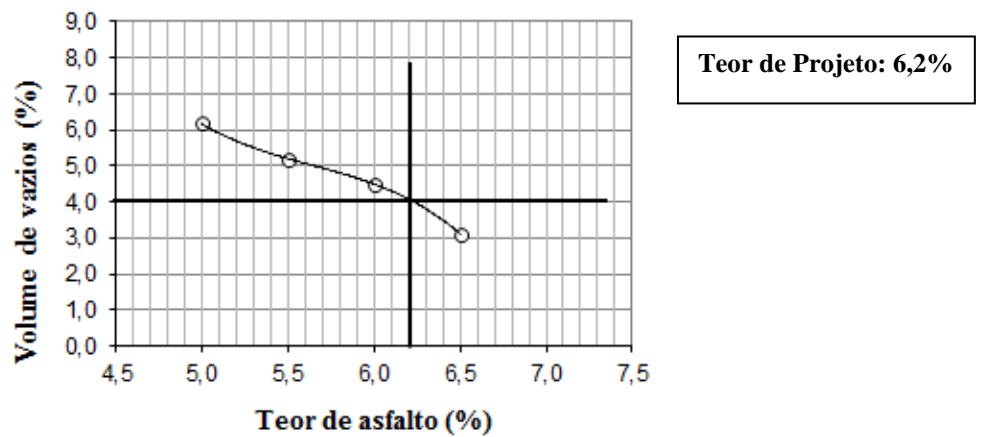
Tendo em vista que o teor do CAP 50/70 já era conhecido e que por experiência de laboratório sabe-se que normalmente os teores das misturas com ligantes asfálticos modificados são um pouco superior, procederam-se as dosagens com teores mais elevados. Desta forma, conseguiu-se reduzir para 4 teores de ligante na dosagem do CAP 60/85-E e para 3 na dosagem do CAP AB-8. Com esses teores conseguiu-se obter a curva teor de ligante *versus* volume de vazios e encontrar o teor que proporcionasse volume de vazios próximo a 4 %. As figuras 28 a 30 apresentam as curvas teor de ligante *versus* volume de vazios para as três dosagens.

Figura 28 – Gráfico da Curva Volume de vazios (%) versus Teor de asfalto (%) –  
Dosagem Marshall CAP 50/70



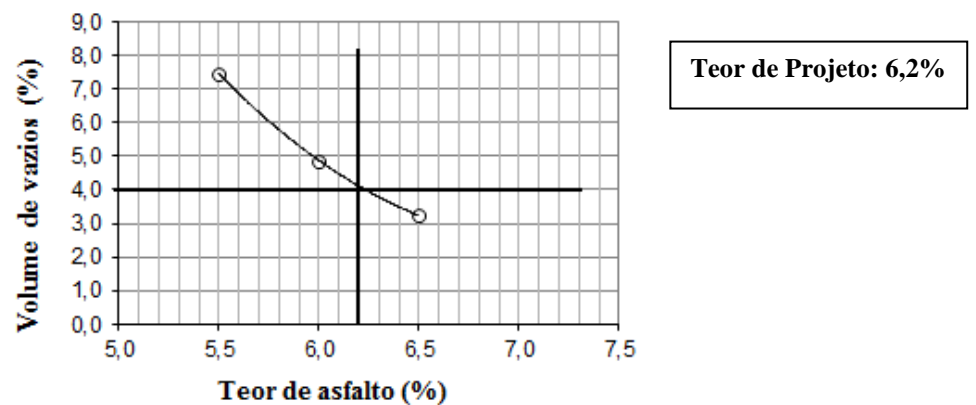
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 29 – Gráfico da Curva Volume de vazios (%) versus Teor de asfalto (%) –  
Dosagem Marshall CAP 60/85-E



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 30 – Gráfico da Curva Volume de vazios (%) versus Teor de asfalto (%) –  
Dosagem Marshall CAP AB-8



(fonte: elaborado pela autora)

## 9.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

A tabela 13 apresenta os resultados encontrados nos ensaios de RT e MR para cada uma das misturas estudadas.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de MR e RT

Mistura	MR <sub>méd.</sub> (MPa)	RT <sub>méd.</sub> (MPa)	MR/RT
CAP 50/70	3407	0.61	5585
CAP 50/70 c/ <i>Evotherm</i>	3477	0.82	4240
CAP 60/85	4026	1.18	3412
CAP AB8	4249	0.87	4884

(fonte: elaborado pela autora)

Observou-se que houve 2,1 % de aumento do MR adicionando o *Evotherm* à mistura do CAP 50/70 e 34,4 % de aumento a RT. Percebe-se que o aumento do MR não foi muito significativo, porém o aumento da RT foi relevante. Como buscam-se misturas com alto MR e alta RT, para evitar rupturas bruscas, a adição de *Evotherm* melhoraria o desempenho da mistura.

Neste mesmo sentido, percebe-se que a relação entre MR e RT da mistura com CAP 60/85 é inferior à mistura com o CAP AB8, desta forma, aquela mistura possivelmente também apresentaria melhor desempenho, pois possui uma melhor flexibilidade e uma maior RT.

## 9.3 FLOW NUMBER

Foram moldados cinco CP para cada uma das misturas e buscou-se que estes fossem os mais semelhantes possíveis no quesito altura e volume de vazios. Porém, houve grande dificuldade na confecção dos CP com volume de vazios próximos e que se enquadrassem na faixa requerida de 6,50% a 7,50% e com altura desejada. Ao final escolheu-se três CP de cada mistura, os mais semelhantes entre si e optou-se em abranger a faixa de volume de vazios entre 5,89% e 7,50% como é mostrado nas tabelas 14 a 17.

Tabela 14 – Características dos CP selecionados com o CAP 50/70

Teor de projeto (%)	Geometria			Vazios
	Nº CP	h (cm)	d (cm)	VV (%)
5,5	1	14,96	10,00	6,86
5,5	2	14,98	10,00	6,84
5,5	3	14,98	10,00	6,68

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 15 – Características dos CP selecionados com o CAP 50/70 com Evotherm

Teor de projeto (%)	Geometria			Vazios
	Nº CP	h (cm)	d (cm)	VV (%)
5,5	1	14,95	10,00	6,69
5,5	3	14,92	10,00	6,43
5,5	4	14,92	10,00	6,33

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 16 – Características dos CP selecionados com o CAP 60/85-E

Teor de projeto (%)	Geometria			Vazios
	Nº CP	h (cm)	d (cm)	VV (%)
6,2	1	14,88	10,00	6,27
6,2	2	14,88	10,00	6,95
6,2	3	15,1	10,00	5,89

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 17 – Características dos CP selecionados com o CAP AB-8

Teor de projeto (%)	Geometria			Vazios
	Nº CP	h (cm)	d (cm)	VV (%)
6,2	1	14,95	10,00	7,27
6,2	3	15,00	10,00	7,44
6,2	4	14,92	10,00	6,19

(fonte: elaborado pela autora)

Após a moldagem e seleção dos CP estes foram ensaiados. As tabelas 18 a 21 apresentam os resultados encontrados no ensaio uniaxial de carga repetida. A figura 31 apresenta o gráfico de comparação dos valores médios obtidos em cada ensaio.



Tabela 18 – Resultados de *Flow Number* com o CAP 50/70

CP	Vv (%)	FN ciclos	Média FN
1	6,86	173	124
2	6,84	94	
3	6,68	104	

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 19 – Resultados de *Flow Number* com o CAP 50/70 com *Evotherm*

CP	Vv (%)	FN ciclos	Média FN
1	6,69	92	160
3	6,43	224	
4	6,33	165	

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 20 – Resultados de *Flow Number* com o CAP 60/85-E

CP	Vv (%)	FN ciclos	Média FN
1	6,27	não atingiu FN até o final de 10.000	-
2	6,95	283	
3	5,89	não atingiu FN até o final de 10.000	

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 21 – Resultados de *Flow Number* com o CAP AB-8

CP	Vv (%)	FN ciclos	Média FN
1	7,27	181	177
3	7,44	154	
4	6,19	196	

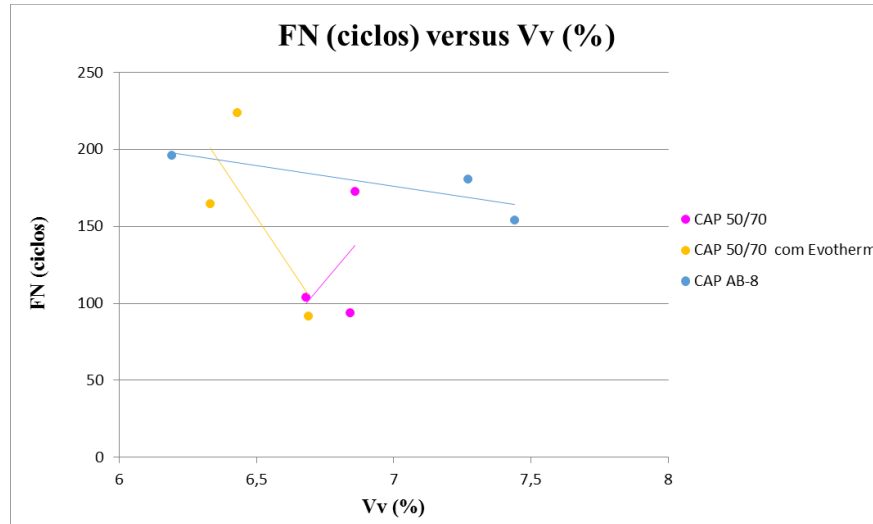
(fonte: elaborado pela autora)

Observou-se variações entre os valores de FN para amostras com mesmo CAP. A mais significativa foi com o CP 2 da mistura com o CAP 60/85-E em que ocorreu uma diferença acentuada em relação aos demais CP com a mesma mistura. Levantando-se a hipótese de que possivelmente houve algum problema de moldagem, ou até mesmo de execução do ensaio. Além disso, foi ensaiada outra amostra do CAP 60/85-E, porém com Vv inferior (5,64 %) e novamente ao concluir os 10.000 ciclos não atingiu-se o *Flow Number*. Desta foram, o resultado do CP 2 foi descartado.

Na figura 31 é apresentado a relação Vv (%) versus o FN, onde a mistura com o CAP AB-8 foi a única que apresentou uma correlação, quanto mais elevado o valor do Vv (%) mais baixo

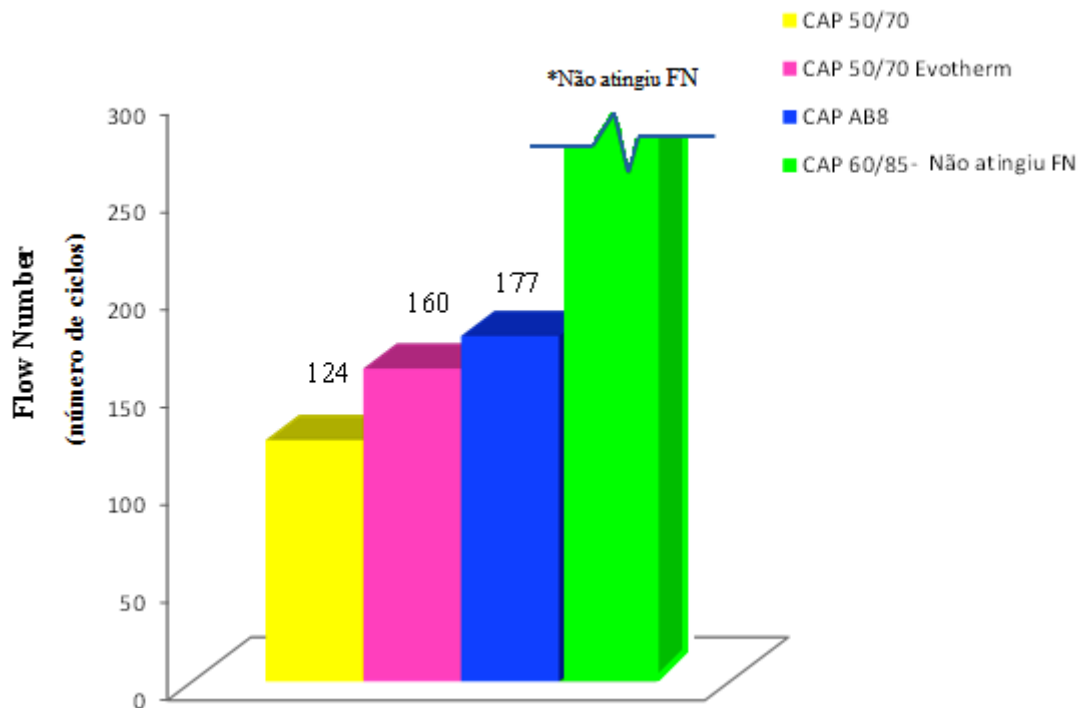
o FN, este comportamento não foi possível observar nas demais misturas. Na figura 32 é apresentada a média dos valores de FN para cada mistura.

Figura 31 – Gráfico Vv (%) versus *Flow Number* (Ciclos)



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 32 – Gráfico das médias dos *Flow Number*



(fonte: elaborado pela autora)

A mistura com o CAP 60/85-E apresentou os melhores resultados, não atingindo FN, sendo assim suficiente para que a mistura seja adequada para resistir à deformação permanente quanto ao parâmetro *Flow Number*.

A mistura com o CAP 50/70 foi a que apresentou os resultados de FN mais baixos. Quando adicionado o aditivo de mistura morna *Evotherm* a mistura apresentou um leve aumento no FN.

Por fim com a mistura com o CAP AB-8 obteve-se valores de FN próximos aos valores da mistura do CAP 50/70 com *Evotherm*.

Os valores de FN sofreram influencia devido ao volume de vazios das amostras, observou-se geralmente CP com volumes ligeiramente menores obtiveram FN maiores, além do volume de vazios, percebeu-se que a disposição dos agregados na hora de compactar a amostra também pode ter influenciado.

Houve grande dificuldade na moldagem dos CP, para que estes se enquadrassem nas características desejadas sendo estas: volume de vazios de  $7 \% \pm 0,5 \%$  e altura de 15 cm. Uma vez que a quantidade de material e a forma de mistura era a mesma para as amostras, possivelmente a forma de disposição no molde da mistura influenciava a compactação, o que, conseqüentemente, pode ter influenciado os valores de FN.

## 10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos próximos itens são apresentadas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

### 10.1 CONCLUSÕES

Para analisar o desempenho quanto à deformação permanente de quatro misturas asfálticas, realizaram-se ensaios uniaxiais de carga repetida. Ensaíram-se três CP por mistura e os dados finais foram analisados.

Verificou-se que a mistura dosada com o CAP 60/85-E apresentou os melhores resultados, não atingindo *Flow Number* durante os 10.000 ciclos de ensaio sendo assim, a hipótese proposta que a mistura com o CAP AB-8 teria os melhores resultados mostra-se inválida.

Levando-se em consideração o aspecto deformação permanente e o parâmetro FN, no qual considera-se para utilização em pistas de tráfego médio valores acima de 300 ciclos e valores acima de 750 ciclos para tráfego pesado, constatou-se que dentre as misturas analisadas na presente pesquisa, a mistura com o CAP AB-8 não mostrou-se adequada para emprego nas condições citadas. Esta mesma constatação foi obtida para a mistura com o CAP 50/70 e para a mistura com CAP 50/70 com *Evotherm*.

Os valores de FN encontrados para o CAP AB-8 ficaram 41% abaixo do necessário para a mistura ser utilizada em pistas de tráfego médio e 76% abaixo do necessário para tráfego pesado. A mistura com o CAP 50/70 apresentou um FN 59% abaixo do necessário para ser utilizada em pistas de tráfego médio e a mistura com o CAP 50/70 com *Evotherm* apresentou um FN 47% abaixo do necessário para emprego da mistura em pistas de tráfego médio.

Sendo assim, somente a mistura com CAP 60/85-E, mostrou-se apta a ser empregada nas pistas de tráfego médio e pesado quanto ao parâmetro *Flow Number*.

### 10.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para expandir os conhecimentos acerca do ensaio de *Flow Number* sugere-se que:

- a) sejam realizados ensaios no Lapav utilizando a rotina de ensaio implementada no presente trabalho, a qual está anexada no apêndice A;
- b) sejam feitos estudos no compactador giratório, para possibilitar uma rotina de moldagem e uniformidade nas compactações;
- c) sejam analisadas misturas asfálticas com diferentes faixas granulométricas para avaliar a influência destas nos ensaios uniaxiais de carga repetida.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BICOMBÚSTIVEIS. **Resolução 19**, de 11 de julho de 2005. [Brasília], 2005. Não paginado. Disponível em <[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml)>. Acesso em: 09 jul. 2014.

\_\_\_\_\_. **Resolução 39**, 24 de dezembro de 2008. [Brasília], 2008. Não paginado. Disponível em:  
<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2008/dezembro/ranp%2039%20-%202008.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/dezembro/ranp%2039%20-%202008.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)>. Acesso em: 09 jul. 2014.

\_\_\_\_\_. **Resolução 32**, de 21 de setembro de 2010. [Brasília], 2010. Não paginado. Disponível em:  
<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2010/setembro/ranp%2032%20-%202010.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2010/setembro/ranp%2032%20-%202010.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)>. Acesso em: 09 jul. 2014.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Mix Design**. 3th. ed. [S. l.], 2001. Superpave series n. 2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Concreto na pista. **Rodovias e vias**. São Paulo, n. 64, p 70-75, maio 2012. Disponível em:  
<<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/rodovias-vias-concreto-na-pista#.U2O6G1cvCBQ>>. Acesso em: 13 abr. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: materiais betuminosos – determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15086**: materiais betuminosos – determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006

\_\_\_\_\_. **NBR 6576**: materiais asfálticos – determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6560**: materiais betuminosos – determinação do ponto de amolecimento – método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 15235**: materiais asfálticos – determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 16018**: misturas asfálticas – determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15573**: misturas asfálticas – determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro, 2012a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15619**: misturas asfálticas – determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2012b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15087**: misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012c.

\_\_\_\_\_. **NBR 16273**: misturas asfálticas – propriedades volumétricas de concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2014.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimpr.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2008 (reimpr. 2010).

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. 2010. 196 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/110-2010/1549-leonardo-santana-cavalcanti#download>>. Acesso em: 10 maio 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Relatório Gerencial da Pesquisa CNT de Rodovias 2013**. 17. ed. Brasília, 2013. Não paginado. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>>. Acesso em: 6 abr. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 078/94**: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. [Brasília], 1994a. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME078-94.pdf>>. Acesso em: 31 jun. 2014

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 089/94**: agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou magnésio. [Brasília], 1994b. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME089-94.pdf>>. Acesso em: 31 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 086/94**: agregado – determinação do índice de forma. [Brasília], 1994c. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME086-94.pdf>>. Acesso em: 31 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 084/95**: agregado miúdo – determinação da densidade real. [Brasília], 1995. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME084-95.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 193/96**: materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. [Brasília], 1996. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME193-96.pdf>>. Acesso em: 31 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 054/97**: equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME054-97.pdf>>. Acesso em: 31 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98**: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998a. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME083-98.pdf>>. Acesso em 02 jul. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035/98:** agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998b. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME035-98.pdf>>. Acesso em: 31 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081/98:** agregados– determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998c. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME081-98.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2006a. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/..%5Carquivos\\_internet%5Cipr%5Cipr\\_new%5Cmanuais%5CManual\\_de\\_Restauracao.pdf](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf)> Acesso em: 13 maio 2014.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ES 031/2006:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT031\\_2006\\_ES.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT031_2006_ES.pdf)>. Acesso em 31 jun. 2014

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 155/2010:** Material asfáltico – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT155\\_2010\\_ME.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT155_2010_ME.pdf)>. Acesso em 31 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Evolução da Malha Rodoviária:** conheça a malha rodoviária federal. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria>>. Acesso em: 7 abr. 2014.

MEADWEASTVACO CO. **Evotherm Warm Mix Asphalt.** [S. l.], c2012. Disponível em: <<http://www.meadwestvaco.com/SpecialtyChemicals/AsphaltAdditives/MWV002106>>. Acesso em: 10 jun.2014.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica do pavimentos.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. do. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente.** 2008. 204 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/108-2008/1867-luis-alberto-herrmann-do-nascimento#download>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária:** conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

WITCZAK, M. W; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M.; QUINTUS, V. H. **Simple performance test for Superpave mix design.** Washington, D. C., United States, 2002. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 465.



**APÊNDICE A – Procedimento para ensaio uniaxial de carga repetida:**  
***FLOW NUMBER***

## **PROCEDIMENTO PARA ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA: *FLOW NUMBER***

- ❖ O ensaio uniaxial de carga repetida, cuja rotina é descrita neste procedimento, segue as recomendações da NCHRP Report 465.
- ❖ O procedimento descrito é válido para uma prensa MTS 810 UTM.

### ❖ **Verificação Mecânica**

Posicionar a câmara de temperatura, conforme ilustram as figuras A1 e A2

Travar os pés da câmara

Verificar se todos os parafusos estão bem apertados

Colocar as espumas de isolamento térmico na parte superior e inferior

Encaixar a peça 1, conforme figura A3, na parte superior da prensa MTS. O encaixe da peça 1 é feito com uma rosca passando no centro da peça. Sobre a peça deve ser colocado um disco espaçador. E sob a peça 1 é encaixado um disco metálico, conforme detalhe da figura A4, que é encaixado através de uma rosca passando através do centro das peças. O procedimento deve ser repetido para a parte inferior da MTS

Cortar um EVA no diâmetro do disco e desenhar com caneta o diâmetro do CP, desta forma, consegue-se garantir a centralidade fixando-se este EVA no centro do disco metálico, conforme mostra figura A5.

Figura A1 – Posicionamento da Câmara de temperatura



Figura A2 – Posicionamento da Câmara de temperatura



Figura A3 – Detalha da Peça 1

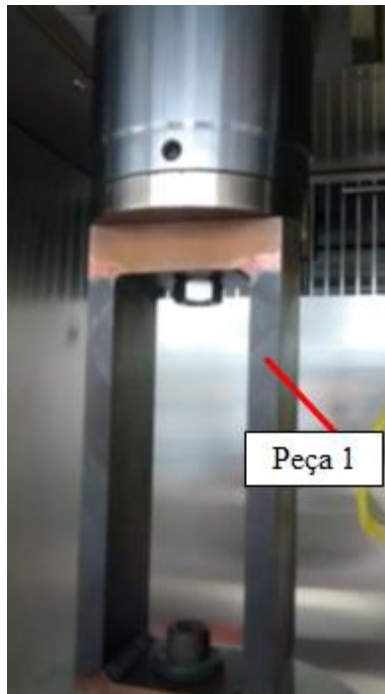


Figura A4 – Posicionamento de Peças

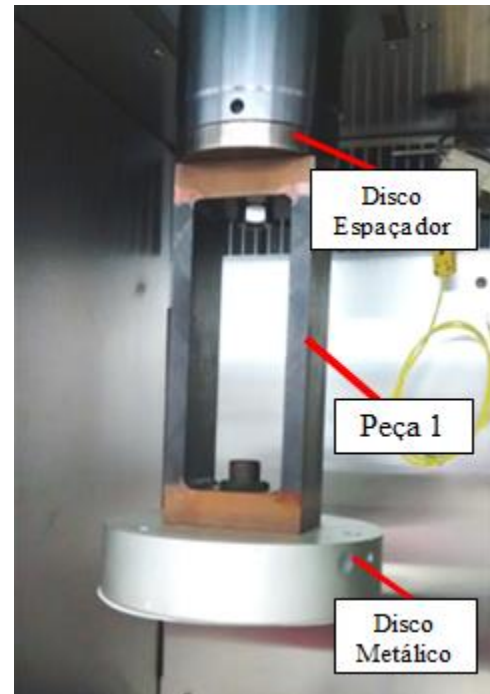
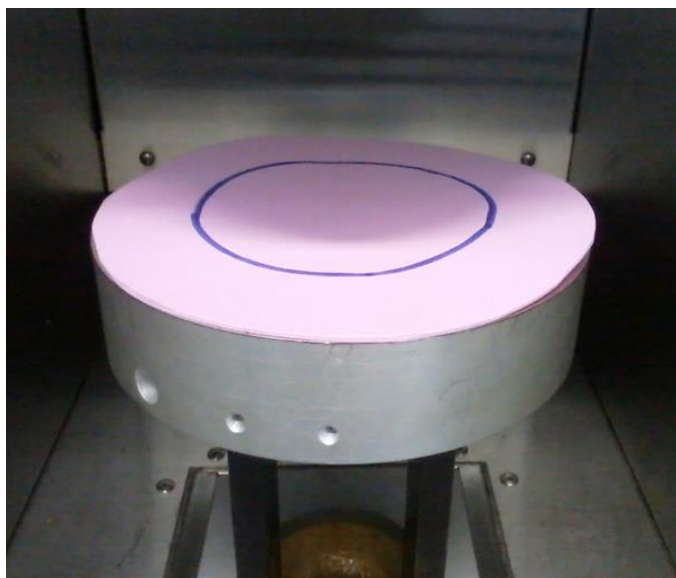


Figura A5 – Posicionamento do EVA



### ❖ Procedimento para Ligar o Equipamento

Quadro A1 – Passos a serem seguidos para ligar o equipamento

<b>Procedimento para ligar a MTS</b>
1. Desligar os 4 botões de segurança
2. Verificar se o pórtico está travado
3. Ligar o computador
4. Ligar a Flex Text GT Controller
5. Acionar a bomba e o ventilador
6. Acionar HPU
7. Abrir Stations Manager
8. Reset HPU

### ❖ Escolha do Programa no Station Manager

Project 1, conforme figura A6

Estação Res Mod, conforme figura A7

- ✓ **OBS:** Verificar se configurações da célula de carga selecionada confere com a célula de carga instalada
- ✓ Reset Interlock Manual
- ✓ Posicionar Pórtico

- Caso o êmbolo da prensa MTS esteja abaixo do limite e o interlock 2, esteja ativado, primeiramente deve-se desativar o interlock e erguer o êmbolo (clicar em Detectors em Station Control e posteriormente desabilitar o interlock do displacement)
- ✓ Habilitar HPU e HSM 1, conforme figura A8
- ✓ Open Procedure
  - Flow Number 0p4, conforme figura A9

Figura A6 – Project 1

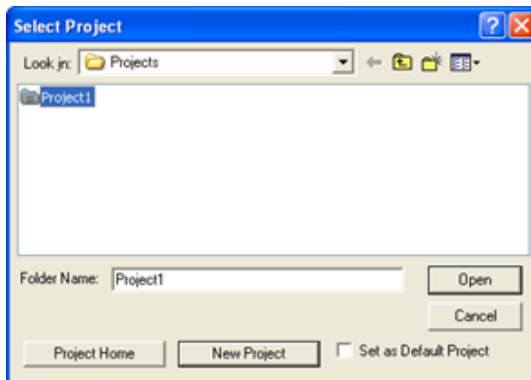


Figura A7 – Res Mod

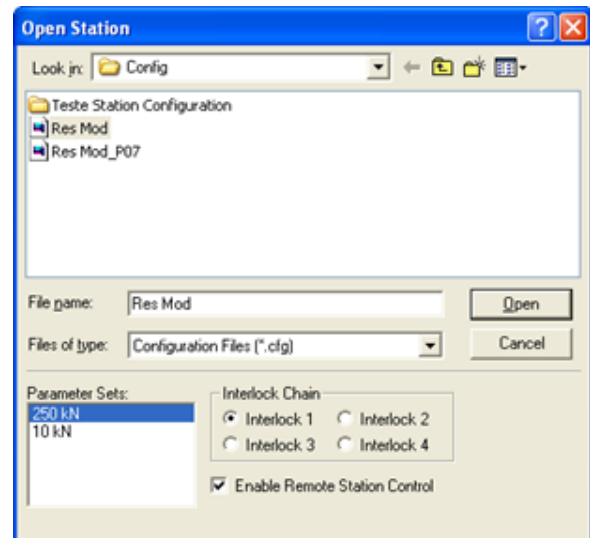


Figura A8 – HPU e HSM 1

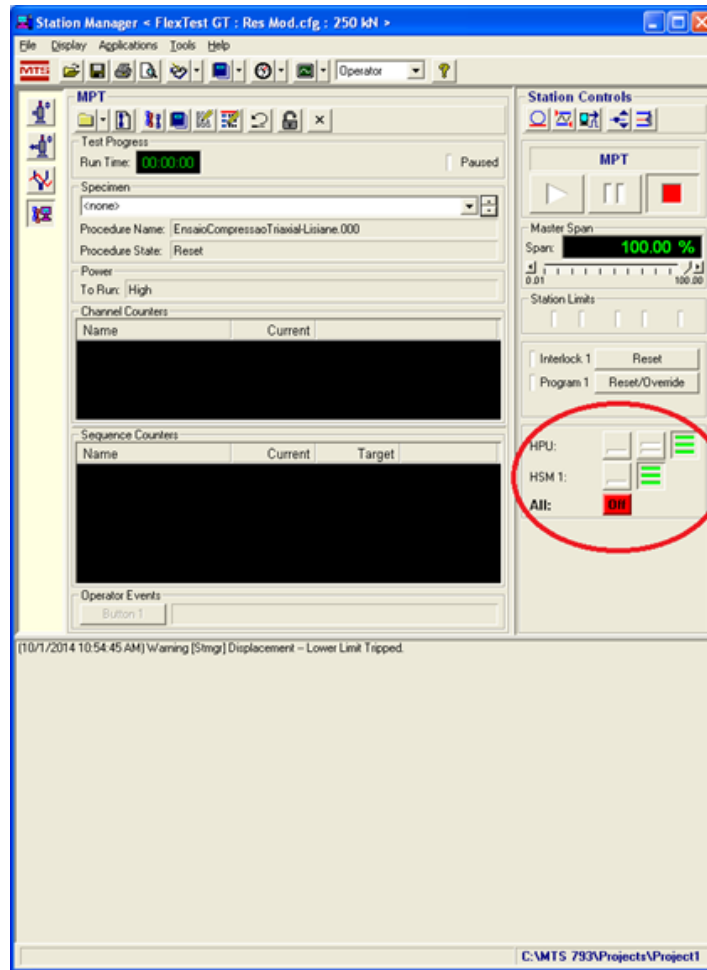
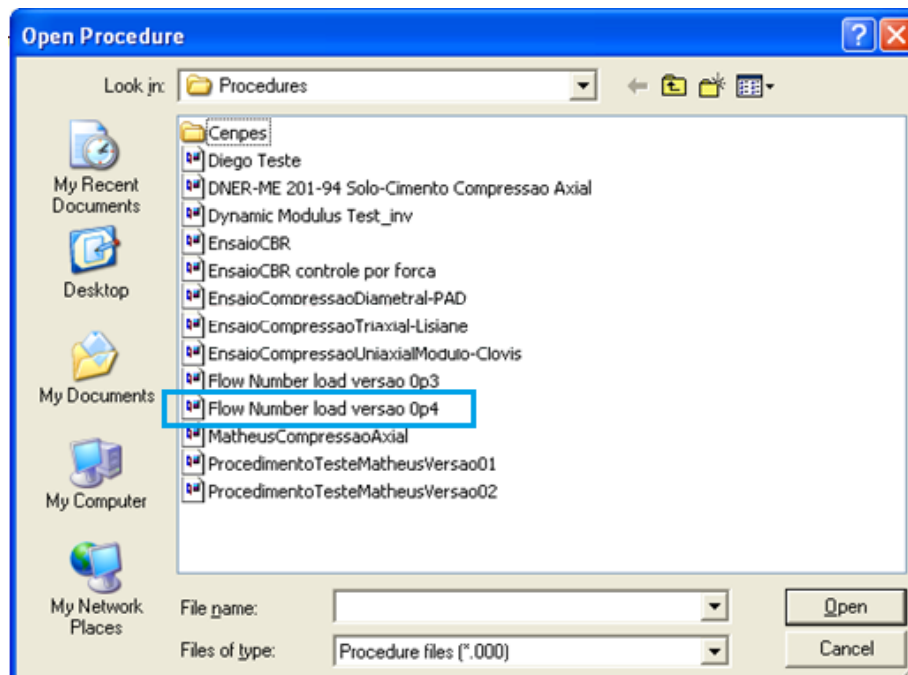


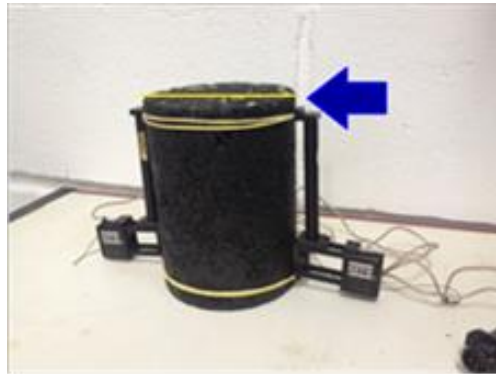
Figura A9 – Escolha do programa Flow Number 0p4



### ❖ Montagem do CP

Colocação dos sensores, fazer demarcação no CP para conferir alinhamento dos sensores, conforme figura A10

Figura A10 – Colocação dos sensores no CP



Posicionar CP na câmara, cuidando para mantê-lo dentro da circunferência desenhada no Eva, conforme figura A11 e figura A12

Figura A11 – Centralidade do CP para ensaio

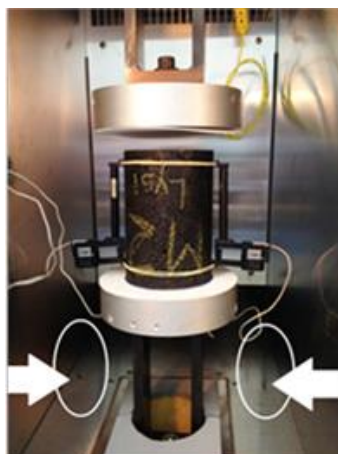


Figura A12 – Posicionamento do CP dentro da circunferência desenhada



Fazer conexão dos sensores, com o conector externo a câmara  
 Destruar o interlock mecânico dos sensores, como ilustrado na figura A13.

Figura A13 – Detalhe do Interlock mecânico



### ❖ Verificação do Posicionamento dos Sensores (TESTE)

Posicionar o êmbolo no interlock manual

- ✓ Auto Offset
- ✓ Zerar sensor Force e Lateral Displacement
- ✓ Baixar o êmbolo no manual até uma Force de contato  $\sim -0,040$  KN  
(Teste com CP de 15 cm de altura  $F = -0,05$  KN e  $D \sim -35,53$ )
- ✓ Verificar se está tudo OK, após esta verificação subir o êmbolo novamente.

### ❖ Condicionamento do CP

Ligar a câmara de temperatura

Programar a temperatura desejada, a figura A14 traz temperaturas e tempos de condicionamentos recomendados pela NCHRP Report 465

Deixar o CP condicionando

Figura A14 – Temperaturas e tempos de condicionamento recomendados

Amostra de Teste de Temperatura, °C	Tempo, Hrs
25	0,54
20	1
37,8	1,5
>54,4	2

fonte: adaptado da NCHRP Report 465

Segundo Nascimento (2008) e Cavalcanti (2010) recomenda-se para o ensaio FN o uso de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$



❖ **Ensaio**

Ajustar o êmbolo no comando manual

- ✓ Force ~-0,040 KN
- ✓ Desativar interlock manual – Manual Control
- ✓ Reset Interlock e Program 1
- ✓ New Specimen – Nome do ensaio
- ✓ MPT Procedure Edito – Open Procedure – Flow Number Load Op4 (Caso não esteja aberto)
- ✓ MPT PLAY – Colocar os dados do operador e do ensaio
- ✓ Aplicar carga de contato
- ✓ Start condicionamento – 15 ciclos
- ✓ Start – iniciar ensaio

❖ **OBS: Sempre cuidar as deformações iniciais do CP, de ocorrer qualquer problema acionar algum dos interlocks de emergência.**

❖ **Encerrar Ensaio**

Levantar êmbolo no interlock manual

Desligar câmara de temperatura

Colocar travas dos sensores, (interlocks de medida da deformação), desconecta-los dos cabos externos e remove-los do CP

Retira CP da câmara

Levantar pórtico no interlock manual e **NÃO** se esquecer de travar o painel

Proceder com os passos de encerramento do equipamento, conforme o quadro A2

Quadro A2 – Passos para encerra o equipamento

<b>Procedimento para desligar a MTS</b>
1. Verificar se está rodando o ensaio
2. Desativar HPU
3. Desativar a bomba e o ventilador
4. Fechar Station Manager
5. Desligar Flex Test GT Controller
6. Desligar o computador